

## AGRADECIMENTOS

A Deus, Espírito Infinito, que me guiou nesta caminhada.

Ao Professor e orientador Glicério Trichês, que contribuiu de forma intensa na minha formação desde a graduação, por compartilhar comigo seu tema de pesquisa e pela coragem de ousar trabalhar com novas ideias e conceitos, correndo os riscos inerentes a esta atitude. Por sua dedicação, pela compreensão e apoio imprescindíveis em todos os momentos pelos quais passei. Pela alegria de trabalharmos juntos.

Ao Professor e orientador Paulo Pereira, por sua amizade, pela oportunidade oferecida, por sua disponibilidade irrestrita, sua forma exigente, crítica e criativa de arguir as ideias apresentadas, que deram norte a este trabalho, facilitando o alcance de seus objectivos.

Ao Professor e orientador Jorge Pais, que sempre demonstrou acreditar no meu potencial, pela excelente orientação, principalmente pelo bom convívio nos dois anos que estive em Portugal, sempre disposto a oferecer estímulos e ouvir com interesse todas as questões, dúvidas e problemas que surgiam durante este tempo. Com ele tive a oportunidade de enriquecer meu conhecimento, com sua experiência, suas argumentações científicas e sugestões na parte experimental do trabalho.

Aos grandes amigos Carlos Palha e Hugo Silva, que ao longo da estada em Portugal foram extremamente generosos comigo, oferecendo sempre o seu ombro amigo durante da construção desta tese de doutoramento.

Ao colega Manuel Minhoto pela informação disponível na sua tese de doutoramento, por me ter dado total acesso ao seu trabalho e o acolhimento oferecido na minha estada em Bragança.

Aos técnicos do Laboratório de Vias de Comunicação da Universidade do Minho, Carlos Palha e Carlos Manuel, e da Universidade de Coimbra, Celestino Marques, pelos trabalhos realizados, com tanta dedicação. Aos funcionários da UFSC e da Universidade do Minho, em especial, Marineia Vieira, Shayene Fernandes, Marco Jorge, Fernando Pokee, Rosário Pereira, Cristina Fernandes, Adriana Lago de Carvalho e Carina Oliveira pelo atendimento oferecido.

Deixo também uma palavra de agradecimento aos professores da UFSC, Leto Momm, Marciano Maccarini, Antônio Fortunato Marcon, Ângela do Valle e Ismael Ulisséia Neto (*in memoriam*) e, da Universidade do Minho, Júlia Lourenço e Nuno Araújo, pela forma como me apoiaram nesta caminhada.

Aos meus amigos no Brasil, Breno Barra Salgado, Eugenio Paceli Werneck e Ana Villas Boas por serem os companheiros de todas as horas.

Aos amigos que conheci em Portugal, Luciana Mascaro, Daniela Fantoni, Alexandre Vargas, Juliana e Everaldo Bonaldo, Abraham Diaz de León, Araguacy Filgueiras, Luzia Novaes, Graça Vasconcelos, Elisabete Freitas, Joel Oliveira e Virginia Fernandez.

À Greca Asfaltos do Brasil por ter patrocinado o envio dos materiais brasileiros para Portugal, em especial ao Dr. Amadeu Greca, e aos Engenheiros Armando Morilha Jr., Wander Omena e José Antonio Antoszczem Jr. À Pedreira Bezerras de Portugal pelo fornecimento dos agregados.

À minha família em Portugal, representada pelo senhor José Gonçalves, Teresa, Manuela, César e Eduarda, que moram para sempre no meu coração.

À minha família no Brasil, minha mãe Iára, minha sogra Conceição, meus irmãos Juarez Jr. e Liliane, e meus cunhados Fernando e Concinha, que, sem o seu apoio não teria conseguido.

À família que constituí, meus filhos Leonardo e João Francisco e meu esposo Fernando, que souberam aceitar e compreender a minha ausência durante este tempo.

Ao meu pai Juarez e meu avô Everardo, que embora não estejam fisicamente entre nós, na certeza de ter sido guiada pelo brilho da sua luz.

Ao Programa ALβAN (Bolsas de Alto Nível para a América Latina) pelo suporte financeiro durante a estada em Portugal e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos fornecida durante a realização do trabalho no Brasil, que muito contribuíram para viabilização desta tese de doutoramento.

# Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos

## RESUMO

O Brasil é um país que possui o sistema de transporte terrestre apoiado essencialmente em rodovias. A idade avançada dos pavimentos rodoviários brasileiros e o eminente crescimento do tráfego e da acção das cargas de roda cada vez mais intensas, têm levado os pavimentos flexíveis a um acelerado processo de deterioração no qual o uso de técnicas de reabilitação empregando materiais convencionais não mais alcançam um comportamento mecânico adequado.

Por outro lado, a utilização de betumes modificados constitui uma alternativa na busca crescente de novos materiais que melhorem as propriedades estruturais das camadas betuminosas. É neste contexto que as misturas betuminosas com betume modificado com borracha de pneus usados têm sido utilizadas com o objectivo do melhoramento da capacidade estrutural de pavimentos flexíveis novos e reabilitados, além de ser uma solução para o problema do depósito inadequado dos pneus insersíveis. No entanto, o Brasil carece da avaliação do comportamento mecânico de misturas com betume-borracha.

O presente trabalho tem como objectivo contribuir para o estudo de misturas betuminosas com betume-borracha produzidos a partir do processo húmido através de uma investigação experimental que procurou avaliar as propriedades e o desempenho mecânico destas misturas, optimizando uma mistura com a melhor capacidade estrutural. Foram utilizados dois tipos betumes-borracha provenientes do processo húmido, produzidos em laboratório através do sistema *continuous blend* e em unidade industrial, pelo sistema *terminal blend*. Foram produzidas misturas betuminosas utilizando-se dois tipos de granulometria, nomeadamente *dense graded* e *gap graded*.

O trabalho apoiou-se no estudo das propriedades do betume e da borracha de pneus, na sua interacção e no comportamento mecânico (módulo, fadiga e deformação permanente) das misturas betuminosas produzidas com estes materiais. Os parâmetros de dosagem através da metodologia Marshall reavaliados para utilização em misturas com betume modificado. Além

disto, foi realizada a avaliação da capacidade destas misturas em reduzir a propagação de fendas, recorrendo a ensaios laboratoriais e modelação numérica através de elementos finitos. A optimização da mistura de melhor desempenho foi escolhida após o dimensionamento de um pavimento, no qual foi utilizada a análise empírico-mecanicista. O efeito da propagação de fendas em misturas com betume-borracha foi avaliado através da reabilitação de um pavimento, considerando a influência deste fenómeno.

Os resultados mostraram que, em relação à mistura convencional, produzida com betume convencional, a incorporação da borracha no betume produz melhorias consideráveis em termos de comportamento elástico e aumento da resistência à fadiga e da resistência à deformação permanente, além da capacidade de retardar a propagação de fendas.

O uso de misturas betuminosas com betume-borracha mostrou constituir uma excelente alternativa para aplicação em camadas de revestimento de pavimentos flexíveis, proporcionando uma significativa melhoria da capacidade estrutural.

### **Palavras-Chave**

Misturas Betuminosas  
Betume-Borracha  
Fadiga  
Deformação Permanente  
Propagação de Fendas  
Dimensionamento de Pavimentos  
Reabilitação de Pavimentos

# **Performance Optimization of Asphalt Rubber Mixtures for Pavement Rehabilitation**

## **ABSTRACT**

The terrestrial transport system in Brazil is essentially supported on highways. Brazilian pavements are old and the eminent growth of traffic and more and more intense vehicle loads have accelerated the deterioration process of flexible pavements, in which the use of rehabilitation techniques using conventional materials no more reach an appropriate mechanical behaviour.

On the other hand, the use of mixtures with modified binders constitutes a suitable alternative in the growing search for new materials that may improve the structural properties of the bituminous layers. It is in this context that bituminous mixtures with asphalt rubber have been used in order to improve the structural capacity of new flexible pavements and of rehabilitated ones, besides being a solution to the problem of waste tire disposal. Nevertheless, Brazilian experts have not developed further knowledge on the mechanical behaviour of materials modified with asphalt rubber.

This work has as a main objective to contribute for the study of bituminous mixtures with asphalt rubber produced by the wet process through an experimental research that aimed at evaluating the properties, the behaviour and the mechanical performance of those mixtures, in order to obtain a mixture with an optimised structural capacity. Two types of asphalt rubber were used after being produced in laboratory through the continuous blend system and in an industrial plant, through the terminal blend system. The gradations of the bituminous mixtures were dense graded and gap graded.

The work was based on; the study of properties of bitumen and crumb rubber from tires; the interaction between bitumen and rubber; the mechanical behaviour (dynamic modulus, fatigue and permanent deformation resistance) of the bituminous mixtures produced with those materials. The design parameters through the Marshall methodology were revalued for mixtures with modified bitumen. The evaluation of the capacity of these mixtures to reduce crack propagation was made through the laboratorial tests and the numerical analysis based on

the finite element method. In order to select the best optimized mixture, a pavement was designed, using the empirical-mechanistic analysis. The effect of crack propagation in asphalt rubber mixtures was evaluated through the rehabilitation pavement design, considering the influence of this phenomenon.

The results showed that, in relation to conventional mixtures, produced with conventional bitumen, the incorporation of rubber in the bitumen considerably improves the elastic behaviour of the resulting mixtures, increasing their resistance to fatigue and permanent deformation, as well their capacity to delay cracking propagation.

The use of bituminous mixtures with asphalt rubber demonstrated to constitute an excellent alternative to be applied in flexible pavements, what will result in a significant improvement of their structural capacity.

### **Key-Words**

Bituminous Mixtures

Asphalt Rubber

Fatigue

Permanent Deformation

Crack Propagation

Pavement Design

Pavement Rehabilitation

# ÍNDICE

## CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações Iniciais.....	1
1.2. Objectivos.....	3
1.2.1. Objectivo geral.....	3
1.2.2. Objectivos específicos.....	3
1.3. Justificativa.....	4
1.4. Metodologia da Pesquisa e Escopo do Trabalho.....	5
Referências Bibliográficas.....	10

## CAPÍTULO 2

### CONSTITUIÇÃO, COMPORTAMENTO E REABILITAÇÃO DOS PAVIMENTOS

RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS .....	11
2.1. Introdução.....	11
2.2. Constituição e Comportamento dos Pavimentos Flexíveis.....	14
2.3. Mecanismos de Degradação dos Pavimentos Flexíveis.....	18
2.4. Principais Tipos de Degradação dos Pavimentos Flexíveis.....	20
2.5. Avaliação da Qualidade dos Pavimentos .....	30
2.5.1. Avaliação da qualidade superficial dos pavimentos.....	32
2.5.2. Avaliação da qualidade estrutural dos pavimentos .....	34
2.6. Reabilitação dos Pavimentos Flexíveis.....	35
2.6.1. Reabilitação das características funcionais .....	37
2.6.2. Reabilitação das características estruturais .....	38
Referências Bibliográficas.....	41

### CAPÍTULO 3

CARACTERIZAÇÃO E COMPORTAMENTO DE MISTURAS BETUMINOSAS .....	45
3.1. Introdução .....	45
3.2. Agregados .....	45
3.2.1. Propriedades dos agregados.....	47
3.2.2. Ensaio de caracterização dos agregados.....	49
3.2.3. Classificação e propriedades do filer .....	55
3.3. Betumes .....	57
3.3.1. Classificação dos betumes .....	58
3.3.2. Envelhecimento dos betumes.....	71
3.3.3. Reologia dos betumes .....	74
3.4. Misturas Betuminosas .....	80
3.4.1. Introdução .....	80
3.4.2. Composição das misturas betuminosas.....	81
3.4.3. Formulação das misturas betuminosas .....	84
3.5. Módulos das Misturas Betuminosas .....	91
3.5.1. Introdução .....	91
3.5.2. Tipos e ensaios de módulos .....	93
3.6. Caracterização da Resistência à Fadiga .....	110
3.6.1. Introdução .....	110
3.6.2. Tipos de solicitações .....	111
3.6.3. Critérios de rotura .....	116
3.6.4. Ensaio de fadiga .....	122
3.7. Caracterização da Resistência à Deformação Permanente .....	127
3.7.1. Mecanismos de deformação permanente.....	127
3.7.2. Ensaio para avaliação da deformação permanente.....	131
3.8. Resistência à Propagação de Fendas.....	139
3.8.1. Introdução .....	139
3.8.2. Origem e mecanismos de propagação de fendas .....	140
3.8.3. Medidas retardadoras do fendilhamento.....	147
3.8.4. Consideração do fendilhamento na reabilitação de pavimentos .....	150
3.8.5. Análise da influência do tipo de interface entre camadas.....	161
Referências Bibliográficas .....	164

**CAPÍTULO 4**

MISTURAS BETUMINOSAS COM BETUME-BORRACHA .....	179
4.1. Introdução.....	179
4.2. Borracha de Pneus Usados .....	183
4.2.1. Introdução.....	183
4.2.2. Processos de obtenção de borracha .....	186
4.2.3. Características da borracha.....	192
4.3. Betume-Borracha.....	195
4.3.1. Introdução.....	195
4.3.2. Incorporação da borracha em misturas betuminosas.....	196
4.3.3. Sistemas de obtenção do betume-borracha .....	205
4.3.4. Características do betume-borracha .....	210
4.4. Misturas Betuminosas com Betume-Borracha .....	213
4.4.1. Aplicação das misturas com betume-borracha em pavimentos.....	213
4.4.2. Formulação das misturas com betume-borracha .....	216
4.4.3. Granulometria das misturas com betume-borracha.....	221
4.4.4. Comportamento das misturas com betume-borracha em laboratório.....	225
4.4.5. Desempenho das misturas com betume-borracha em campo e aspectos construtivos.....	241
4.4.6. Misturas com betume-borracha no Brasil .....	251
4.4.7. Redução da espessura de camadas de reabilitação executadas com betume-borracha .....	256
Referências Bibliográficas.....	259

**CAPÍTULO 5**

MÉTODOS E MATERIAIS UTILIZADOS NA INVESTIGAÇÃO .....	271
5.1 Métodos Utilizados na Investigação.....	271
5.2. Caracterização dos Materiais Empregues.....	281
5.2.1. Propriedades tecnológicas dos agregados .....	281
5.2.2. Borracha de pneus .....	284
5.2.3. Caracterização dos betumes .....	287
5.2.4. Granulometria das misturas.....	297
Referências Bibliográficas.....	302

## CAPÍTULO 6

OPTIMIZAÇÃO DO BETUME-BORRACHA E DAS MISTURAS BETUMINOSAS .....	307
6.1. Introdução .....	307
6.2. Optimização do Betume-Borracha <i>Continuous Blend</i> .....	308
6.2.1. Estudo das características físicas .....	308
6.2.2. Estudo da viscosidade .....	318
6.2.3. Estudo da microscopia electrónica por varrimento.....	320
6.3. Optimização das Misturas Betuminosas .....	324
6.3.1. Formulação das misturas betuminosas .....	324
6.3.2. Misturas produzidas com betume-borracha <i>terminal blend</i> .....	325
6.3.3. Misturas produzidas com betume-borracha <i>continuous blend</i> .....	327
6.3.4. Mistura produzida com betume convencional .....	328
6.4. Produção dos Provetes para os Ensaios de Desempenho .....	330
6.5. Ensaios Mecânicos de Desempenho .....	334
6.5.1. Ensaio de módulo dinâmico.....	334
6.5.2. Ensaio de fadiga.....	351
6.5.3. Ensaio de deformação permanente .....	353
6.6. Análise dos Resultados .....	358
6.7. Misturas com Betumes Portugueses .....	358
6.7.1. Caracterização dos materiais .....	359
6.7.2. Análise da influência do tipo de borracha na modificação dos betumes .....	363
6.7.3. Estudo comparativo entre os betumes convencionais.....	369
6.7.4. Estudo comparativo dos betumes-borracha .....	373
6.8. Ensaios Mecânicos de Desempenho das Misturas Betuminosas .....	392
6.9. Análise dos Resultados .....	397
6.9.1. Reavaliação da formulação Marshall.....	402
6.10. Ensaios Complementares .....	406
6.10.1. Ensaio de adesividade agregado-ligante .....	406
6.10.2. Ensaio de escorrimento .....	407
6.10.3. Avaliação da textura .....	409
6.11. Conclusão do Capítulo 6.....	421
Referências Bibliográficas .....	423

**CAPÍTULO 7**

MELHORIA DO DESEMPENHO DAS MISTURAS .....	429
7.1. Introdução.....	429
7.2. Caracterização das Novas Misturas.....	431
7.2.1. Misturas com betume-borracha <i>terminal blend</i> .....	431
7.2.2. Misturas com betume-borracha <i>continuous blend</i> .....	432
7.3. Ensaio Mecânicos de Desempenho.....	433
7.3.1. Módulo dinâmico e ângulo de fase.....	433
7.3.2. Resistência à fadiga .....	443
7.3.3. Resistência à deformação permanente .....	445
7.3.4. Análise comparativa entre as misturas (metodologia Marshall <i>versus</i> 1% a mais de betume).....	448
7.4. Comparação do Desempenho das Misturas Estudadas .....	461
7.5. Misturas Seleccionadas na Fase 4 .....	466
7.5.1. Ensaio <i>Wheel Tracking</i> .....	469
7.6. Ensaio Complementares .....	473
7.7. Dimensionamento do Pavimento.....	478
7.7.1. Introdução.....	478
7.7.2. Método empírico do DNIT (DNER/81) .....	480
7.7.3. Análise empírico-mecanicista .....	485
7.7.4. Consideração da redução da espessura das camadas de desgaste .....	491
7.7.5. Avaliação simplificada do custo/benefício da solução proposta.....	493
7.8. Conclusão do Capítulo 7 .....	494
Referências Bibliográficas.....	497

## **CAPÍTULO 8**

RESISTÊNCIA À PROPAGAÇÃO DE FENDAS .....	499
8.1. Introdução .....	499
8.2. Modelação Numérica da Propagação de Fendas .....	500
8.2.1. Caracterização dos modelos utilizados .....	500
8.2.2. Avaliação do dano .....	509
8.3. Avaliação Laboratorial da Propagação de Fendas .....	513
8.3.1. Introdução .....	513
8.3.2. Descrição do ensaio e do equipamento .....	514
8.3.3. Configuração do ensaio .....	517
8.3.4. Análise dos resultados .....	518
8.3.5. Cálculo da extensão de Von Mises correspondente aos ensaios de propagação de fendas .....	521
8.3.6. Aplicação dos resultados do ensaio de propagação de fendas .....	526
8.4. Conclusão do Capítulo 8 .....	529
Referências Bibliográficas .....	531

## **CAPÍTULO 9**

CONCLUSÃO .....	533
9.1. Síntese do Trabalho .....	533
9.2. Conclusões Finais .....	536
9.3. Propostas para Investigações Futuras .....	541

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	– Esquema da metodologia utilizada.....	5
Figura 1.2	– Mapa do Brasil e em destaque a Região Sul e o Estado de Santa Catarina.....	6
Figura 2.1	– Pavimento: constituição, acções, solicitações e respostas (Branco <i>et al.</i> , 2005).....	11
Figura 2.2	– Camadas constituintes de um pavimento flexível (Brasil).....	14
Figura 2.3	– Pavimento flexível: constituição e comportamento Branco <i>et al.</i> , 2005).....	17
Figura 2.4	– Evolução das solicitações num pavimento rodoviário (Pereira & Miranda, 1999).....	19
Figura 2.5	– Trinca isolada.....	27
Figura 2.6	– Trincas interligadas.....	28
Figura 2.7	– Afundamento de trilha de roda.....	29
Figura 2.8	– Afundamento.....	30
Figura 2.9	– Deformações no pavimento (adaptado do DNIT, 2006).....	35
Figura 3.1	– Dispositivos de medição do índice de forma (BS 812, 1990).....	50
Figura 3.2	– Equipamento reómetro de cisalhamento dinâmico (DSR).....	63
Figura 3.3	– Esquema do ensaio de viscosidade com o viscosímetro Brookfield.....	64
Figura 3.4	– Ensaio com o reómetro de viga à flexão (BBR).....	64
Figura 3.5	– Esquema do ensaio de tracção directa (DTT).....	65
Figura 3.6	– Alterações na composição química do betume após o fabrico, aplicação e durante a vida de serviço (adaptado de Shell, 2003).....	72
Figura 3.7	– Envelhecimento do betume desde a produção da mistura betuminosa até a vida em serviço (Whiteoak, 2003).....	72
Figura 3.8	– Propriedades viscoelásticas do betume (SHRP, 1994 <sub>A</sub> ).....	74
Figura 3.9	– Tensão de corte aplicada e deformação de corte resultante (adaptado de SHRP, 1994 <sub>A</sub> ).....	75
Figura 3.10	– Componentes do módulo complexo de corte $G^*$ .....	76
Figura 3.11	– Composição de uma amostra de mistura betuminosa compactada.....	81
Figura 3.12	– Princípio de compactação com a PCG (LCPC, 2007).....	88
Figura 3.13	– Exemplo de interpretação do ensaio com a PCG (LCPC, 2007).....	88

Figura 3.14 – Princípio de compactação do compactador girosférico SUPERPAVE (SGC) (WSDOT, 2005) .....	89
Figura 3.15 – Esforços de compactação do SGC (WSDOT, 2005) .....	90
Figura 3.16 – Tensão ( $\sigma_0$ ) e a extensão ( $\epsilon_0$ ) correspondente, com o ângulo de fase ( $\phi$ ) .....	95
Figura 3.17 – Curvas isotérmicas de uma mistura betuminosa (Momm, 1998).....	99
Figura 3.18 – Espaço ou Diagrama de Black de uma mistura betuminosa (Momm, 1998) .....	100
Figura 3.19 – Curvas isócronas de uma mistura betuminosa (Momm, 1998).....	100
Figura 3.20 – Representação do módulo complexo no Plano Cole-Cole (Momm, 1998) .....	101
Figura 3.21 – <i>Master Curve</i> (Bernucci <i>et al.</i> , 2007) .....	103
Figura 3.22 – Sinal de deformação longitudinal na face inferior de uma camada betuminosa sob o efeito da passagem de um eixo (De La Roche, 1996).....	111
Figura 3.23 – Formas de carregamentos utilizadas em ensaios de fadiga (adaptado de Said, 1988).....	112
Figura 3.24 – Tensões induzidas num pavimento por uma carga em movimento .....	114
Figura 3.25 – Exemplo da curva de Wohler.....	117
Figura 3.26 – Variação da rigidez em ensaios à tensão e extensão controlada (adaptado de SHRP <sub>B</sub> , 1994) .....	119
Figura 3.27 – Definição da ruína em ensaios de flexão à extensão controlada (adaptado de Di Benedetto <i>et al.</i> , 1997).....	119
Figura 3.28 – Ciclo de histerese tensão-extensão num ensaio de fadiga por flexão à extensão controlada (adaptado de SHRP <sub>B</sub> , 1994) .....	120
Figura 3.29 – Variação da energia dissipada em ensaios à tensão e extensão controlada (adaptado de SHRP <sub>B</sub> , 1994) .....	120
Figura 3.30 – Simulador de tráfego LPC da USP .....	133
Figura 3.31 – Simulador de tráfego da Universidade de Coimbra .....	134
Figura 3.32 – Equipamento utilizado no ensaio de corte simples a altura constante da Universidade do Minho.....	137
Figura 3.33 – Pavimento fendilhado reabilitado com uma mistura betuminosa (adaptado de Venestraete & de Bondt, 1997) .....	142
Figura 3.34 – Deslocamentos sofridos pelos bordos de uma fenda .....	143
Figura 3.35 – Fendilhamento em modo I (adaptado de Molenaar, 2003) .....	144
Figura 3.36 – Fendilhamento em modo II (adaptado de Molenaar, 2003).....	144

Figura 3.37	– Fendilhamento em modo III (adaptado de Minhoto, 2007).....	145
Figura 3.38	– Consideração da evolução do estado de tensão no reforço submetido às acções de temperatura e de tráfego (Minhoto, 2007) .....	159
Figura 3.39	– Consideração da evolução do estado de tensão no reforço sujeito às acções em estudo (Minhoto, 2007).....	159
Figura 3.40	– Diferentes estados de tensão observados entre camadas coladas e descoladas.....	163
Figura 4.1	– Componentes de um pneu (adaptado de Brazil tires, 2005).....	187
Figura 4.2	– Sistema do processo ambiente (Reschner, 2006) .....	189
Figura 4.3	– Sistema do processo criogénico (Reschner, 2006) .....	191
Figura 4.4	– Modelo hipotético de interacção entre as partículas de borracha e o betume convencional (Holeeran & Reed, 2000) .....	202
Figura 4.5	– Efeito do tempo de digestão na viscosidade do betume-borracha (adaptado de Takallou & Sainon 1992).....	202
Figura 4.6	– Grão de borracha durante o fabrico do betume-borracha (Abdeirahman, 2006).....	203
Figura 4.7	– Viscosidade do betume-borracha ao longo do tempo e do aumento da temperatura (Abdeirahman, 2006).....	203
Figura 4.8	– Micrografia de betumes-borracha (Caltrans 2003 <sub>B</sub> ).....	204
Figura 4.9	– Modificação do betume através do sistema <i>continuous blend</i> (adaptado de Caltrans, 2003 <sub>A</sub> ) .....	206
Figura 4.10	– Exemplos de curvas granulométricas utilizadas em misturas betuminosas com betume-borracha .....	222
Figura 4.11	– Estrutura granulométrica das misturas betume-borracha .....	222
Figura 4.12	– Curvas de fadiga obtidas para as misturas estudadas por Sousa <i>et al.</i> (1999).....	226
Figura 4.13	– Comparação do desempenho à fadiga (Sousa <i>et al.</i> , 1999).....	226
Figura 4.14.	– Evolução da deformação com <i>Wheel Tracking</i> (Sousa <i>et al.</i> , 1999).....	227
Figura 4.15	– Comparação da resistência ao corte da mistura convencional e com betume-borracha (Sousa <i>et al.</i> , 1999).....	227
Figura 4.16	– Resistência à deformação permanente (Mohammad <i>et al.</i> , 2000).....	228
Figura 4.17	– Evolução das rodeiras (Nourelhuda <i>et al.</i> , 2000) .....	229
Figura 4.18	– Curvas de fadiga à tensão controlada (Sousa <i>et al.</i> 2000).....	230
Figura 4.19	– Curvas de fadiga à extensão controlada (Sousa <i>et al.</i> 2000).....	231

Figura 4.20	– Curvas de fadiga das misturas estudadas por Visser & Verhaeghe (2000) ..	232
Figura 4.21	– Curvas de fadiga das misturas estudadas por Gallego <i>et al.</i> (2000) .....	232
Figura 4.22	– Curvas de fadiga das misturas estudadas por Shatnawy & Long (2003).....	233
Figura 4.23	– Comparação entre as curvas de fadiga obtidas por Raad <i>et al.</i> (2001) das granulometrias <i>gap graded</i> .....	234
Figura 4.24	– Comparação entre as curvas de fadiga obtidas por Raad <i>et al.</i> (2001) das granulometrias <i>dense graded</i> .....	234
Figura 4.25	– Módulos dinâmicos das misturas estudadas por Raad <i>et al.</i> (2001) .....	235
Figura 4.26	– Curvas de fadiga obtidas por Kaloush <i>et al.</i> (2003).....	236
Figura 4.27	– Curvas de fadiga das misturas contínuas estudadas por Dantas Neto (2004).....	237
Figura 4.28	– Curvas de fadiga das misturas descontínuas estudadas por Dantas Neto (2004).....	237
Figura 4.29	– Resistência à deformação permanente das misturas (Dantas Neto, 2004)....	238
Figura 4.30	– Módulo de corte das misturas estudadas por Bennert <i>et al.</i> (2004) .....	238
Figura 4.31	– Resistência à deformação permanente das misturas (Bennert <i>et al.</i> , 2004) ..	239
Figura 4.32	– Equipamento <i>Reflective Cracking Device</i> (RCD).....	240
Figura 4.33	– Resistência à propagação de fendas entre a mistura convencional e com betume-borracha (Sousa <i>et al.</i> , 2000) .....	241
Figura 4.34	– Módulo dinâmico das misturas com betume-borracha envelhecidas e originais, nas frequências de 5 e 10 Hz (Antunes <i>et al.</i> , 2000).....	243
Figura 4.35	– Curvas de fadiga das misturas com betume-borracha envelhecidas e originais (Antunes <i>et al.</i> , 2000).....	244
Figura 4.36	– Resultados da deformação permanente das misturas com betume-borracha (extraídas de campo) estudadas por Antunes <i>et al.</i> (2000) .....	244
Figura 4.37	– Resultados da deformação permanente das misturas com betume-borracha (produzidas em laboratório) estudadas por Antunes <i>et al.</i> (2000) .....	246
Figura 4.38	– Evolução do fendilhamento das misturas convencional e com betume-borracha AR-ACFC (Way, 2000).....	247
Figura 4.39	– Evolução do fendilhamento das misturas convencional e com betume-borracha AR-ACFC (Way, 2003) .....	248
Figura 4.40	– Percentagem de deformação das misturas (Leite <i>et al.</i> , 2000).....	252
Figura 4.41	– Profundidade das rodeiras (Leite <i>et al.</i> , 2003).....	253
Figura 4.42	– Número de ciclos para a deflexão de 1,0 mm (Leite <i>et al.</i> , 2003) .....	254

Figura 4.43	– Evolução das deflexões (Ceratti <i>et al.</i> , 2006).....	255
Figura 4.44	– Evolução das rodeiras (Ceratti <i>et al.</i> , 2006) .....	255
Figura 4.45	– Evolução do fendilhamento (Ceratti <i>et al.</i> , 2006) .....	256
Figura 5.1	– Fases da metodologia experimental	
	(a) Fase 1: Caracterização dos Materiais Empregues.....	278
	(b) Fase 2: Otimização do Betume-Borracha <i>Continuous Blend</i> .....	278
	(c) Fase 3: Otimização das Misturas Betuminosas.....	279
	(d) Fase 4: Melhoria do Desempenho das Misturas.....	280
	(e) Fase 5: Propagação de Fendas.....	281
Figura 5.2	– Curva granulométrica dos agregados .....	284
Figura 5.3	– Provede no ensaio de resiliência .....	288
Figura 5.4	– Reómetro <i>Reologica StressTech HR</i> utilizado na investigação.....	291
Figura 5.5	– Posição dos pratos paralelos do Reómetro, antes do ensaio.....	291
Figura 5.6	– Posicionamento dos pratos e colocação da amostra de betume.....	292
Figura 5.7	– Amostra posicionada entre os pratos paralelos....	292
Figura 5.8	– Curva granulométrica utilizada e fuso granulométrico DNIT Faixa “C” ....	298
Figura 5.9	– Curva granulométrica utilizada e fuso granulométrico do AI tipo IV.....	299
Figura 5.10	– Curva granulométrica utilizada e fuso granulométrico ARHM-GG do Caltrans .....	300
Figura 5.11	– Curva granulométrica utilizada e fuso granulométrico AR-AC do ADOT .....	301
Figura 6.1	– Agitador utilizado para produção do betume-borracha tipo <i>continuous blend</i> .....	310
Figura 6.2	– Processo de fabrico em laboratório do betume-borracha tipo <i>continuous blend</i> .....	311
Figura 6.3	– Variação da penetração em função da percentagem de borracha.....	312
Figura 6.4	– Variação da penetração em função do tempo de digestão.....	313
Figura 6.5	– Variação do ponto de amolecimento em função da percentagem de borracha .....	314
Figura 6.6	– Variação do ponto de amolecimento em função do tempo de digestão .....	314
Figura 6.7	– Variação da resiliência em função da percentagem de borracha.....	315
Figura 6.8	– Variação da resiliência em função do tempo de digestão.....	316
Figura 6.9	– Variação da viscosidade em função da percentagem de borracha.....	316
Figura 6.10	– Variação da viscosidade em função do tempo de digestão .....	317

Figura 6.11 – Variação da viscosidade em função do tempo de digestão.....	318
Figura 6.12 – Variação da viscosidade aparente a diversos tempos de digestão .....	319
Figura 6.13 – Variação da viscosidade aparente em função da percentagem de borracha.....	320
Figura 6.14 – Microscópio Electrónico de Varrimento (MEV) .....	321
Figura 6.15 – Amostras de betume-borracha preparadas para o MEV .....	321
Figura 6.16 – Microestrutura do BBbB a diversos tempos de digestão .....	322
Figura 6.17 – Picnómetro a vácuo tipo “F” para determinação da BMT .....	325
Figura 6.18 – Curva temperatura <i>versus</i> viscosidade do CAP 50/70.....	329
Figura 6.19 – Homogeneização dos materiais.....	331
Figura 6.20 – Sequência de compactação de uma mistura.....	332
Figura 6.21 – Esquema de corte das lajes para obtenção de provetes.....	333
Figura 6.22 – Forma de obtenção dos provetes.....	333
Figura 6.23 – Proвете prismático (viga) para ensaios de fadiga e de módulo dinâmico.....	334
Figura 6.24 – Proвете cilíndrico (carote) para ensaios de deformação permanente.....	334
Figura 6.25 – Equipamento servo-hidráulico para a realização dos ensaios de flexão alternada (modelo CS 7800).....	335
Figura 6.26 – Dispositivo de flexão alternada em 4 pontos .....	336
Figura 6.27 – Introdução do provete no equipamento.....	337
Figura 6.28 – Representação do carregamento aplicado no ensaio de flexão alternada em 4 pontos em provetes prismáticos.....	338
Figura 6.29 – Módulo dinâmico das misturas em função da frequência de aplicação de carga à temperatura de 20 °C .....	340
Figura 6.30 – Ângulo de fase das misturas em função da frequência de aplicação de carga à temperatura de 20 °C .....	340
Figura 6.31 – Módulo dinâmico das misturas em função da frequência de aplicação de carga à temperatura de 25 °C .....	341
Figura 6.32 – Ângulo de fase das misturas em função da frequência de aplicação de carga à temperatura à 25 °C .....	342
Figura 6.33 – Módulo dinâmico das misturas em função da frequência de aplicação de carga à temperatura de 15 °C .....	343
Figura 6.34 – Ângulo de fase das misturas em função da frequência de aplicação de carga à temperatura de 15 °C .....	343

Figura 6.35 – Curvas de equivalência frequência-temperatura das misturas (referência 20 °C).....	344
Figura 6.36 – Curvas de equivalência frequência-temperatura para frequências entre 1 e 10 Hz.....	345
Figura 6.37 – Espaço de Black da mistura ABB20 .....	346
Figura 6.38 – Espaço de Black da mistura CBB20.....	346
Figura 6.39 – Espaço de Black da mistura IBB15 .....	346
Figura 6.40 – Espaço de Black da mistura ABBbB.....	347
Figura 6.41 – Espaço de Black da mistura CBBbB .....	347
Figura 6.42 – Espaço de Black da mistura IBBbB .....	347
Figura 6.43 – Espaço de Black da mistura BBB (referência) .....	348
Figura 6.44 – Representação Cole-Cole da mistura ABB20 .....	348
Figura 6.45 – Representação Cole-Cole da mistura CBB20.....	349
Figura 6.46 – Representação Cole-Cole da mistura IBB15 .....	349
Figura 6.47 – Representação Cole-Cole da mistura ABBbB.....	349
Figura 6.48 – Representação Cole-Cole da mistura CBBbB.....	350
Figura 6.49 – Representação Cole-Cole da mistura IBBbB .....	350
Figura 6.50 – Representação Cole-Cole da mistura BBB (referência) .....	350
Figura 6.51 – Curvas de fadiga das misturas estudadas.....	352
Figura 6.52 – Provetes colados para ensaio de módulo de corte e de deformação permanente.....	353
Figura 6.53 – Equipamento para execução do ensaio RSST-CH (modelo CS 75005).....	354
Figura 6.54 – Conjunto provete e pratos montados no equipamento – ensaio RSST-CH..	354
Figura 6.55 – Módulo de corte das misturas betuminosas no ensaio a 60 °C.....	355
Figura 6.56 – ESAL que origina uma rodeira de 12,7 mm nas misturas betuminosas a 60 °C .....	357
Figura 6.57 – ESAL que origina uma rodeira de 20,0 mm nas misturas betuminosas a 60 °C .....	357
Figura 6.58 – Curvas granulométricas das borrachas estudadas e fuso granulométrico ADOT.....	363
Figura 6.59 – Aparência das borrachas criogénica e ambiente.....	364
Figura 6.60 – MEV da borracha ambiente com uma ampliação de 50 vezes.....	365
Figura 6.61 – MEV da borracha criogénica com uma ampliação de 50 vezes.....	365
Figura 6.62 – MEV da borracha ambiente com uma ampliação de 700 vezes.....	365

Figura 6.63 – MEV da borracha criogénica com uma ampliação de 700 vezes .....	366
Figura 6.64 – MEV da borracha ambiente com aumento de 1600 vezes .....	366
Figura 6.65 – MEV da borracha criogénica com aumento de 1600 vezes .....	366
Figura 6.66 – Análise por difracção de raio-X da borracha ambiente.....	368
Figura 6.67 – Análise por difracção de raio-X da borracha criogénica.....	368
Figura 6.68 – Comparação entre os betumes convencionais utilizados .....	369
Figura 6.69 – Relação entre a tensão de corte e a viscosidade.....	370
Figura 6.70 – Módulos $G'$ e $G''$ dos betumes em função da frequência .....	371
Figura 6.71 – Módulos $G^*$ e o ângulo de fase em função da frequência .....	372
Figura 6.72 – $G^* \cdot \text{sen} \delta$ em função da frequência aplicada.....	372
Figura 6.73 – $G^*/\text{sen} \delta$ em função da frequência aplicada.....	372
Figura 6.74 – Características dos betumes-borracha.....	373
Figura 6.75 – $G^* \cdot \text{sen} \delta$ em função da frequência na temperatura de 20 °C .....	377
Figura 6.76 – $G^*/\text{sen} \delta$ em função da frequência na temperatura de 20 °C .....	378
Figura 6.77 – $G^* \cdot \text{sen} \delta$ em função da frequência na temperatura de 30 °C .....	378
Figura 6.78 – $G^*/\text{sen} \delta$ em função da frequência na temperatura de 30 °C .....	378
Figura 6.79 – $G^* \cdot \text{sen} \delta$ em função da frequência na temperatura de 40 °C .....	379
Figura 6.80 – $G^*/\text{sen} \delta$ em função da frequência na temperatura de 40 °C .....	379
Figura 6.81 – $G^* \cdot \text{sen} \delta$ em função da frequência na temperatura de 50 °C .....	379
Figura 6.82 – $G^*/\text{sen} \delta$ em função da frequência na temperatura de 50 °C .....	380
Figura 6.83 – $G^* \cdot \text{sen} \delta$ em função da frequência na temperatura de 60 °C .....	380
Figura 6.84 – $G^*/\text{sen} \delta$ em função da frequência na temperatura de 60 °C .....	380
Figura 6.85 – Curva de equivalência frequência-temperatura do BB15.....	382
Figura 6.86 – Curva de equivalência frequência-temperatura do BB20.....	382
Figura 6.87 – Curva de equivalência frequência-temperatura do BBbB.....	382
Figura 6.88 – Curva de equivalência frequência-temperatura do BBbP.....	383
Figura 6.89 – Curva de equivalência frequência-temperatura do BCbB.....	383
Figura 6.90 – Curva de equivalência frequência-temperatura do BCbP.....	383
Figura 6.91 – Curva de equivalência frequência-temperatura do BGbB.....	384
Figura 6.92 – Curva de equivalência frequência-temperatura do BGbP.....	384
Figura 6.93 – Curva de equivalência frequência-temperatura do BB.....	384
Figura 6.94 – Curva de equivalência frequência-temperatura de todos os betumes.....	385

Figura 6.95 – Curva de equivalência frequência-temperatura dos betumes para frequências de 1 a 10 Hz.....	385
Figura 6.96 – Microestrutura do betume-borracha <i>continuous blend</i> BBbB.....	386
Figura 6.97 – Microestrutura do betume-borracha <i>continuous blend</i> BBbP.....	386
Figura 6.98 – Microestrutura do betume-borracha <i>continuous blend</i> BGbB.....	387
Figura 6.99 – Microestrutura do betume-borracha <i>continuous blend</i> BGbP.....	387
Figura 6.100 – Microestrutura do betume-borracha <i>continuous blend</i> BCbB.....	388
Figura 6.101 – Microestrutura do betume-borracha <i>continuous blend</i> BCbP.....	388
Figura 6.102 – Microestrutura do betume-borracha <i>terminal blend</i> BB20.....	389
Figura 6.103 – Microestrutura do betume-borracha <i>terminal blend</i> BB15.....	389
Figura 6.104 – Microestrutura do BCbP para vários tempos de digestão.....	390
Figura 6.105 – Microestrutura do betume-borracha <i>continuous blend</i> com 15% de borracha.....	391
Figura 6.106 – Evolução do módulo dinâmico das misturas Caltrans em função da frequência de aplicação de carga à temperatura de 20 °C.....	393
Figura 6.107 – Evolução do ângulo de fase das misturas Caltrans em função da frequência de aplicação de carga à temperatura de 20 °C.....	393
Figura 6.108 – Evolução do módulo dinâmico das misturas Caltrans e BBB em função da frequência de aplicação de carga à temperatura de 20 °C.....	394
Figura 6.109 – Evolução do ângulo de fase das misturas Caltrans e BBB em função da frequência de aplicação de carga à temperatura de 20 °C.....	394
Figura 6.110 – Curvas de fadiga das misturas Caltrans e BBB.....	395
Figura 6.111 – ESAL que origina uma rodeira de 12,7 mm nas misturas Caltrans e BBB..	396
Figura 6.112 – ESAL que origina uma rodeira de 20,0 mm nas misturas Caltrans e BBB..	397
Figura 6.113 – Curvas de fadiga das misturas estudadas.....	398
Figura 6.114 – $N_{100}$ para uma extensão de $100 \times 10^{-6}$ das misturas.....	398
Figura 6.115 – $N_{200}$ para uma extensão de $200 \times 10^{-6}$ das misturas.....	399
Figura 6.116 – ESAL que origina uma rodeira de 12,7 mm nas misturas estudadas.....	400
Figura 6.117 – ESAL que origina uma rodeira de 20,0 mm nas misturas estudadas.....	400
Figura 6.118 – Curvas de fadiga das misturas piloto estudadas.....	404
Figura 6.119 – $N_{100}$ para as misturas piloto.....	405
Figura 6.120 – ESAL que origina uma rodeira de 12,7 mm nas misturas piloto.....	405
Figura 6.121 – Comparação entre a adesividade agregado-ligante.....	407
Figura 6.122 – Ensaio de escorrimento para a amostra CBB20.....	408

Figura 6.123 –	Análise visual da superfície das placas de diferentes granulometrias .....	409
Figura 6.124 –	Sequência de condução do ensaio da mancha de areia .....	411
Figura 6.125 –	Resultados dos ensaios de mancha de areia .....	412
Figura 6.126 –	Permeâmetro de carga hidráulica variável utilizado no estudo.....	414
Figura 6.127 –	Pêndulo britânico utilizado no estudo .....	415
Figura 6.128 –	Microtextura das misturas estudadas .....	416
Figura 6.129 –	Curvas de referência das misturas.....	419
Figura 7.1 –	Módulo dinâmico das misturas nas função frequências aplicadas à temperatura de 15 °C.....	434
Figura 7.2 –	Módulo dinâmico das misturas nas função frequências aplicadas à temperatura de 20 °C.....	434
Figura 7.3 –	Módulo dinâmico das misturas nas função frequências aplicadas à temperatura de 25 °C.....	434
Figura 7.4 –	Ângulo de fase das misturas nas frequências aplicadas à temperatura de 15 °C.....	435
Figura 7.5 –	Ângulo de fase das misturas nas frequências aplicadas à temperatura de 20 °C.....	435
Figura 7.6 –	Ângulo de fase das misturas nas frequências aplicadas à temperatura de 25 °C.....	435
Figura 7.7 –	<i>Master-curve</i> das misturas com mais 1% de betume e da mistura de referência.....	437
Figura 7.8 –	Espaço de Black da mistura ABB201 .....	438
Figura 7.9 –	Espaço de Black da mistura CBB201 .....	438
Figura 7.10 –	Espaço de Black da mistura IBB151.....	439
Figura 7.11 –	Espaço de Black da mistura ABBbB1 .....	439
Figura 7.12 –	Espaço de Black da mistura CBBbB1.....	439
Figura 7.13 –	Espaço de Black da mistura IBBbB1 .....	440
Figura 7.14 –	Representação Cole-Cole da mistura ABB201 .....	440
Figura 7.15 –	Representação Cole-Cole da mistura CBB201 .....	441
Figura 7.16 –	Representação Cole-Cole da mistura IBB151 .....	441
Figura 7.17 –	Representação Cole-Cole da mistura ABBbB1 .....	441
Figura 7.18 –	Representação Cole-Cole da mistura CBBbB1 .....	442
Figura 7.19 –	Representação Cole-Cole da mistura IBBbB1 .....	442
Figura 7.20 –	Curvas de fadiga das misturas da Fase 4 e a mistura convencional.....	443

Figura 7.21 – $N_{100}$ para uma extensão de $100 \times 10^{-6}$ das misturas.....	444
Figura 7.22 – ESAL que origina uma rodeira de 12,7 mm nas misturas com mais 1% de betume e mistura convencional BBB .....	445
Figura 7.23 – ESAL que origina uma rodeira de 20,0 mm nas misturas com mais 1% de betume e mistura convencional BBB .....	446
Figura 7.24 – ESAL que origina uma rodeira de 12,7 mm (misturas da Fase 4 e BBB)....	447
Figura 7.25 – ESAL que origina uma rodeira de 20,0 mm (misturas da Fase 4 e BBB)....	447
Figura 7.26 – Variação do módulo e do ângulo de fase das misturas ABB20 e ABB201 .....	450
Figura 7.27 – Curvas de fadiga das misturas ABB20 e ABB201 .....	451
Figura 7.28 – Variação do módulo e do ângulo de fase das misturas CBB20 e CBB201 ..	451
Figura 7.29 – Curvas de fadiga das misturas CBB20 e CBB201 .....	452
Figura 7.30 – Variação do módulo e do ângulo de fase das misturas CBBbB e CBBbB1 .....	452
Figura 7.31 – Curvas de fadiga das misturas CBBbB e CBBbB1 .....	453
Figura 7.32 – Variação do módulo e do ângulo de fase das misturas IBB15 e IBB151....	453
Figura 7.33 – Curvas de fadiga das misturas IBB15 e IBB151 .....	454
Figura 7.34 – Variação do módulo e do ângulo de fase das misturas IBBbB e IBBbB1 ...	454
Figura 7.35 – Curvas de fadiga das misturas IBBbB e IBBbB1 .....	455
Figura 7.36 – Variação do módulo e do ângulo de fase das misturas ABBbB e ABBbB1.....	455
Figura 7.37 – Curvas de fadiga das misturas ABBbB e ABBbB1.....	456
Figura 7.38 – Módulo de corte das misturas betuminosas da Fase 4 (com mais 1% de betume) .....	457
Figura 7.39 – Módulo de corte das misturas betuminosas estudadas e a mistura BBB.....	457
Figura 7.40 – ESAL que origina uma rodeira de 12,7 mm nas misturas.....	459
Figura 7.41 – ESAL que origina uma rodeira de 20,0 mm nas misturas.....	459
Figura 7.42 – Resultados de fadiga das misturas avaliadas na investigação .....	461
Figura 7.43 – Curvas de fadiga das misturas avaliadas na investigação.....	461
Figura 7.44 – Variação de $G^* \cdot \sin \delta$ para as frequências de 1 a 10 Hz a 20 °C .....	463
Figura 7.45 – Variação de $\delta$ para as frequências de 1 a 10 Hz a 20 °C .....	463
Figura 7.46 – ESAL que origina uma rodeira de 12,7 mm nas misturas avaliadas .....	464
Figura 7.47 – ESAL que origina uma rodeira de 20,0 mm nas misturas avaliadas .....	464

Figura 7.48	– Variação de $G^*/\text{sen}\delta$ para as frequências de 1 a 10 Hz a 60 °C.....	465
Figura 7.49	– Variação de $\delta$ para as frequências de 1 a 10 Hz a 60 °C.....	465
Figura 7.50	– Critérios de decisão.....	450
Figura 7.51	– Desempenho à fadiga e à deformação permanente das misturas estudadas.....	451
Figura 7.52	– Configuração adoptada das lajetas para o ensaio <i>Wheel Tracking</i> .....	469
Figura 7.53	– Evolução da deformação das misturas no ensaio <i>Wheel Tracking</i> .....	470
Figura 7.54	– Velocidade de deformação $v_{45/60}$ e ponto de amolecimento .....	471
Figura 7.55	– Velocidade de deformação $v_{60/120}$ e ponto de amolecimento .....	471
Figura 7.56	– Velocidade de deformação $v_{105/120}$ e ponto de amolecimento.....	472
Figura 7.57	– Comparação visual entre a adesividade dos betumes ao agregado.....	473
Figura 7.58	– Resultados dos ensaios de mancha de areia das misturas da Fase 4.....	474
Figura 7.59	– Microtextura das misturas da Fase 4.....	475
Figura 7.60	– Curvas de referência das misturas da Fase 4.....	476
Figura 7.61	– Comparativo entre as curvas de referência das misturas .....	477
Figura 7.62	– Simbologia adoptada no método DNER/81.....	483
Figura 7.63	– Estrutura dimensionada pelo método DNER/81 para $N = 10^7$ .....	484
Figura 7.64	– Estrutura dimensionada pelo método DNER/81 para $N = 10^8$ .....	485
Figura 7.65	– Parâmetros avaliados na análise empírico-mecanicista .....	485
Figura 7.66	– Evolução de $N$ em função da espessura da camada betuminosa.....	488
Figura 7.67	– $N$ em função da espessura da camada betuminosa, para cada tipo de mistura.....	488
Figura 7.68	– Deformação ( $\epsilon_i$ ) em função da espessura ( $e$ ) .....	489
Figura 8.1	– Modelo do pavimento para estudo da propagação de fendas (Minhoto, 2007).....	501
Figura 8.2	– Variação do módulo dinâmico com a temperatura para as misturas estudadas .....	504
Figura 8.3	– Ajuste da lei de fadiga para a mistura IBB151 .....	507
Figura 8.4	– Ajuste da lei de fadiga para a mistura IBCbB.....	507
Figura 8.5	– Ajuste da lei de fadiga para a mistura CBB201 .....	507
Figura 8.6	– Ajuste da lei de fadiga para a mistura CBCbP.....	508
Figura 8.7	– Ajuste da lei de fadiga para a mistura BBB .....	508

Figura 8.8	– Dano anual do reforço (12,0 cm) do pavimento com as misturas em estudo .....	512
Figura 8.9	– Vida do reforço (12,0 cm) do pavimento .....	512
Figura 8.10	– Simulação da zona da camada de reforço submetida ao fendilhamento (adaptado de Sousa <i>et al.</i> , 1996).....	515
Figura 8.11	– Dispositivo de fendilhamento desenvolvido por Sousa <i>et al.</i> (1996).....	515
Figura 8.12	– Provete montado com abertura da fenda .....	516
Figura 8.13	– Dispositivo de reflexão de fendas montado com provete.....	516
Figura 8.14	– Equipamento servo-hidráulico para ensaios de propagação de fendas.....	517
Figura 8.15	– Exemplo de uma fenda produzida no provete após ensaio (vista lateral) ....	518
Figura 8.16	– Exemplo de uma fenda produzida no provete após ensaio (vista lateral) ....	519
Figura 8.17	– Exemplo de uma fenda produzida no provete após ensaio (vista superior) .....	519
Figura 8.18	– Abertura da fenda em função do número de ciclos de carga nos ensaios RCD.....	520
Figura 8.19	– Malha de elementos finitos (deformada).....	522
Figura 8.20	– Campo de deslocamento horizontal (esquerda) e vertical (direita).....	522
Figura 8.21	– Extensão horizontal (esquerda) e extensão vertical (direita).....	522
Figura 8.22	– Distorção (esquerda) e extensão de Von Mises (direita).....	523
Figura 8.23	– Tensão vertical (esquerda) e de corte horizontal-vertical (direita).....	523
Figura 8.24	– Tensão de Von Mises .....	523
Figura 8.25	– Rectas de fadiga à propagação de fendas .....	525
Figura 8.26	– Previsão da vida do reforço ao longo do ano (Minhoto <i>et al.</i> , 2008) .....	526



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Classificação das degradações (adaptado do DNIT, 2006).....	31
Quadro 3.1 – Propriedades dos agregados que afectam as misturas betuminosas .....	49
Quadro 3.2 – Valores típicos de desgaste Los Angeles de acordo como tipo de rocha (WSDOT, 2005).....	51
Quadro 3.3 – Granulometria do filer (DNER – EM 367, 1997).....	55
Quadro 3.4 – Granulometria do filer (ASTM D 242, 1995) .....	56
Quadro 3.5 – Especificações para o grau de penetração de 20x0,1 mm a 330x0,1 mm .....	59
Quadro 3.6 – Especificações para o grau de penetração de 250x0,1 mm a 900x0,1 mm ....	59
Quadro 3.7 – Especificações para betumes moles.....	60
Quadro 3.8 – Classificação SUPERPAVE para betumes.....	61
Quadro 3.9 – Especificação SUPERPAVE para betumes (parte) .....	65
Quadro 3.10 – Classificação por penetração (100 g; 5 s; 25 °C).....	66
Quadro 3.11 – Classificação por viscosidade a 60 °C .....	66
Quadro 3.12 – Especificação do CAP – classificação por penetração (DNIT – EM 095, 2006).....	67
Quadro 3.13 – Tipos de betumes de pavimentação (LNEC, 1997).....	69
Quadro 3.14 – Métodos de ensaio de betumes (Branco <i>et al.</i> , 2005).....	70
Quadro 3.15 – Abreviaturas adoptadas na Figura 3.11 .....	82
Quadro 3.16 – Variáveis que afectam as propriedades das misturas betuminosas (adaptado de AI, 1989; Roberts <i>et al.</i> , 1996).....	83
Quadro 3.17 – Categorias de métodos de formulação e critérios (Lumiari & Fidato, 1998) .....	84
Quadro 3.18 – Métodos de formulação e respectivas categorias (Lumiari & Fidato, 1998) .....	85
Quadro 3.19 – Tipos de ensaios de módulo (adaptado de Di Benedetto & De La Roche, 1998; Di Benedetto <i>et al.</i> , 2001) .....	104
Quadro 3.20 – Diferenças entre os dois modos de carregamento (Rao Tangella <i>et al.</i> , 1990) .....	114
Quadro 3.21 – Influência da composição das misturas no comportamento à fadiga .....	115

Quadro 3.22 – Factores que afectam a resistência à deformação permanente de misturas betuminosa (Sousa <i>et al.</i> , 1991) .....	128
Quadro 3.23 – Dimensões dos provetes (AASHTO TP7-01).....	136
Quadro 3.24 – Variáveis associadas às propriedades dos pavimentos .....	155
Quadro 3.25 – Coeficientes estatísticos associados ao modelo de $\epsilon_{VM}$ .....	155
Quadro 4.1 – Composição química de um pneu (Adrietta, 2002) .....	188
Quadro 4.2 – Comparação entre materiais contidos nos pneus .....	188
Quadro 4.3 – Espessura da película de betume (RPA, 2006) .....	212
Quadro 4.4 – Resumo das características do betume-borracha .....	213
Quadro 4.5 – Velocidades de deformação (adaptado de Antunes <i>et al.</i> , 2000).....	245
Quadro 4.6 – Velocidades de deformação (adaptado de Antunes <i>et al.</i> , 2000).....	245
Quadro 4.7 – Espessuras de equivalência estrutural (mm) .....	257
Quadro 4.8 – Resultados dos ensaios com o HVS.....	257
Quadro 5.1 – Caracterização dos agregados .....	283
Quadro 5.2 – Distribuição granulométrica do filer .....	283
Quadro 5.3 – Distribuição granulométrica dos agregados.....	284
Quadro 5.4 – Especificações da borracha de pneus (ASTM 6114, 1997) .....	285
Quadro 5.5 – Especificação granulométrica ADOT, <i>Rubber Type B</i> .....	285
Quadro 5.6 – Características da borracha ambiente.....	286
Quadro 5.7 – Ensaios e normas para betumes .....	287
Quadro 5.8 – Características do BB (CAP-20).....	290
Quadro 5.9 – Comparação entre o CAP-20 e a especificação do CAP 50/70 .....	290
Quadro 5.10 – Características do betume-borracha (ASTM D 6114, 1997) .....	293
Quadro 5.11 – Características do BB20.....	294
Quadro 5.12 – Características do BB15.....	295
Quadro 5.13 – Efeito da adição do filer na rigidificação do betume .....	297
Quadro 5.14 – Especificação e granulometria da curva DNIT Faixa “C” utilizada .....	298
Quadro 5.15 – Especificação e granulometria da curva AI, tipo IV utilizada .....	299
Quadro 5.16 – Especificação e granulometria da curva Caltrans ARHM-GG utilizada .....	300
Quadro 5.17 – Especificação e granulometria da curva ADOT AR-AC utilizada .....	301
Quadro 6.1 – Características do betume BBbB (17% de borracha, 90 minutos, 180 °C)....	323
Quadro 6.2 – Parâmetros especificados para as misturas betuminosas .....	326
Quadro 6.3 – Composição das misturas com betume-borracha.....	326
Quadro 6.4 – Resultados da formulação das misturas <i>terminal blend</i> .....	327

Quadro 6.5	– Resultados da formulação das misturas <i>continuous blend</i> .....	328
Quadro 6.6	– Composição granulométrica da mistura convencional .....	328
Quadro 6.7	– Resultados da formulação das misturas .....	330
Quadro 6.8	– Módulo dinâmico e ângulo de fase (10 Hz; 20 °C) .....	339
Quadro 6.9	– Parâmetros experimentais obtidos para as leis de fadiga .....	351
Quadro 6.10	– Características do betume BG (PEN 50/70) .....	359
Quadro 6.11	– Características do betume BC (PEN 35/50) .....	360
Quadro 6.12	– Características da borracha criogénica .....	361
Quadro 6.13	– Características dos betumes .....	362
Quadro 6.14	– Valores do índice de susceptibilidade térmica dos betumes-borracha .....	375
Quadro 6.15	– Características dos betumes-borracha após o envelhecimento .....	376
Quadro 6.16	– Parâmetros experimentais obtidos para as leis de fadiga das misturas Caltrans .....	395
Quadro 6.17	– Percentagem de betume óptima e volume de vazios .....	403
Quadro 6.18	– Avaliação da macrotextura (DNIT, 2006) .....	412
Quadro 6.19	– Classificação da microtextura com o pêndulo britânico (DNIT, 2006) .....	415
Quadro 6.20	– Faixas limites dos valores do IFI (F60), (Aps, 2006) .....	419
Quadro 6.21	– Valores do IFI .....	419
Quadro 7.1	– Percentagem de betume das misturas com betume <i>terminal blend</i> .....	431
Quadro 7.2	– Percentagem de betume das misturas com betume <i>continuous blend</i> .....	433
Quadro 7.3	– Módulo dinâmico e ângulo de fase (10 Hz, 20 °C) .....	436
Quadro 7.4	– Parâmetros obtidos para as leis de fadiga .....	443
Quadro 7.5	– Módulo dinâmico, ângulo de fase e módulo dissipativo das misturas da Fase 3 (frequência de 10 Hz e temperatura de 20 °C) .....	449
Quadro 7.6	– Módulo dinâmico, ângulo de fase e módulo dissipativo das misturas da Fase 4 (frequência de 10 Hz e temperatura de 20 °C) .....	449
Quadro 7.7	– Módulo de corte, ângulo de fase e $G^*/\text{sen}\delta$ das misturas da Fase 3 (frequência de 10 Hz e temperatura de 60 °C) .....	458
Quadro 7.8	– Módulo de corte, ângulo de fase e $G^*/\text{sen}\delta$ das misturas da Fase 4 (frequência de 10 Hz e temperatura de 60 °C) .....	458
Quadro 7.9	– Velocidades de deformação de $v_{45/60}$ , $v_{60/120}$ e $v_{105/120}$ (mm/minuto) .....	471
Quadro 7.10	– Valores do IFI das misturas da Fase 4 .....	475
Quadro 7.11	– Espessura mínima do revestimento .....	483
Quadro 7.12	– Estruturas avaliadas .....	487

Quadro 7.13 – Módulos dinâmicos das misturas .....	487
Quadro 7.14 – Resultados obtidos de N em função da deformação ( $\epsilon_t$ ) e da espessura .....	487
Quadro 7.15 – Valores de espessuras recomendados pelo Caltrans (1992) e a proposição apresentada, considerando a redução da espessura da camada de desgaste .....	492
Quadro 7.16 – Análise de custo da solução proposta .....	494
Quadro 8.1 – Propriedades da mistura betuminosa da camada fendilhada.....	502
Quadro 8.2 – Propriedades da camada granular e do solo de fundação.....	502
Quadro 8.3 – Parâmetros das leis de variação do módulo dinâmico .....	503
Quadro 8.4 – Módulo dinâmico a diferentes temperaturas .....	503
Quadro 8.5 – Propriedades viscoelásticas das misturas – parâmetros de Prony.....	505
Quadro 8.6 – Coeficientes de retração térmica das misturas betuminosas .....	505
Quadro 8.7 – Parâmetros das leis de fadiga de acordo com a Equação 8.6.....	506
Quadro 8.8 – Tráfego anual utilizado para determinação do dano do reforço.....	509
Quadro 8.9 – Condições de temperatura simuladas na análise numérica da propagação de fendas .....	510
Quadro 8.10 – Danos mensais para as misturas em estudo .....	511
Quadro 8.11 – Parâmetros do modelo do dano mensal (Equação 8.8).....	511
Quadro 8.12 – Dano mensal do reforço do pavimento .....	511
Quadro 8.13 – Vida do reforço (12,0 cm) do pavimento.....	512
Quadro 8.14 – Resultados dos ensaios de propagação de fendas .....	521
Quadro 8.15 – Extensões de Von Mises ( $\epsilon_{vm}$ ) .....	524
Quadro 8.16 – Coeficientes da lei de fadiga em propagação de fendas.....	525
Quadro 8.17 – Temperaturas mensais representativas do Sul do Brasil.....	527
Quadro 8.18 – Extensões de Von Mises e vida do reforço.....	528
Quadro 8.19 – Vida relativa das misturas .....	528

## GLOSSÁRIO DE SÍMBOLOS E DE ABREVIATURAS

### Abreviaturas

AASHTO	– <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABBbB	– Mistura ADOT com betume brasileiro e borracha brasileira
ABBbB1	– Mistura ADOT com betume brasileiro e borracha brasileira mais 1% de betume em relação à percentagem óptima
ABB20	– Mistura ADOT com betume tipo <i>terminal blend</i> com 20% de borracha
ABB201	– Mistura ADOT com betume tipo <i>terminal blend</i> com 20% de borracha mais 1% de betume em relação à percentagem óptima
ABPv	– Associação Brasileira de Pavimentação
ADOT	– <i>Arizona Department of Transportation</i>
ADs	– Asfaltos diluídos ou betumes fluidificados
AFNOR	– <i>Association Française de Normalisation</i>
AI	– <i>Asphalt Institute</i>
ALF	– <i>Accelerated Loading Facility</i>
APA	– <i>Asphalt Pavement Analyzer</i>
Aporbet	– Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas (Portugal)
AR-AC	– <i>Asphalt Rubber Asphalt Concrete</i>
ARHM-GG	– <i>Asphalt Rubber Hot Mix – Gap Graded</i>
ASFOR	– Asfaltos Fortaleza
ASTM	– <i>American Society for Testing and Materials</i>
BB	– Betume Brasileiro convencional CAP 50/70
BC	– Betume português convencional PEN 35/50
BG	– Betume português convencional PEN 50/70
bB	– Borracha Brasileira do tipo ambiente
bP	– Borracha Portuguesa do tipo criogénica
BBB	– Mistura convencional com betume CAP 50/70 e granulometria DNIT Faixa “C”
BB15	– Betume Brasileiro tipo <i>terminal blend</i> com 15% de borracha
BB20	– Betume Brasileiro tipo <i>terminal blend</i> com 20% de borracha

BBbB	– Betume Brasileiro com borracha Brasileira
BC	– Betume português PEN 35/50
BG	– Betume português PEN 50/70
BBR	– <i>Bending Beam Rheometer</i>
BD	– Betão betuminoso em camada de desgaste
BG	– Base granular
BS	– <i>British Standards</i> (especificações do Reino Unido)
BPN	– <i>British Pendulum Number</i>
Caltrans	– <i>California Department of Transportation</i>
CAP	– Cimento Asfáltico do Petróleo
CAUQ	– Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CBBbB	– Mistura Caltrans com betume brasileiro e borracha brasileira
CBBbB1	– Mistura Caltrans com betume brasileiro e borracha brasileira mais 1% de betume em relação à percentagem óptima
CBB20	– Mistura Caltrans com betume tipo <i>terminal blend</i> com 20% de borracha
CBB201	– Mistura Caltrans com betume tipo <i>terminal blend</i> com 20% de borracha mais 1% de betume em relação à percentagem óptima
CBBbP	– Mistura Caltrans com betume brasileiro e borracha portuguesa
CBCbB	– Mistura Caltrans com betume português PEN 35/50 e borracha brasileira
CBCbP	– Mistura Caltrans com betume português PEN 35/50 e borracha portuguesa
CBGbB	– Mistura Caltrans com betume português PEN 50/70 e borracha brasileira
CBGbP	– Mistura Caltrans com betume português PEN 50/70 e borracha portuguesa
CBR	– <i>California Bearing Ratio</i> (Índice de Suporte Califórnia)
CBUQ	– Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CENPES	– Centro de Pesquisas da Petrobrás
CGS	Sistema Centímetro-Grama-Segundo
CNT	– Confederação Nacional do Transporte
CONAMA	– Conselho Nacional do Meio Ambiente
CRM	– <i>Crumb Rubber Modifier</i>
DGAC	– <i>Dense Graded Asphalt Concrete</i>
DNER	– Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	– Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
DSR	– <i>Dynamic Shear Rheometer</i>
DTT	– <i>Direct Tension Test</i>

EM	– Especificação de material
EN	– Especificação Nacional
ES	– Especificação de serviço
EVA	– <i>Ethylene Vinyl Acetate</i>
FHWA	– <i>Federal Highway Administration</i>
FWD	– <i>Falling Weight Deflectometer</i>
HVS	– <i>Heavy Vehicle Simulator</i>
IBBbB	– Mistura AI com betume brasileiro e borracha brasileira
IBBbB1	– Mistura AI com betume brasileiro e borracha brasileira mais 1% de betume em relação à percentagem óptima
IBB15	– Mistura AI com betume tipo <i>terminal blend</i> com 20% de borracha
IBB151	– Mistura AI com betume tipo <i>terminal blend</i> com 20% de borracha mais 1% de betume em relação à percentagem óptima
IBCbB	– Mistura AI com betume português PEN 35/50 e borracha brasileira
IBCbP	– Mistura AI com betume português PEN 35/50 e borracha portuguesa
IBP	– Instituto Brasileiro do Petróleo
JAE	– Junta Autónoma de Estradas (Portugal)
LNEC	– Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal)
LPC	– <i>Laboratoire des Ponts et Chaussées</i>
LCPC	– <i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LVDT	– <i>Linear Variable Transducer</i>
MACOPAV	– Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Portuguesa
MB	– Macadame betuminoso em camada de base
MDB	– Mistura betuminosa densa em camada de regularização
ME	– Método de ensaio
MEF	– Método de Elementos Finitos
MEV	– Microscópio Electrónico de Varrimento
NAT	– <i>Nottingham Asphalt Test</i>
NLA	– <i>National Lime Association</i>
NLT	– <i>Normas del Laboratorio de Transporte</i>
NF	– Norma Francesa
NP	– Norma Portuguesa
PAV	– <i>Pressure Aging Vessel</i>

PIARC	– <i>Permanent International Association of Road Congress (World Road Association)</i>
PCG	– Prensa de corte giratório
PRO	– Procedimento
RCD	– <i>Reflective Cracking Device</i>
RILEM	– <i>Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Construction</i>
RLAM	– Refinaria Landulpho Alves
RTFOT	– <i>Rolling Thin-Film Oven Test</i>
RRT	– Resistência residual à tracção
RUMAC	– <i>Rubber-Modified Asphalt Concrete</i>
RSST-CH	– <i>Repeated Simple Shear Test at Constant Height</i>
SAM	– <i>Stress Absorving Membrane</i>
SAMI	– <i>Stress Absorving Membrane Interlayer</i>
SBR	– <i>Styrene Butadiene Rubber</i>
SBS	– <i>Styrene Butadiene Copolymer</i>
SHRP	– <i>Strategic Highway Research Program</i>
SI	– Sistema Internacional
SGC	– Compactador giratório SUPERPAVE
SUPERPAVE	– <i>Superior Performing Asphalt Pavement</i>
TER	– Terminologia Rodoviária
TFOT	– <i>Thin Film Oven Test</i>
<i>Tout-venant</i>	– Material britado sem recomposição ou com recomposição em central
TRRL	– <i>Transport and Road Research Laboratory</i>
USA	– <i>United States of America (Estados Unidos)</i>
USACE	– <i>United States Army Corps of Engineers</i>
WSDOT	– <i>Washington State Department of Transportation</i>
WT	– <i>Wheel Tracking</i>

**Símbolos**

a, A	– Constante ou coeficiente experimental
-a	– Inclinação da recta
af	– Abertura da fenda
A	– Parâmetro de regressão
$A_i$	– Acção tráfego
ATR	– Afundamento de trilha de roda
b	– Constante ou coeficiente experimental
B	– Parâmetro de regressão
B	– Espessura de base
BA	– Baridade aparente
BMT	– Baridade máxima teórica
BPN	– <i>British Pendulum Number</i>
c	– Comprimento da fenda
c, C	– Constante ou coeficiente experimental
$C_1$ e $C_2$	– Constantes
$CBR_{SF}$	– Índice de Suporte Califórnia do solo de fundação
d e D	– Malhas de abertura de peneiros
$d_{eq}$	– Diâmetro equivalente
D	– Deslocamento
D	– Diâmetro médio da mancha de areia
DC	– Crescimento do comprimento da fenda
DN	– Ciclo de carga
e	– Espessura do provete
e	– Número neperiano
E	– Módulo de rigidez
E	– Módulo dinâmico
$E^*$	– Módulo complexo ou módulo complexo de rigidez
$ E^* $	– Valor absoluto do módulo complexo, também denominado de módulo dinâmico
$E_\infty$	– Módulo puramente elástico
$E_1$	– Componente real do módulo complexo
$E_2$	– Componente imaginária do módulo complexo

EA	– Equivalente de areia
EAs	– Emulsões betuminosas (asfálticas)
$E_{mist}$	– Módulo de deformabilidade
ESAL	– <i>Equivalent Simple Axle Loads</i>
F	– Força
F60	– Atrito a 60 km/h
FC	– Factor de carga
FC-1	– Trincas com abertura superior à das fissuras e menores que 1,0 mm
FC-2	– Trincas com abertura superior a 1,0 mm e sem erosão nos bordos
FC-3	– Trincas com abertura superior a 1,0 mm e com erosão nos bordos
$F_r$	– Frequência
FR	– Factor climático regional
FR60	– Valor do atrito FRS à velocidade de 60 km/h
FRS	– Medida do atrito (microtextura)
FV	– Factor de veículos
G	– Módulo de relaxação por corte
G'	– Módulo de armazenamento
G''	– Módulo dissipativo ou de perda
G*	– Módulo de corte complexo
$G_i$	– Geometria da estrutura
$G_i$	– Módulo de corte elástico, associado às componentes i da série de Prony
$G_\infty$	– Módulo de corte, associado um carregamento de duração infinita
$h_n$	– Espessura de camada do pavimento com CBR = n
H	– Profundidade da camada
H	– Altura média da areia
$H_m$	– Espessura total de pavimento necessário para proteger um material com CBR = m
$H_t$	– Espessura total do pavimento necessária para proteger o solo de fundação
$H_{20}$	– Espessura de pavimento sobre a sub-base
IFI	– <i>International Friction Index</i> (Índice de Atrito Internacional)
IS	– Índice de susceptibilidade térmica
k	– Factor de intensidade de tensão
K	– Extensão para a vida de fadiga de 1 milhão de ciclos
K	– Módulo de relaxação volumétrico

$K_i$	– Módulo volumétrico elástico, associado às componentes $i$ da série de Prony
$K_\infty$	– Módulo volumétrico, associado um carregamento de duração infinita
$k_{TR}$	– Factor de intensidade de tensão
$K_{TR}$	– Potencial de fendilhamento do pavimento
$K_1, K_2$	– Constantes experimentais
$L$	– Comprimento da amostra
LAT	– Latitude
$L_e$	– Comprimento efectivo
$M$	– Variação em massa
$m$	– Módulo de relaxação ( <i>creep rate</i> )
$m$	– Constante experimental
$M_a$	– Massa do material agregado
$M_b$	– Massa de betume
$M_{final}$	– Massa do betume final
$M_{inicial}$	– Massa do betume inicial
$M_v$	– Massa de vazios (ar)
MR	– Módulo resiliente
$n$	– Expoente de ajuste da curva de Fuller
$n$	– Constante de regressão
$n_i$	– Número de aplicações de tensão $\sigma_i$ ou extensão $\varepsilon_i$
$N$	– Vida de fadiga, representada pelo número de ciclos
$N$	– Número de ciclos de carga
$N$	– Número de repetições do eixo simples padrão de 80 kN
$N$	– Vida previsível de reforço
NAEP	– Número acumulado de eixo padrão
$N_i$	– Número de aplicações até à ruína de tensão $\sigma_i$ ou extensão $\varepsilon_i$
$N_f$	– Resistência à fadiga, representada pelo número de ciclos
$p$	– Percentagem de material que passa
$P$	– Carga do rodado ou carregamento
PA	– Ponto de amolecimento
PEN	– Penetração
$PEN_{final}$	– Penetração final
$PEN_{inicial}$	– Penetração inicial

$PEN_{retida}$	– Penetração retida
PG	– <i>Performance Grade</i>
PI	– Índice de penetração
$P_i$	– Propriedades dos materiais constituintes
$P_{i+1}$	– Novas propriedades dos materiais constituintes
q	– Pressão
R	– Constante universal dos gases
R	– Espessura de revestimento
RBV	– Relação betume vazios
$R_{fb}$	– Relação ponderal filer/betume
RRT	– Resistência residual à tracção
$RT_1$	– Resistência à tracção não condicionada
$RT_2$	– Resistência à tracção condicionada
S	– Rigidez
S	– Amplitude do carregamento aplicado
$S_0$	– Rigidez inicial
SbG	– Sub-base granular
$S_i$	– Esforços
$S_{i+1}$	– Novos esforços
$S_p$	– Constante de velocidade
$S(t)$	– Módulo secante
t	– Tempo
t	– Período de projecto
T	– Temperatura dos materiais
$T_{ar}$	– Temperatura do ar
TD	– Tempo de digestão
$T_R$	– Temperatura de referência
$T_{máx}$	– Temperatura máxima do pavimento medida em 7 dias consecutivos
$T_{mín}$	– Temperatura mínima do pavimento
Tx	– Macrotextura
$V_{45/60}$	– Velocidade de deformação entre 45 e 60 minutos
$V_{60/120}$	– Velocidade de deformação entre 60 e 120 minutos
$V_{105/120}$	– Velocidade de deformação entre 105 e 120 minutos
V	– Volume de areia padrão

VAM	– Volume de vazios no agregado mineral
V <sub>v</sub>	– Volume de vazios
VMD	– Volume médio diário de veículos que passa na faixa da via mais solicitada
X	– Factor de translação
z	– Constante ou coeficiente experimental
w	– Água nas camadas granulares e fundação
w <sub>i</sub>	– Energia dissipada no ciclo i
W <sub>c</sub>	– Energia (ou trabalho) dissipada por ciclo de carregamento
W <sub>N</sub>	– Energia dissipada acumulada até a fadiga
α <sub>T</sub>	– Factor de escala
ΔH	– Mudança do diâmetro do provete em relação ao eixo x
ΔL	– Variação do comprimento correspondente ao carregamento máximo
ΔV	– Mudança do diâmetro do provete em relação ao eixo y
Δt	– Intervalo de tempo
ΔT	– Amplitude diária de temperatura do ar
δ	– Ângulo de fase
δ <sub>máx</sub>	– Ângulo de fase máximo
δ <sub>v</sub>	– Deflexão vertical
δH	– Energia de activação aparente
ε	– Deformação e deformação de corte resultante
ε <sub>i</sub>	– Amplitude da extensão no ciclo i
ε <sub>max</sub>	– Deformação de corte máxima resultante
ε(t)	– Extensão no tempo t
ε <sub>t</sub>	– Deformação de tracção
ε <sub>VM</sub>	– Extensão de Von Mises
φ	– Ângulo de fase ou de defasagem
φ <sub>i</sub>	– Ângulo de fase entre tensão e extensão no ciclo i
γ	– Factor forma
γ <sub>p</sub>	– Deformação de corte
δ <sub>rodeiras</sub>	– Espessura das rodeiras
ε <sub>1</sub> , ε <sub>2</sub> , ε <sub>3</sub>	– Extensões principais
η <sub>a</sub>	– Viscosidade em uma dada condição de envelhecimento

$\eta_0$	– Viscosidade inicial do ligante
$\eta_r$	– Viscosidade do betume recuperado
$\nu$	– Coeficiente de Poisson
$\nu^*$	– Coeficiente de Poisson (número complexo)
$\mu$	– Factor massa
$\sigma$	– Tensão
$\sigma_{\square 0}$	– Tensão controlada e tensão de corte aplicada
$\sigma_i$	– Amplitude da tensão no ciclo i
$\sigma_{\max}$	– Tensão de corte máxima aplicada
$\sigma_t$	– Tensão de tracção
$\sigma(t)$	– Tensão no tempo t
$\sigma_z$	– Tensão de compressão
$\pi$	– Número pi (3,1416)
$\tau$	– Força tangencial na superfície do pavimento
$\tau_i^G, \tau_i^K$	– Tempos de relaxação para cada componente da série de Prony
$\omega$	– Velocidade angular

## **Capítulo 1**

# **INTRODUÇÃO**

### **1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

O Brasil é um país em franco crescimento económico e, considerando as suas peculiaridades geográficas, possui seu sistema de transportes essencialmente rodoviário, o que necessita manter sua malha rodoviária conservada e ampliada. O betume tem sido o principal ligante utilizado na construção de estradas e vias urbanas no Brasil, sendo que os pavimentos flexíveis representam 95% da rede nacional pavimentada.

A pesquisa conduzida pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) em 2007, com o objectivo de analisar as condições das rodovias brasileiras pavimentadas em relação aos aspectos de conservação, segurança e conforto dos usuários, que engloba quesitos como sinalização, geometria da via e pavimento, revelou que 73,9% das rodovias em relação ao total da extensão avaliada (87592 km), encontra-se em estado de regular a péssimo. Relativamente ao estado do pavimento, 54,5% apresenta-se em estado de regular a péssimo.

Considerando a grande demanda de tráfego e a idade avançada dos pavimentos brasileiros é possível prever o processo de deterioração das rodovias que necessitam maiores investimentos em restauração para recuperação da malha. As patologias que ocorrem com maior frequência na malha rodoviária brasileira são o fendilhamento (ou trincamento) por fadiga e por propagação e as trilhas de roda (ou afundamentos).

Uma das alternativas mais utilizadas no Brasil para reabilitação dos revestimentos deteriorados é a colocação de misturas convencionais sobre o revestimento a ser reabilitado. No entanto, pouco tempo após a reabilitação têm-se verificado a degradação prematura dos revestimentos. Assim, o desenvolvimento de pesquisas de novas misturas e de métodos eficientes de dimensionamento torna-se absolutamente necessária face à realidade do Brasil. Neste contexto, este projecto de investigação contempla o estudo de misturas betuminosas com betume modificado com borracha de pneus insersíveis (betume-borracha) para avaliar a sua capacidade de desempenho em relação a uma mistura convencional.

A humanidade, há mais de um século, tem usufruído dos pneus de borracha que permitem a trafegabilidade dos veículos. Contudo, ao longo do tempo, os veículos foram produzidos em escalas cada vez maiores e como consequência também cresceu a indústria de pneus e o problema do destino final dos pneus usados. Um dos principais problemas da deposição inadequada dos pneus insersíveis se deve ao facto de que, quando incinerados a céu aberto, podem contaminar o meio ambiente emitindo fumos contendo óxido de carbono, enxofre, e outros poluentes. Os pneus usados, quando depositados na natureza, contribuem para a proliferação de mosquitos e doenças.

Os pneus usados constituem um grande recurso como um material de uso secundário e podem ser processados em fragmentos para posteriormente ser utilizados por diferentes indústrias, como por exemplo, o emprego em misturas betuminosas e em bases de recintos desportivos. Nas misturas betuminosas, a borracha pode ser incorporada à mistura betuminosa através de dois métodos diferentes: o processo seco (*dry process*) e o húmido (*wet process*). No processo húmido, a borracha dos pneus é utilizada como um modificador do betume e no processo seco a borracha moída é usada como uma parcela do agregado fino. No processo húmido a incorporação da borracha ao betume pode ser feita através de dois sistemas: o *continuous blend* (mistura do betume e da borracha em tanques especiais na própria central) e o *terminal blend* (mistura do betume e da borracha realizado em unidades industriais).

A incorporação de borracha de pneus insersíveis em misturas betuminosas tem sido empregue há muitos anos em países como Estados Unidos e Portugal. No Brasil, contudo, o uso de novos materiais e de novas tecnologias ainda carece do estudo do comportamento mecânico para prever o desempenho deste tipo de mistura como camadas de revestimentos.

A literatura internacional referente às misturas betuminosas produzidas com betume-borracha tem mostrado que estas apresentam um bom desempenho mecânico devido à maior resistência à fadiga, elevada resistência à deformação permanente e boa capacidade de retardar a propagação de fendas em comparação às misturas convencionais.

Este trabalho de investigação visa otimizar o desempenho de misturas betuminosas com betume-borracha adequado à realidade brasileira (clima e tráfego) através do uso de materiais brasileiros (borracha moída e betume).

Para tal, foi aplicada uma metodologia de ensaios de desempenho em laboratório (fadiga, deformação permanente e propagação de fendas) e uma simulação numérica com elementos finitos para avaliar a propagação de fendas existente em camadas de revestimentos fendilhados. Foram avaliadas misturas betuminosas com betume-borracha produzidas através do processo húmido nos dois sistemas, *terminal blend* e *continuous blend*. Os resultados das misturas com betume-borracha foram comparados com a mistura convencional produzida com betume convencional, tomada como mistura de referência.

Dentre as misturas estudadas, em uma fase preliminar, foram selecionadas quatro misturas com betume-borracha que obtiveram melhor desempenho mecânico em laboratório e a mistura de referência. A avaliação das misturas consistiu, ainda, no dimensionamento de um pavimento para diferentes níveis de carregamento para avaliar a possível redução da espessura da camada de desgaste quando do uso das misturas seleccionadas. Tem-se, como resultados, informações capazes de orientar os profissionais da engenharia rodoviária de modo a utilizar misturas com betume-borracha na reabilitação de pavimentos e, através disto, contribuir para a melhoria da infra-estrutura rodoviária do País.

## **1.2. OBJECTIVOS**

### **1.2.1. Objectivo geral**

O objectivo consistiu em estudar o comportamento mecânico de misturas betuminosas com betume-borracha através da realização em laboratório de ensaios de fadiga, deformação permanente e de propagação de fendas, de modo a obter misturas optimizadas para compará-las com uma mistura betuminosa formulada com betume convencional.

### **1.2.2. Objectivos específicos**

Neste trabalho de investigação propõe-se os seguintes objectivos específicos:

- avaliar o desempenho do betume-borracha com materiais brasileiros (betume e borracha);
- avaliar o comportamento mecânico de misturas betuminosas com betume-borracha em relação a uma mistura convencional para o clima do Brasil;

- avaliar o efeito da adopção de misturas com betume-borracha em camadas de desgaste de pavimentos novos na redução da espessura em relação às misturas convencionais;
- avaliar a capacidade de deformação das misturas com betume-borracha e sua capacidade de redução na propagação de fendas.

### 1.3. JUSTIFICATIVA

O Brasil possui grande parte de sua malha viária com revestimento betuminoso, isto porque a influência na escolha deste tipo de revestimento para rodovias de baixo a médio volume de tráfego tem sido uma boa alternativa quanto à durabilidade e resistência. No entanto, tem-se observado que uma grande extensão da malha viária, em trechos com elevado volume de tráfego, o pavimento não tem alcançado sua vida útil de projecto e precocemente ocorrem deformações permanentes e fadiga da mistura. Esta situação tem sido agravada pela falta de: (i) investimentos na manutenção das rodovias; (ii) pesquisas de novos materiais; (iii) formação e capacitação tecnológica; (iv) procedimentos tecnológicos de execução.

Neste estudo pretendeu obter-se misturas betuminosas optimizadas em relação às seguintes propriedades: deformação permanente, módulo e o comportamento à fadiga. Para tal, foram realizados estudos sobre como estas misturas se comportam em condições de temperaturas médias e elevadas, tanto no que diz respeito ao comportamento estrutural (problemas de rotura) como no comportamento funcional (segurança do usuário), com o objetivo de torná-las uma alternativa tecnicamente viável para a execução de revestimentos em rodovias de médio a elevado volume de tráfego. Considerando o emprego de betumes brasileiros, o estudo visou também avaliar o desempenho das misturas quando construídas no Brasil (região de clima subtropical, no caso do Sul do País).

Todos os ensaios de laboratório deste trabalho foram conduzidos na Universidade do Minho e na Universidade de Coimbra, em Portugal. A mais valia desta investigação reside no facto de que os materiais betuminosos (betume convencional e betume-borracha do tipo *terminal blend*), bem como a borracha de pneus são de procedência brasileira. Desta forma, foi possível avaliar, através de ensaios de laboratório, misturas produzidas com materiais brasileiros, a excepção dos agregados, de modo que os resultados obtidos fazem jus àquela realidade.

### 1.4. METODOLOGIA DA PESQUISA E ESCOPO DO TRABALHO

A base teórica deste trabalho foi conduzida a partir de uma pesquisa bibliográfica com dados da literatura internacional e brasileira, na qual foram relacionados os aspectos relevantes sobre a produção do betume-borracha e de misturas betuminosas confeccionadas com este ligante.

Com base na literatura consultada foram determinadas as principais variáveis envolvidas no processo de produção do betume-borracha e realizada a selecção dos ensaios de laboratório necessários para a investigação, como caracterização das propriedades físicas e reológicas do betume-borracha e o comportamento mecânico das misturas betuminosas produzidas com este ligante. A Figura 1.1 apresenta o esquema geral da metodologia utilizada desta investigação.

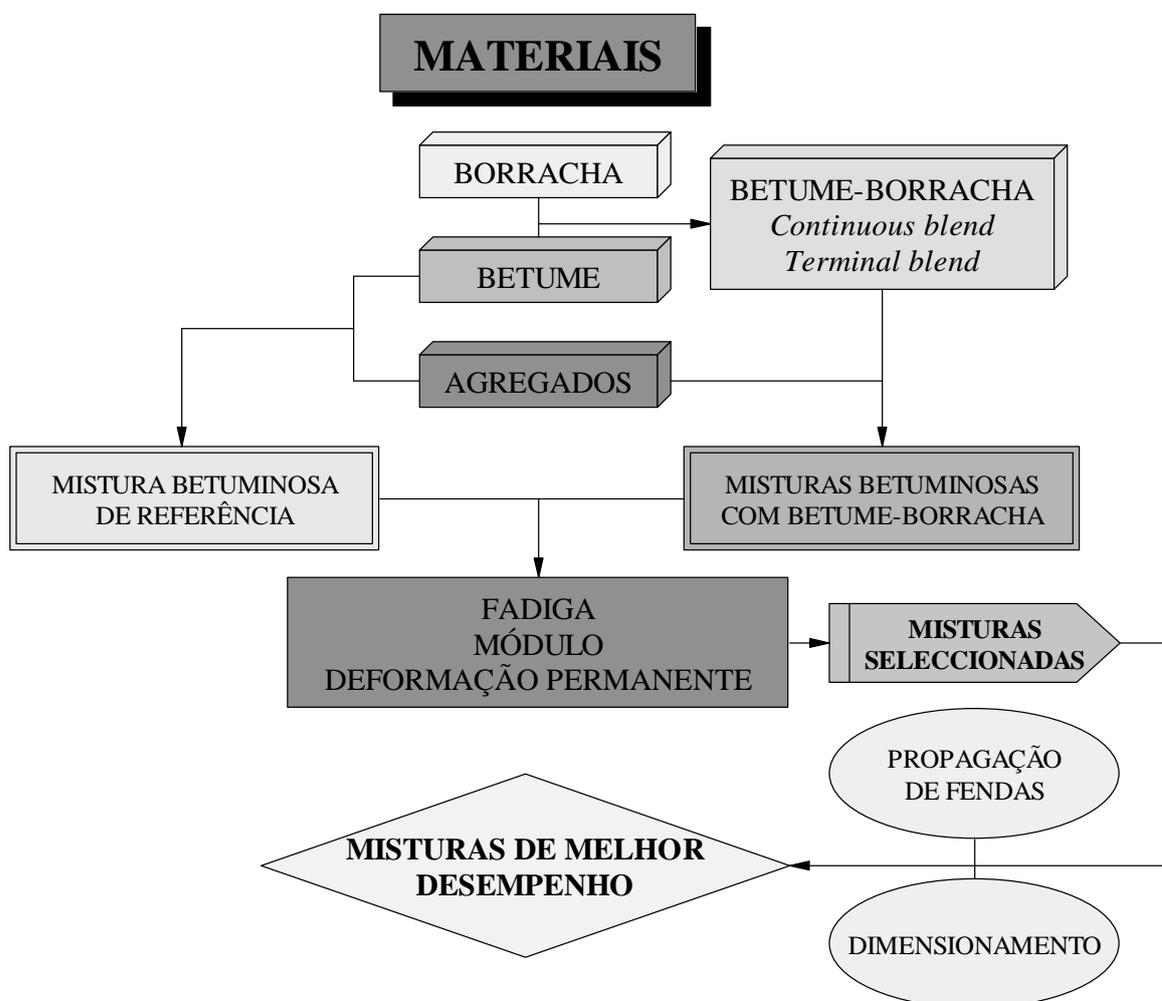


Figura 1.1 – Esquema da metodologia utilizada

O betume-borracha *continuous blend* foi produzido em laboratório com materiais brasileiros e o *terminal blend*, também de procedência brasileira, foi produzido em uma unidade industrial.

Os ligantes *terminal blend* foram produzidos com duas percentagens de borracha, 15% e 20%, enquanto que o betume-borracha *continuous blend* foi otimizado em laboratório através de diferentes configurações. O ligante convencional e os betumes-borracha *continuous blend* e *terminal blend* foram caracterizados por meio de ensaios convencionais como, penetração, viscosidade aparente, medida pelo viscosímetro Brookfield, ponto de amolecimento, resiliência e de envelhecimento a curto prazo RTFOT (*Rolling Thin-Film Oven Test*) e também foi avaliada a reologia dos ligantes.

Os agregados graníticos utilizados, de procedência portuguesa, possuem as mesmas características dos encontrados na região de Florianópolis, Sul do Brasil. A Figura 1.2 ilustra o mapa do território brasileiro, em destaque a Região Sul e o Estado de Santa Catarina com a sua Capital, a cidade de Florianópolis (Ilha de Santa Catarina).



Figura 1.2 – Mapa do Brasil e em destaque a Região Sul e o Estado de Santa Catarina

Após a determinação das propriedades físicas e reológicas dos ligantes convencional e com borracha, foram escolhidas as granulometrias para a confecção das misturas betuminosas. Neste trabalho foram utilizadas misturas betuminosas densas de graduação contínua e descontínua. Após a dosagem, através da metodologia Marshall, fabrico, compactação e obtenção de provetes, foram realizados os ensaios mecânicos de desempenho.

O comportamento mecânico das misturas betuminosas estudadas foi avaliado através dos seguintes ensaios de laboratório: (i) módulo dinâmico; (ii) fadiga (flexão alternada em 4 pontos em extensão controlada); (iii) deformação permanente (corte simples repetido a altura constante).

Tendo em conta os resultados obtidos, foram também produzidas misturas betuminosas com betume-borracha com a utilização de materiais de procedência portuguesa, de modo a avaliar e comparar os resultados com os materiais provenientes do Brasil.

Nesta investigação foi utilizada a metodologia Marshall para obtenção da percentagem óptima de betume para misturas com betume modificado. No entanto, dados os valores obtidos para a percentagem em betume, e a percentagem em betume das misturas com betume-borracha *terminal blend* e *continuous blend*, foram produzidas misturas com mais 1% de betume. Este procedimento resultou em um melhoria significativa nos resultados dos ensaios mecânicos de desempenho das misturas.

Após a análise de todos os resultados, foram seleccionadas misturas com o melhor desempenho, misturas optimizadas, com as quais foram ainda realizados ensaios de deformação permanente com o equipamento *Wheel Tracking*, da Universidade de Coimbra.

Com as misturas optimizadas foi realizado o dimensionamento de um pavimento novo com diferentes níveis de tráfego. Para avaliar a propagação de fendas devido à reabilitação do pavimento, foram realizados ensaios de propagação de fendas e uma modelação numérica com elementos finitos.

O trabalho de investigação proposto foi realizado em convênio entre a Universidade Federal de Santa Catarina, no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, e a Universidade do Minho, Sub-Grupo disciplinar de Vias de Comunicação. Todos os ensaios

experimentais foram conduzidos no Laboratório de Vias de Comunicação da Universidade do Minho e na Universidade de Coimbra.

A apresentação deste trabalho de investigação está dividida em 9 capítulos tendo em conta alcançar os objectivos propostos.

No Capítulo 1, **Introdução**, está descrita a importância da pesquisa, os objetivos, a metodologia utilizada para o estudo dos ligantes e das misturas betuminosas com betume-borracha, e a organização do trabalho.

O Capítulo 2, **Constituição, Comportamento e Reabilitação dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis**, trata da constituição, do comportamento e das degradações estruturais e funcionais que ocorrem nos pavimentos flexíveis, abordando ainda a reabilitação dos pavimentos rodoviários flexíveis.

No Capítulo 3, **Caracterização e Comportamento de Misturas Betuminosas**, são abordados os materiais constituintes de uma mistura betuminosa, como agregados e betumes. Neste capítulo é feita uma descrição dos ensaios utilizados para caracterização dos betumes e dos agregados. São ainda avaliadas a composição e formulação das misturas betuminosas, bem como os ensaios mecânicos de desempenho, como módulo dinâmico, fadiga, deformação permanente e o comportamento e mecanismos relativos à propagação de fendas.

O Capítulo 4, **Misturas Betuminosas com Betume-Borracha**, apresenta uma revisão bibliográfica considerando os processos de fabrico da borracha granulada e do betume-borracha, as propriedades físicas e reológicas do betume-borracha e o comportamento mecânico das misturas produzidas com este ligante modificado.

O Capítulo 5, **Métodos e Materiais Utilizados na Investigação**, descreve a metodologia utilizada no trabalho de investigação. Neste capítulo são apresentados os resultados de caracterização do betume convencional, da borracha de pneus e do betume-borracha do tipo *terminal blend*. São também apresentadas as granulometrias utilizadas para confecção das misturas betuminosas.

No Capítulo 6, **Optimização do Betume-Borracha e das Misturas Betuminosas**, são apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais realizados para as diferentes configurações para obtenção de betume-borracha otimizado do tipo *continuous blend*. Também são apresentados os resultados dos ensaios de desempenho mecânico realizados para os diferentes tipos de misturas betuminosas produzidas com betume-borracha (*continuous blend* e *terminal blend*) e também de uma mistura com betume convencional. Considerando os resultados obtidos nos ensaios de desempenho, foram produzidas e avaliadas misturas betuminosas com materiais de procedência portuguesa.

O Capítulo 7, **Melhoria do Desempenho das Misturas**, avalia os resultados mecânicos das misturas produzidas com percentagens superiores de betume. Com base nos resultados obtidos de todas as misturas, foram seleccionadas quatro misturas e a mistura convencional para avaliação do desempenho em relação à deformação permanente através do ensaio com o simulador de tráfego *Wheel Tracking*. Para todas as misturas avaliadas foram determinadas as características de textura e determinado o Índice de Atrito Internacional (IFI<sup>1</sup>). O dimensionamento de um pavimento novo (tráfego médio e pesado) foi realizado de modo a avaliar o impacto na redução da espessura do revestimento com misturas com betume-borracha.

No Capítulo 8, **Resistência à Propagação de Fendas**, é apresentada a simulação numérica da propagação de fendas com as misturas seleccionadas, avaliando-se o dano causado pelo tráfego e pelo clima em um pavimento a ser reabilitado. De modo a comparar o desempenho das misturas com betume-borracha e a mistura convencional, foram realizados também ensaios de propagação de fendas simulando a aplicação dos efeitos do tráfego e das variações de temperatura a que o pavimento está sujeito.

No Capítulo 9, **Conclusão**, são apresentadas as conclusões finais do trabalho, bem como propostas para investigação futura.

---

<sup>1</sup> IFI – *International Friction Index*.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

CNT, 2007. Confederação Nacional do Transporte. Pesquisa Rodoviária 2007 – Relatório Gerencial. SEST – Serviço Social do Transporte; SENAT – Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte. Brasília – DF, Brasil.

## Capítulo 2

# CONSTITUIÇÃO, COMPORTAMENTO E REABILITAÇÃO DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS

### 2.1. INTRODUÇÃO

Os pavimentos rodoviários são constituídos por uma estrutura estratificada, destinados a proporcionar a circulação dos veículos com comodidade e segurança durante um determinado período (vida útil) sob a acção do tráfego e do clima. Por esta razão, um pavimento rodoviário deve possuir duas qualidades essenciais: (i) a qualidade funcional, que está relacionada com o conforto e a segurança de circulação (exigências do utente); (ii) a qualidade estrutural que se traduz pela capacidade do pavimento em suportar as cargas dos veículos sem exceder a capacidade de suporte da estrutura, que levaria a seu colapso, afectando o seu desempenho funcional.

Este sistema estratificado é constituído por camadas de espessura finita, apoiadas em uma fundação formada pelo terreno natural (maciço semi-indefinido). A Figura 2.1 apresenta esquematicamente a constituição de um pavimento rodoviário, com a representação das principais acções, solicitações e respectiva resposta.

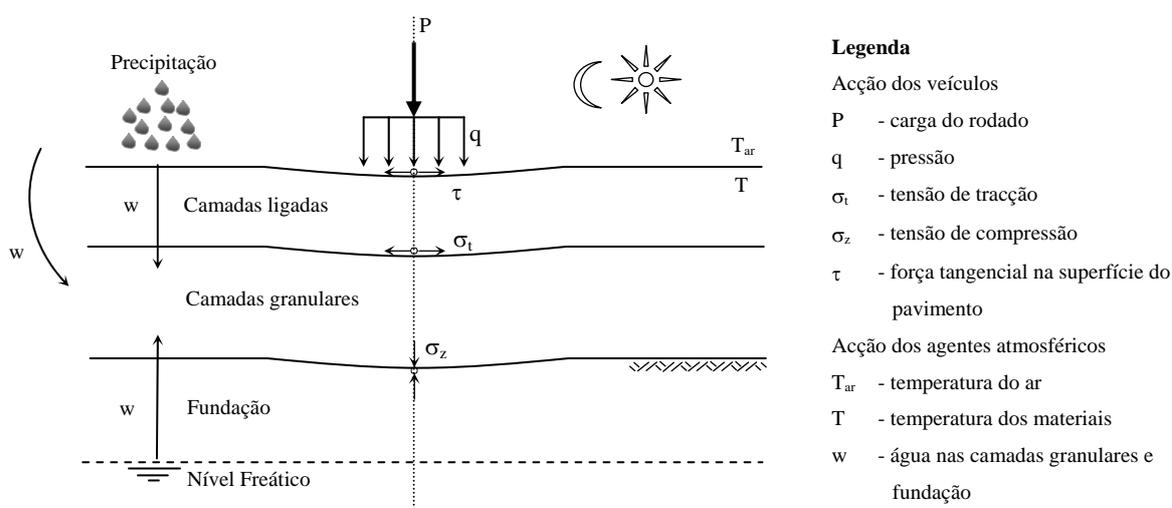


Figura 2.1 – Pavimento: constituição, acções, solicitações e respostas (Branco *et al.*, 2005)

Relativamente ao comportamento de um pavimento rodoviário, de acordo com a Figura 2.1, é necessário considerar as seguintes componentes: (i) as acções do tráfego e do clima; (ii) os materiais constituintes, os quais apresentam um determinado tipo de comportamento face àquelas acções; (iii) o estado de tensão gerado nas diferentes camadas do pavimento; (iv) o estado de deformação correspondente.

Quanto às acções do tráfego elas são: (i) resultantes da aplicação das cargas dos veículos que podem ser expressas basicamente por uma pressão vertical (considerada uniforme e aplicada numa área circular) e uma acção tangencial aplicada entre pneu e pavimento; (ii) resultantes da acção do clima constituídas pelas acções da temperatura e da presença de água.

A temperatura, e particularmente a sua variação, influencia o desempenho das misturas betuminosas. A água influencia de forma determinante o comportamento das misturas betuminosas, das camadas granulares e do solo de fundação.

O estado de tensão resultante daquelas acções pode ser representado pelas tensões de tracção ( $\sigma_t$ ) nas camadas betuminosas (asfálticas), de compressão ( $\sigma_z$ ) e de tracção ( $\sigma_t$ ) nas camadas granulares e na fundação (subleito). Estas tensões apresentam valores e uma evolução dependentes das características dos materiais constituintes e das condições climáticas.

A cada passagem de um veículo geram-se tensões que produzem alterações dos materiais constituintes do pavimento, contribuindo para a redução da sua qualidade. Desta forma, o pavimento estará submetido a um processo de degradação acumulativo nos materiais constituintes, sendo que em uma certa fase necessitará de uma intervenção com o objectivo de recuperar a sua qualidade, ou seja, será executada uma acção de reabilitação do pavimento.

A adequada compreensão dos complexos mecanismos que regem o processo de degradação (perda sucessiva da qualidade) de um pavimento impõe-se como uma condição essencial para a identificação das causas que o levam à sua condição actual, bem como para a escolha e planeamento da técnica mais adequada para sua reabilitação.

Quanto aos tipos de materiais empregues, genericamente, pode-se considerar duas famílias: camadas com materiais estabilizados com ligantes (hidrocarbonados ou hidráulicos), na parte superior, e camadas com materiais granulares, estabilizados mecanicamente, em regra, na

parte inferior. A principal diferença entre aquelas duas famílias de materiais, quanto ao seu comportamento mecânico, reside no facto da primeira ter a capacidade de resistir a esforços de tracção, enquanto que a segunda, resiste essencialmente a esforços de compressão.

Da associação de camadas constituídas por diferentes materiais resultam diferentes tipos de pavimentos, a que correspondem comportamentos diferentes quando solicitados pelas cargas dos veículos em combinação com determinadas condições climáticas. Os pavimentos rodoviários são classificados em geral, de acordo com tipo de materiais que os constituem e à sua deformabilidade, resultando assim os seguintes tipos principais: flexíveis, semi-rígidos (compostos) e rígidos.

O pavimento flexível é constituído por uma ou mais camadas de mistura betuminosa, assentes sobre camadas granulares. A distribuição de tensões é feita pela camada de base (betuminosa ou granular), dado que, em geral, a camada de desgaste (betuminosa) não tem espessura e rigidez suficientes para sozinha suportar e distribuir as tensões. Neste tipo de pavimentos, o nível de tensões a que a fundação é submetida é maior que nos pavimentos rígidos.

O pavimento rígido, quanto à sua constituição, tem como característica principal a presença de uma camada de betão de cimento (concreto), que resiste a esforços de tracção, assente sobre uma camada de base. A elevada resistência da camada de betão de cimento possibilita que este pavimento não sofra deformação do tipo viscoplástica, mesmo quando submetido a condições severas de tráfego e elevadas temperaturas. As tensões verticais transmitidas pelas cargas de tráfego distribuem-se sobre uma grande área da laje de betão, de modo que a tensão vertical máxima que atinge a fundação representa uma pequena fracção da pressão de contacto pneu-pavimento.

Os pavimentos semi-rígidos, ou compostos, quanto à sua constituição, apresentam características comuns aos pavimentos rígidos e flexíveis, sendo uma ou duas camadas superiores constituídas por misturas betuminosas, seguida de uma ou duas camadas intermédias constituídas por agregado estabilizado com ligante hidráulico, podendo ainda dispor de uma camada granular na sub-base. Neste tipo de pavimento é a camada de base, de elevada rigidez, que absorve a maior parte dos esforços verticais, sendo que estes actuam de forma reduzida na fundação.

## 2.2. CONSTITUIÇÃO E COMPORTAMENTO DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

O principal organismo executor do Ministério dos Transportes no Brasil é o Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT). O DNIT foi implantado em Fevereiro de 2002 em substituição ao Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), com o objectivo de desempenhar as funções relativas à construção, manutenção e operação da infra-estrutura dos segmentos do Sistema Federal de Viação sob administração directa da União nos modais rodoviário, ferroviário e aquaviário.

No Brasil, a terminologia usada para as camadas que compõe um pavimento flexível é a adoptada pelo DNIT – TER 268 (1994). Um pavimento flexível, dependendo das características de suporte da fundação, pode ser constituído pelas seguintes combinações de camadas: revestimento, base, sub-base e reforço do subleito (Figura 2.2).

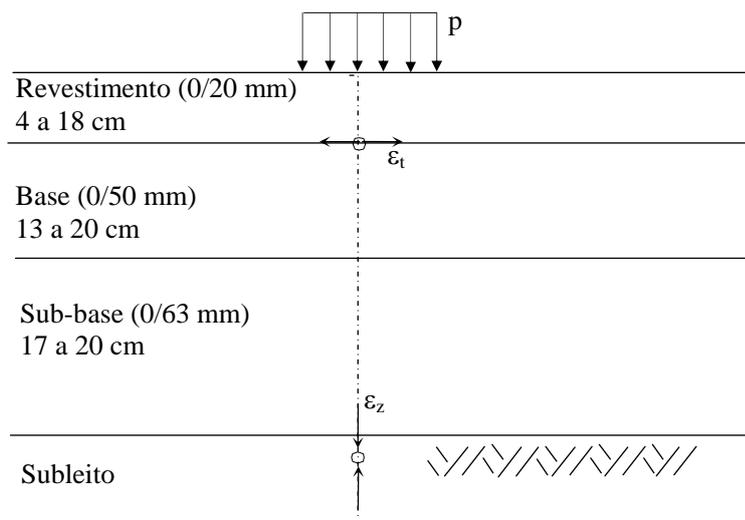


Figura 2.2 – Camadas constituintes de um pavimento flexível (Brasil)

A função e constituição de cada camada que compõe um pavimento flexível são descritas a seguir, indicando-se, entre parênteses, a designação adoptada em Portugal.

### Revestimento (camada de desgaste)

Camada destinada a resistir directamente às acções do tráfego, a impermeabilizar o pavimento, a melhorar as condições de rolamento, no que se refere ao conforto e à segurança,

e contribuir, ainda que de forma reduzida, para a redução dos efeitos das acções do tráfego nas camadas inferiores. Esta camada é constituída por misturas betuminosas (asfálticas).

### **Base**

Camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais provenientes do tráfego sobre a qual constrói-se o revestimento, podendo ser constituída por mistura betuminosa ou por material granular, como, por exemplo, brita graduada (agregado britado de granulometria extensa). Também tem a função de reduzir as deformações da camada de revestimento.

### **Sub-base**

Camada constituída por material granular complementar à base, com as mesmas funções desta e executada quando, por razões de ordem económica, for conveniente reduzir a espessura da base.

### **Reforço do subleito**

Camada executada quando, por razões económicas, é preciso reduzir a espessura da sub-base. Pode ser constituída por material granular ou por solos com capacidade de suporte superior ao subleito.

### **Subleito (fundação)**

Constitui a fundação do pavimento.

Em Portugal, da associação de camadas constituídas por diferentes materiais resultam diferentes tipos de pavimentos, que podem ser flexíveis, rígidos ou semi-rígidos. Quanto às principais camadas de um pavimento flexível, distingue-se a camada superficial (camada de desgaste), o corpo do pavimento e a fundação, esta constituída pelo terreno natural, ou ainda, por uma camada de transição, designada por leito do pavimento, utilizada quando a fundação não apresenta boas características resistentes.

A terminologia adoptada em Portugal para as camadas de um pavimento flexível é apresentada de acordo com Pereira & Picado-Santos (2002):

### **Camada de desgaste**

Esta camada apresenta superfície regular com adequada textura para promover o atrito suficiente com os pneus dos veículos, de modo a contribuir para uma circulação com conforto e segurança. Adicionalmente, e do ponto de vista da sua contribuição para a qualidade estrutural, esta camada tem ainda a importante função de impermeabilizar o pavimento, evitando a entrada de água exterior para as camadas inferiores e para o solo de fundação.

### **Corpo do pavimento**

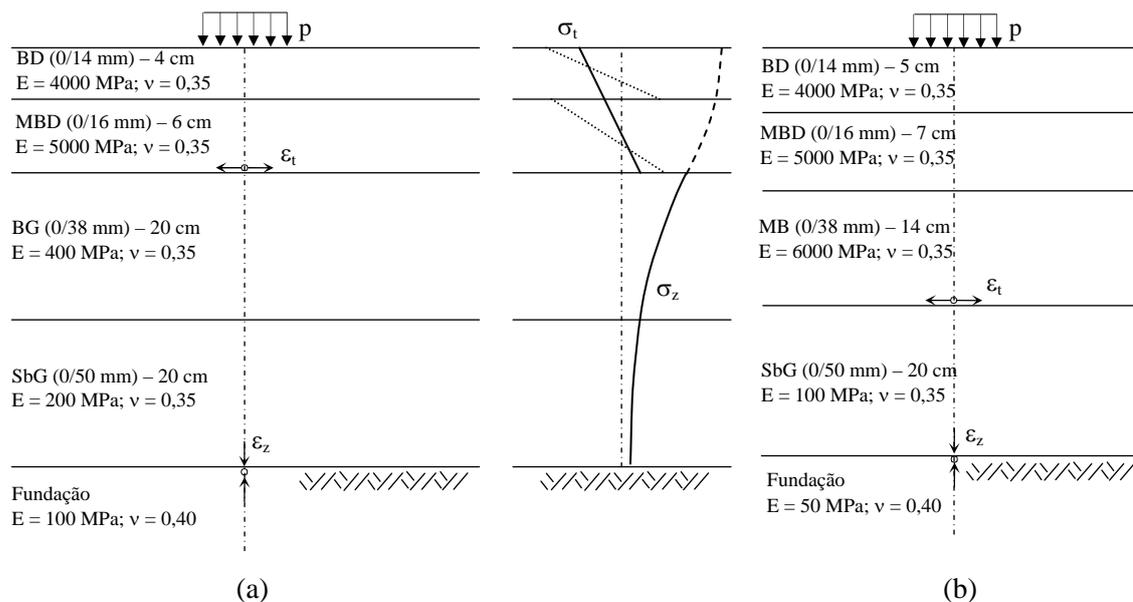
Constituído por uma camada de ligação (misturas betuminosas) e, quando necessário por razões estruturais, por uma camada de base e camadas granulares (base e/ou sub-base), sendo o principal responsável pela capacidade do pavimento em suportar as cargas do tráfego.

### **Leito do pavimento**

Esta é a primeira camada granular, com a função de aumentar progressivamente a capacidade da fundação, como suporte para as camadas superiores, permitindo também a homogeneização das características resistentes desse suporte.

A Figura 2.3 apresenta duas estruturas de pavimentos flexíveis propostas pelo Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Portuguesa (MACOPAV; JAE, 1995): estrutura (a), destinada a um tráfego reduzido, considerando uma fundação com elevada capacidade de suporte; estrutura (b), esta destinada a um tráfego intenso e com uma fundação de reduzida capacidade de suporte.

A protecção que as camadas superiores oferecem ao solo de fundação pode ser expressa de duas formas, quer seja através de espessura suficiente destas camadas, ou pelo tipo e constituição dos materiais constituintes das camadas, de modo que suportem com segurança as tensões impostas.



- Camadas coladas;
- ..... Camadas descoladas;
- BD: Betão betuminoso em camada de desgaste;
- MBD: Mistura betuminosa densa em camada de regularização;
- MB: Macadame betuminoso em camada de base;
- BG: Base granular;
- SbG: Sub-base granular em material britado sem recomposição (“*tout-venant*”) ou com recomposição em central.

Figura 2.3 – Pavimento flexível: constituição e comportamento (Branco *et al.*, 2005)

Considerando a análise da interface das camadas (camadas betuminosas “coladas” ou “descoladas”) pode-se observar que quando “coladas”, as camadas betuminosas estão submetidas a um estado de tensão que, no plano vertical, evolui de uma tensão de compressão máxima no topo da camada de desgaste, até um valor de tracção máxima na face inferior da última camada betuminosa (traço contínuo). No outro caso, quando “descoladas” entre si, para cada uma delas, observa-se tensões máximas de compressão na face superior e tensões máximas de tracção na face inferior (traço descontínuo).

Naturalmente que a situação de interfaces “descoladas” corresponde a um estado de tensão mais severo do que o verificado com as interfaces “coladas” (Pereira & Picado-Santos, 2002).

No caso das camadas granulares, tendo em conta que estas não têm capacidade para resistir a esforços de tracção, verifica-se uma evolução dos esforços de compressão, que são máximos à superfície reduzindo-se em função da respectiva espessura.

Os esforços instalados ao nível das diferentes camadas conduzem a uma evolução típica dos pavimentos flexíveis a dois estados últimos de ruína: o fendilhamento das camadas betuminosas e a deformação permanente das camadas em geral, os quais são considerados pelos principais métodos mecanicistas de dimensionamento.

### **2.3. MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

A estrutura de um pavimento é dimensionada para um determinado período de vida durante o qual deve ter a capacidade de receber e transmitir esforços, sem apresentar degradações estruturais e funcionais para além de limites predeterminados. De modo a estrutura funcionar adequadamente, as camadas que a compõe devem estar submetidas a esforços compatíveis com as suas características e capacidade estrutural, de modo a não ocorrer rotura prematura de qualquer um dos materiais que constituem as camadas do pavimento.

Os materiais utilizados em pavimentação apresentam diferentes mecanismos de deterioração, dependentes das acções climáticas e das acções do tráfego. As principais causas das degradações dos pavimentos flexíveis são a intensidade do tráfego e as acções climáticas (factores activos de degradação), e as deficiências dos materiais e da qualidade de execução (factores passivos de degradação). Para os diferentes tipos de degradações de um pavimento flexível, existe uma relação com os factores activos e passivos de degradação.

A evolução do comportamento de um pavimento é um processo complexo devido ao facto de cada acção provocar alterações sobre as propriedades dos materiais que constituem o pavimento. Isto determina que uma nova acção vai actuar sobre materiais com propriedades diferentes das existentes na acção anterior, originando um estado de tensão e deformação diferente, quando comparado com o verificado na acção anterior.

A evolução das solicitações em um pavimento rodoviário mostra que, de acordo com a Figura 2.4, a acção  $A_i$  (tráfego) quando actua sobre o pavimento com determinadas propriedades dos materiais constituintes ( $P_i$ ) e geometria da estrutura ( $G_i$ ), em determinadas condições climáticas, origina nos materiais determinados esforços ( $S_i$  ( $\sigma_t$  e  $\sigma_z$ )).

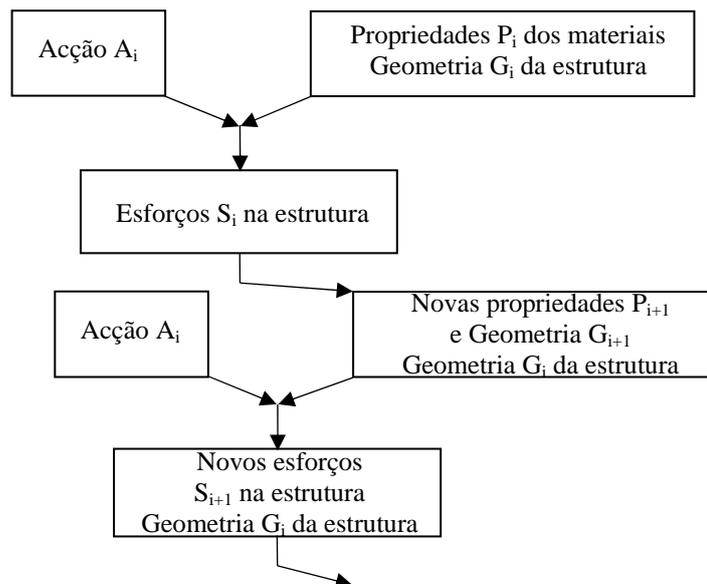


Figura 2.4 – Evolução das solicitações num pavimento rodoviário (Pereira & Miranda, 1999)

As novas solicitações, mesmo de idêntico valor das anteriores, vão actuar sobre um “novo material” com novas propriedades  $P_{i+1}$ , originando esforços  $S_{i+1}$ , e assim sucessivamente. Esta repetição de esforços, associadas à acção dos agentes climáticos, contribui para o início e evolução das degradações dos pavimentos.

As causas mais intimamente associadas à repetição de cargas sobre as estruturas de pavimentos, que levam à sua degradação, são o fenómeno de fadiga, (responsável pelo fendilhamento de misturas betuminosas) e o acúmulo de deformações permanentes, devido às deformações de corte (cisalhamento) que ocorrem nas camadas de desgaste, camadas granulares e no solo de fundação.

Por sua vez, o envelhecimento de uma mistura betuminosa tem início já na central de produção através da oxidação do betume (devido à acção química do oxigénio, no ar e na água) e também sob a acção do meio ambiente ao longo da sua vida útil. Esta oxidação, que leva ao endurecimento da mistura betuminosa tornando-a quebradiça, é agravada através do efeito da luz solar sobre a composição do betume. Estes efeitos conjugados com a passagem do tráfego sobre a superfície podem contribuir para o fendilhamento da camada de desgaste.

Através das fendas, ocorre a penetração de água para o interior das camadas do pavimento provocando a diminuição do valor do módulo de deformabilidade das camadas mais

susceptíveis à sua acção (camadas granulares e solo de fundação), reduzindo a capacidade de suporte da estrutura promovendo sua conseqüente degradação.

Dentre factores como o tráfego, clima, processos construtivos, condições de drenagem, estrutura do pavimento, materiais de construção utilizados, controlo de qualidade dos materiais durante a construção e política de manutenção adoptada, a degradação dos pavimentos também pode ser agravada pela fiabilidade da modelação nos métodos de dimensionamento, a qual constitui mais um factor passivo de incerteza no comportamento do pavimento.

## **2.4. PRINCIPAIS TIPOS DE DEGRADAÇÃO DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

As estradas representam um património de cada país e a sua preservação e o prolongamento da vida útil de seus pavimentos afecta a economia nacional. Durante a vida dos pavimentos flexíveis o aparecimento de degradações contribuem para a perda de sua qualidade. Assim, a sua detecção nos estágios iniciais e a determinação das possíveis causas são importantes para a adopção de estratégias de intervenção para a manutenção da qualidade funcional e estrutural durante o período para que foi projectado.

A velocidade da deterioração de um pavimento varia sobretudo em função dos seguintes factores: (i) condições ambientais; (ii) capacidade de suporte do pavimento e do subleito; (iii) qualidade dos materiais utilizados e do processo construtivo; (iv) volume de tráfego; (v) carga por eixo do camião.

Como as estruturas dos pavimentos e as condições climáticas são muito diversas, cada país desenvolveu seus manuais de identificação e classificação das degradações. Contudo, observa-se similaridade e padronização entre as classificações existentes.

Os catálogos de degradações são documentos de referência, compreendendo, para cada tipo de pavimento e tipo de degradação, a respectiva descrição, níveis de gravidade e modo de medição aplicável. Para cada degradação e nível de gravidade são apresentados por fotografias e exemplos de pavimentos nas mesmas condições. Esses documentos, como por

exemplo, o catálogo de degradações desenvolvido pelo programa *Strategic Highway Research Program* (SHRP) em 1993, são fundamentais para a observação visual.

Em Portugal é utilizado o Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis, que foi desenvolvido para a Junta Autónoma de Estradas (JAE) em 1998. Este catálogo apresenta os diferentes tipos de degradação que mais frequentemente aparecem nos pavimentos da rede rodoviária portuguesa. O catálogo é ilustrado com fotos que representam os tipos de degradações, incluindo a descrição sucinta de cada uma, relatando ainda as causas possíveis, assim como a provável evolução. As degradações são classificadas de acordo com a sua gravidade (3 classes).

No Brasil, o documento que define os termos técnicos relativos à classificação das degradações que ocorrem nos pavimentos flexíveis e que é utilizado também para padronizar a linguagem adoptada na elaboração das normas, manuais, projectos e textos relativos aos pavimentos flexíveis, é a Norma DNIT – TER 005 (2003), Defeitos nos Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos – Terminologia. Esta Norma possui anexos, com o quadro resumo das degradações, sua codificação e classificação, a representação das degradações e ilustrações fotográficas das mesmas.

As degradações mais relevantes verificadas nas estradas da rede nacional portuguesa compreendem o aparecimento de deformações permanentes (rodeiras) e o desenvolvimento de fendilhamento nas camadas betuminosas.

A investigação de Inter-relacionamento de Custos Rodoviários, desenvolvida no Brasil entre 1975 e 1980, mostrou que o afundamento observado nas rodeiras de pavimentos flexíveis é em média de 2,53 mm (em um intervalo de 0,40 mm a 7,40 mm e desvio-padrão de 0,90 mm). Em conclusão, deformações permanentes inferiores a 5,00 mm ocorriam em 95% da extensão dos trechos estudados, com valores inferiores ao valor crítico de 20,00 mm preconizado na literatura. Assim, naquela época, a deformação permanente não era um grave problema para os pavimentos brasileiros e a principal degradação que ocorria nos pavimentos era o fendilhamento por fadiga das misturas betuminosas nas camadas de desgaste provocada pela repetição das cargas de tráfego.

A partir da década de 90, tendo em conta o aumento do volume de tráfego e das cargas por eixo, resultando em maiores pressões de enchimento e tipos de pneus (extra largo, por exemplo), a deformação permanente tornou-se uma das principais degradações dos pavimentos brasileiros. Actualmente, as principais patologias que ocorrem nos pavimentos brasileiros são o fendilhamento por fadiga e os afundamentos plásticos (DNIT, 2006).

## Rodeiras

A acção das cargas de tráfego nos pavimentos flexíveis provoca deformações do tipo permanentes e reversíveis. As deformações permanentes são aquelas que permanecem mesmo após cessar o efeito da actuação da carga, ou seja, têm carácter residual, como por exemplo, aquelas geradas nos rodados e as de natureza plástica<sup>1</sup> (Preussler & Pinto, 2001).

São três os tipos de deformações permanentes que ocorrem nos pavimentos rodoviários (Chowdhury *et al.*, 2001):

- deformação por consolidação ou densificação – depressão na camada betuminosa, localizada próxima ao centro de aplicação de carga, resultante da compactação adicional de todas as camadas causada pelo tráfego após a abertura ao tráfego;
- deformação plástica – depressão ou afundamento que ocorre na camada betuminosa, denominadas rodeiras;
- deformação estrutural – referem-se às deformações que ocorrem na base, sub-base ou solo de fundação.

As rodeiras são deformações longitudinais, desenvolvendo-se na banda de passagem dos pneus dos veículos (cavado de rodeiras), sendo a principal degradação da família das deformações. Pode assumir duas configurações típicas que são as rodeiras de pequeno raio e as rodeiras de grande raio. A existência de condições de drenagem deficientes, permitindo a alimentação em água do solo de fundação e camadas granulares, provocará uma alteração do equilíbrio interno ao nível destas camadas. Esta situação, associada à acção das cargas do tráfego, terá como consequência a formação de rodeiras de grande raio.

---

<sup>1</sup> Um material sofre deformação plástica quando a tensão não é mais proporcional à deformação ocorrendo então uma deformação não recuperável e permanente. A partir de uma perspectiva atómica, a deformação plástica corresponde à quebra de ligações com os átomos vizinhos originais e em seguida formação de novas ligações com novos átomos vizinhos, uma vez que um grande número de átomos ou moléculas se move em relação uns aos outros; com a remoção da tensão, eles não retornam às suas posições originais, diferentemente do que acontece na deformação elástica. No caso das misturas betuminosas, utiliza-se o termo deformação plástica, embora não ocorra a quebra de ligação dos átomos.

Em condições de tráfego intenso, eventualmente canalizado e com temperaturas muito elevadas, um pavimento com uma camada de desgaste pouco resistente à deformação permanente (ligante demasiado mole, má qualidade dos agregados, composição inadequada da mistura), acumulará deformações ao longo do tempo, do tipo rodeira de pequeno raio.

A evolução das rodeiras consiste no aumento da sua profundidade e no aparecimento de outros tipos de degradação. Em particular, para o caso das rodeiras de pequeno raio, devido à fluência do material, poderá surgir o aparecimento de cordões laterais longitudinais de mistura betuminosa da camada de desgaste.

A deformação dos pavimentos desenvolve-se gradualmente com o aumento do número de solicitações de cargas por eixo e em geral aparece sob a forma de depressões longitudinais nas rodeiras, acompanhadas ou não de elevações laterais nas estradas.

A variação longitudinal da magnitude da deformação permanente causa irregularidade no pavimento, originando principalmente em três factores: (i) diminuição da segurança; (ii) desconforto aos utentes (usuários); (iii) aumento do custo de operação dos veículos (Gouveia, 2002).

De acordo com Sousa *et al.* (1991) as depressões ou rodeiras devidas à deformação permanente são preocupantes, pelo menos, por duas razões: (i) em superfícies impermeáveis, as rodeira preenchidas por água em profundidades de 5,0 mm, principalmente em veículos ligeiros podem causar hidroplanagem; (ii) com o aumento das rodeiras em profundidade, a direcção de veículos torna-se extremamente dificultada, conduzindo a uma maior preocupação com a segurança.

O fenómeno de deformação permanente que ocorre nas misturas betuminosas é um processo complexo, afectado pelas propriedades e proporções de cada um dos componentes de uma mistura betuminosa (agregados, betume e vazios). A deformação permanente nas camadas betuminosas, em geral, ocorre no verão.

No verão, quando as temperaturas do pavimento aumentam, a viscosidade do betume diminui e o carregamento do tráfego é resistido principalmente pelo esqueleto mineral. A resistência à

deformação permanente de uma mistura é considerada uma combinação de resistência (resistência ao corte) do betume e do agregado mineral (Chowdhury *et al.*, 2001).

### **Fendilhamento nas camadas betuminosas**

Esta família de degradações é a mais frequente nos pavimentos flexíveis, resultando, na maioria dos casos, da fadiga dos materiais das camadas betuminosas, devido à acção repetida dos esforços de tracção por flexão destas camadas. Constitui, em geral, um dos primeiros sinais aparentes da redução da qualidade estrutural de um pavimento. A identificação visual da superfície de um pavimento fendilhado permite avaliar o tipo de fendilhamento da superfície do pavimento e a sua possível origem.

A fadiga das misturas betuminosas, por acção do tráfego, traduz-se no aparecimento de fendas nas camadas betuminosas, que se desenvolvem através da espessura destas camadas. Estas fendas (resultantes dos efeitos cumulativos do carregamento sucessivo) iniciam-se na parte inferior das camadas betuminosas e propagam-se até à superfície do pavimento e normalmente surgem na zona de passagem dos rodados dos pesados na direcção longitudinal da estrada. Este tipo de degradação é caracterizado em seu estágio final como fendas tipo pele de crocodilo.

As fendas superficiais evoluem de fendas longitudinais isoladas para fendas ramificadas, até ao fendilhamento constituído pela “pele de crocodilo”. Podem aparecer fendas transversais sendo originadas na ramificação das fendas longitudinais. As fendas parabólicas à superfície do pavimento são devidas a problemas de estabilidade dos materiais da camada de desgaste associados à elevada agressividade do tráfego pesado, e eventualmente, a uma deficiente ligação desta com a camada inferior.

Outra forma de fendilhamento existente nos pavimentos flexíveis é o fendilhamento devido à retracção das misturas betuminosas, sempre que se verifica um abaixamento importante de temperatura. Este fenómeno é devido à solicitação provocada pelo gradiente térmico e se apresenta sob a forma de fendas transversais e longitudinais.

O processo de envelhecimento do ligante depende do tipo e da qualidade do ligante, das condições climáticas e do projecto de mistura (percentagens elevadas de betume e reduzida

quantidade de vazios dificultam o processo de oxidação e promovem maior durabilidade). A forma das fendas por envelhecimento é irregular com espaçamento maior que 0,5 m (DNIT, 2006).

As fendas por propagação ocorrem quando o fendilhamento existente em uma camada inferior se propaga em direcção à superfície, atingindo a camada de desgaste. Assim sendo, elas podem apresentar-se sob a forma qualquer (longitudinal, irregular ou interligada). A propagação ocorre como consequência da concentração de tensões entorno da região ocupada pela fenda existente, fazendo com que a vida de fadiga da camada de desgaste seja extremamente reduzida.

Nos pavimentos também podem se desenvolver fendas a partir da superfície da camada de desgaste, pelo que se assume que estas se propagam para baixo. Estas fendas são o resultado da elevada concentração de tensões verticais de contacto na interface pneu-pavimento, provocando elevados esforços de corte nesta zona (Molenaar & Potter, 1997).

O fendilhamento com origem na superfície é um mecanismo de ruína importante em pavimentos com camadas betuminosas de espessura elevada. Freitas (2004) observou também que nas zonas onde o pavimento está exposto ao sol mais horas diariamente a densidade de fendilhamento é muito superior e as fendas têm comprimentos muito superiores aos restantes locais.

O aparecimento de fendas na superfície da camada de desgaste é um fenómeno que deve ser evitado para o desempenho esperado do pavimento. As fendas com origem na superfície causam problemas como a progressiva degradação, a entrada de água nas camadas do pavimento, o desconforto aos utentes e a redução da segurança de circulação (Vanelstraete & de Bondt, 1997).

### ***Fendas de fadiga***

As fendas de fadiga são as mais comuns e traduzem-se no aparecimento de fendas nas camadas betuminosas, que se desenvolvem através da espessura destas camadas. Estas fendas podem quanto à sua fase de desenvolvimento ser classificadas em isoladas, geralmente orientadas no sentido longitudinal, e ramificadas.

### ***Pele de crocodilo (ou couro de jacaré)***

Este importante grupo de fendilhamento, é resultante da evolução das fendas ramificadas, que passam a formar uma malha ou grelha, com fendas mais ou menos abertas. A pele de crocodilo, tendo em conta a sua fase de desenvolvimento, quanto à abertura da malha, pode classificar-se em malha estreita (lado da malha  $\leq 40$  cm) ou em malha larga (lado da malha  $\geq 40$  cm) e, quanto à abertura dos bordos das fendas, em aberta e fechada. A pele de crocodilo resulta da evolução das fendas ramificadas, correspondendo a uma fase de evolução rápida do estado de degradação do pavimento.

Quanto mais fendilhadas estiverem as camadas betuminosas do pavimento, mais severa é a acção das cargas, devido a uma concentração de tensões nos bordos das fendas, como se comprova através da “mecânica da fractura”.

O DNIT define a terminologia adoptada no Brasil para os termos empregados em defeitos (degradações) que ocorrem nos pavimentos flexíveis (DNIT – TER 005, 2003).

### **Fenda**

A fenda se traduz como qualquer descontinuidade na superfície do pavimento, que conduza a aberturas de menor ou maior porte, apresentando-se sob as formas de fissura ou de trinca.

### ***Fissura***

A fissura é classificada como a fenda de largura capilar existente no revestimento, posicionada longitudinal, transversal ou obliquamente ao eixo da via, somente perceptível à vista desarmada de uma distância inferior a 1,50 m.

### ***Trinca***

Trinca é a fenda existente no revestimento, facilmente visível à vista desarmada, com abertura superior à da fissura, podendo apresentar-se sob a forma de trinca isolada (Figura 2.5) ou trinca interligada.



Figura 2.5 – Trinca isolada

As trincas isoladas apresentam direcções ortogonais ou transversais ao eixo da via e possuem a seguinte classificação:

- FC-1: são trincas com abertura superior à das fissuras e menores que 1,0 mm;
- FC-2: são trincas com abertura superior a 1,0 mm e sem erosão nos bordos;
- FC-3: são trincas com abertura superior a 1,0 mm e com erosão nos bordos.

O fendilhamento devido aos fenómenos de fadiga resulta dos efeitos cumulativos do carregamento sucessivo, que em sua fase final é caracterizado pelas trincas “couro de jacaré”. A trinca tipo “couro de jacaré” é o conjunto de trincas interligadas sem direcções preferenciais, assemelhando-se ao aspecto de couro de jacaré. Essas trincas podem apresentar, ou não, erosão acentuada nos bordos.

A trinca tipo “bloco” é o conjunto de trincas interligadas caracterizadas pela configuração de blocos formados por lados bem definidos que ocorrem devido ao endurecimento (envelhecimento) e contracção térmica do revestimento, podendo ou não, apresentar erosão acentuada nos bordos.

As trincas interligadas são classificadas como FC-3 e FC-2 caso apresentem ou não erosão nos bordos, como apresenta a Figura 2.6 (a) para FC-2 e (b) para FC-3.



(a) FC-2

(b) FC-3

Figura 2.6 – Trincas interligadas

### **Afundamento**

O afundamento é classificado como a deformação permanente caracterizada por depressão da superfície do pavimento, acompanhada, ou não, de levantamento, podendo apresentar-se sob a forma de afundamento plástico ou de consolidação. O conceito de que existe uma relação entre a posição da degradação “afundamento” no perfil transversal da estrada pode ser atestado através da observação da maneira que a rotura ocorre na superfície de um pavimento.

Quando a rotura ocorre na camada de desgaste (mistura betuminosa), as depressões ao longo das rodeiras são acompanhadas pelo irrompimento de material betuminoso. Entretanto, quando a rotura ocorre nas camadas inferiores (base ou solo de fundação), as depressões ao longo das rodeiras ocorrem, mas o deslocamento de material betuminoso é mínimo (White *et al.*, 2002).

Os carregamentos relativos ao tráfego causam deformação predominantemente nas três seguintes situações:

- quando os esforços induzidos nos materiais constituintes dos pavimentos são suficientes para causar corte, promovendo deslizamentos no interior do material. Neste caso, poucas cargas concentradas ou pressões excessivas nos pneus podem causar tensões que excedem a resistência ao corte dos materiais e ainda causam fluência plástica, cujo resultado são afundamentos sob a carga de roda e, frequentemente, levantamentos ao redor da área carregada;

- carregamentos estáticos ou de longa duração podem causar afundamentos em materiais de comportamento viscoso, com as misturas betuminosas e alguns tipos de solo;
- um grande número de repetições de cargas de reduzida pressão pode causar pequenas deformações que se acumulam ao longo do tempo e se manifestam como afundamentos canalizados nas trilhas de roda.

### ***Afundamento plástico***

Esta degradação é causada pela fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do solo de fundação, acompanhado de solevamento. Quando ocorre em extensão até 6 m é denominado afundamento plástico local; quando a extensão for superior a 6 m e estiver localizado ao longo da trilha de roda (rodeira) é denominado afundamento plástico de trilha de roda (Figura 2.7).

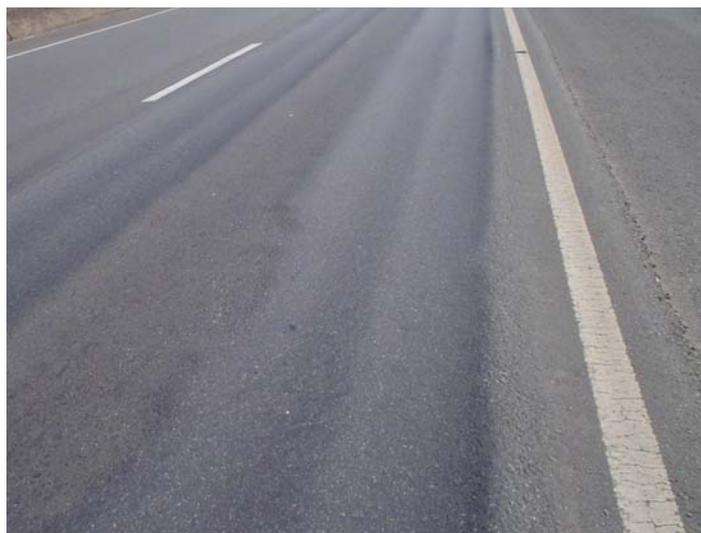


Figura 2.7 – Afundamento plástico de trilha de roda

### ***Afundamento de consolidação***

O afundamento de consolidação é causado pela consolidação diferencial de uma ou mais camadas do pavimento ou solo de fundação sem estar acompanhado de solevamento. Quando ocorre em extensão até 6 metros é denominado afundamento de consolidação local (Figura 2.8); quando a extensão for superior a 6 metros e estiver localizado ao longo da trilha de roda é denominado afundamento de consolidação da trilha de roda.



Figura 2.8 – Afundamento

O Quadro 2.1 apresenta o resumo da classificação das degradações no Brasil (DNIT, 2006).

## 2.5. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS PAVIMENTOS

A avaliação da qualidade dos pavimentos rodoviários compreende um conjunto de actividades com o objectivo de conhecer o estado do pavimento e baseia-se na definição de critérios objectivos quanto à análise da interacção entre o estado do pavimento, a respectiva capacidade estrutural e o utente da estrada. Esta avaliação é realizada mediante procedimentos padronizados (normas técnicas, catálogos ou manuais) de medidas e observações, de modo a quantificar o estado funcional e estrutural do pavimento.

A avaliação estrutural do pavimento procura definir o nível de desempenho mecânico do pavimento, tendo em conta o tráfego passado e as condições climáticas, sendo correntemente quantificável através da vida residual (vida útil), expressa em número de passagens de um determinado eixo padrão. A avaliação funcional tem por objectivo definir a qualidade do pavimento, tendo por base as exigências dos utentes da estrada quanto ao conforto e segurança de circulação (Pereira & Picado-Santos, 2002).

A avaliação do estado (nível de degradação) do pavimento é possível através do conhecimento de parâmetros como fendilhamento, deformações permanentes, irregularidade longitudinal, deflexão, solicitação de tráfego e aderência entre o pneu e o pavimento.

Quadro 2.1 – Classificação das degradações (adaptado do DNIT, 2006)

Degradações				Evolução das degradações
Fendas				O couro de jacaré resulta da evolução das trincas ramificadas, correspondendo a uma fase de evolução rápida do estado de degradação do pavimento. A evolução desta fase também será acelerada devido à entrada de água exterior no pavimento, através das fendas existentes, originando-se uma redução da capacidade de suporte do solo de fundação e do desempenho das camadas granulares. Por sua vez, esta redução conduz a um maior esforço de tracção por flexão das camadas betuminosas, acelerando-se o processo de degradação.
Trincas na camada de desgaste geradas por deformação permanente excessiva e/ou decorrentes do fenómeno de fadiga	Trincas isoladas	Transversais	Curtas	
			Longas	
		Longitudinais	Curtas Longas	
	Trincas interligadas	Jacaré	Sem erosão acentuada nos bordos	
			Com erosão acentuada nos bordos	
Trincas no revestimento não atribuídas ao fenómeno de fadiga	Trincas isoladas	Devido à retracção térmica		
	Trincas interligadas	Bloco	Sem erosão acentuada nos bordos	
Com erosão acentuada nos bordos				
Afundamento	Plástico	Local		
		Da trilha		
	De consolidação	Local		
		Da trilha		
Crescimento rápido do tamanho dos sulcos e fendas do pavimento e aparecimento de outros tipos de degradação.				

A nível de projecto, de acordo com Sebaaly *et al.* (1997), a investigação que conduz à determinação do tipo de reabilitação (restauração ou reconstrução) que o pavimento será submetido deve seguir as seguintes etapas:

- identificação do histórico completo das secções dos pavimentos;
- identificação do tráfego;
- análise das hipóteses de projecto;
- condução de testes não destrutivos;
- condução da análise do projecto de restauração;
- avaliação das alternativas e recomendações.

A avaliação da qualidade dos pavimentos, quer na fase de construção/reabilitação, quer ao longo da fase de exploração, tem um papel preponderante na gestão da rede rodoviária. Ela pode mesmo ser o factor chave da melhoria tecnológica em todas as fases da gestão rodoviária. A ineficácia desta fase pode comprometer a viabilidade de qualquer sistema de gestão, o qual permanecerá apenas como uma realização informática, sem utilidade na rentabilização dos recursos e na melhoria da qualidade rodoviária (Pereira & Miranda, 1999).

Os objectivos de um levantamento de superfície de pavimento estão voltados para o conhecimento do tipo e estágio de desenvolvimento dos defeitos aparentes. Com base em autores como AASHTO (1993); Grivas *et al.* (1991); Cenek *et al.* (1994); Haas *et al.* (1994), as avaliações têm as seguintes finalidades:

- determinação do estado actual de um trecho ou de uma rede de pavimentos;
- elaboração de curvas de previsões de degradação desde que se disponha de um conjunto apropriado de dados de levantamentos de degradações;
- identificação das necessidades actuais e futuras da rede, quanto à manutenção, com base na velocidade de degradação determinada por curvas de previsão;
- estabelecimento de prioridades na programação de investimentos sob restrição orçamentária;
- determinação da eficácia das alternativas de intervenção de manutenção, permitindo a selecção adequada da solução a ser empregada;
- verificação das prováveis causas de acidentes;
- definição de trechos homogéneos para fins de projecto e selecção de alternativas;
- detecção de mudanças de estado entre duas avaliações periódicas;
- definição das causas das degradações, factores ambientais, cargas excedentes, problemas construtivos e de materiais.

### **2.5.1. Avaliação da qualidade superficial dos pavimentos**

O estado funcional de um pavimento é avaliado quanto às características geométricas da superfície, e ainda quanto às suas características físicas. Assim, uma superfície de um pavimento deverá possuir um perfil longitudinal e transversal de acordo com o projectado, onde a exigência principal é a de uma homogeneidade global, e possuir uma rugosidade

ótima do ponto de vista da segurança e do conforto. As características fundamentais dos pavimentos, associadas ao estado funcional são a textura e a irregularidade superficial.

A irregularidade de um pavimento só pode ser avaliada de forma independente quando a sua medição é baseada num determinado perfil do pavimento. A avaliação da irregularidade dos pavimentos tem sido realizada com recurso a diferentes equipamentos, os quais utilizam diferentes técnicas e princípios de medida. O perfil longitudinal tem sido também classificado por referência à resposta dinâmica de um sistema de medida ou por índices determinados a partir da análise de imagens aproximadas deste perfil.

As características das misturas betuminosas que afectam a aderência são a microtextura e a macrotextura. A microtextura tem como origem a adesão nos pontos de contacto do pneumático na presença de microscópicas pontas agudas na superfície do agregado exposto da camada de desgaste. Assim, a microtextura é a propriedade que possuem os agregados das misturas betuminosas utilizados em camadas de desgaste de apresentar uma superfície rugosa, devendo esta característica resistir ao polimento decorrente da acção do tráfego. Quando os veículos se deslocam a velocidades de até 50 quilómetros por hora, a microtextura é o factor predominante na determinação da resistência à derrapagem (parcela adesão mais importante).

Com o deslocamento do veículo a velocidades mais altas, a rotura do filme de água sobre o pavimento torna-se mais difícil em vista do menor tempo de contacto. A resistência à drenagem torna-se basicamente dependente da parcela de deformação do coeficiente de atrito e as protuberâncias sobre a superfície do pavimento (macrotextura) devem ser suficientemente longas e agudas de modo a deformar a superfície do pneumático, a despeito da presença da película de água sobre o pavimento (Momm, 1998).

Assim, em baixas velocidades, a microtextura é o factor preponderante na determinação dos níveis de resistência à derrapagem. Com altas velocidades, a macrotextura é igualmente importante na determinação do coeficiente de atrito. O estado ideal é a de que a superfície de rolamento se apresente simultaneamente rugosa (boa macrotextura) e áspera (boa microtextura).

### **2.5.2. Avaliação da qualidade estrutural dos pavimentos**

O estado estrutural de um pavimento é avaliado quanto à sua capacidade de suportar as cargas para que foi projectado, sob a acção de determinadas condições climáticas. A avaliação da qualidade estrutural do pavimento permite definir o nível de desempenho mecânico do pavimento através do estabelecimento o valor da sua vida residual. Assim, conjuntamente com a avaliação da qualidade superficial do pavimento, é possível a seleccionar a mais adequada alternativa de reabilitação.

A acção das cargas de tráfego associadas ao clima sobre os pavimentos flexíveis provoca deformações de dois tipos: permanentes e recuperáveis. As deformações permanentes são aquelas que permanecem mesmo após cessar o efeito da actuação da carga (carácter residual) como por exemplo, as geradas nas rodeiras pela consolidação adicional do tráfego, bem como as roturas de natureza plástica.

As deformações (ou deflexões) elásticas constituem uma indicação de comportamento da estrutura, tendo em conta que quanto maior o seu valor, mais elástica ou resiliente é a estrutura e maior o seu comprometimento estrutural, e provocam o arqueamento da camada betuminosa, sendo que a sua repetição é a responsável pelo fenómeno de fadiga desta camada.

O estudo da deflexão ou das condições de deformabilidade dos pavimentos é fundamental à compreensão do seu comportamento, já que esta reflecte o estado estrutural das diversas camadas e da fundação. A deflexão de um pavimento representa a resposta das camadas estruturais e do subleito à aplicação do carregamento. Quando uma carga é aplicada em um ponto (ou uma área) da superfície do pavimento, todas as camadas flectem devido às tensões e às deformações geradas pelo carregamento.

Como mostrado na Figura 2.9, o valor da deflexão em cada camada geralmente diminui com a profundidade e com o distanciamento do ponto de aplicação da carga e depende também do módulo de elasticidade das camadas e da magnitude da carga.

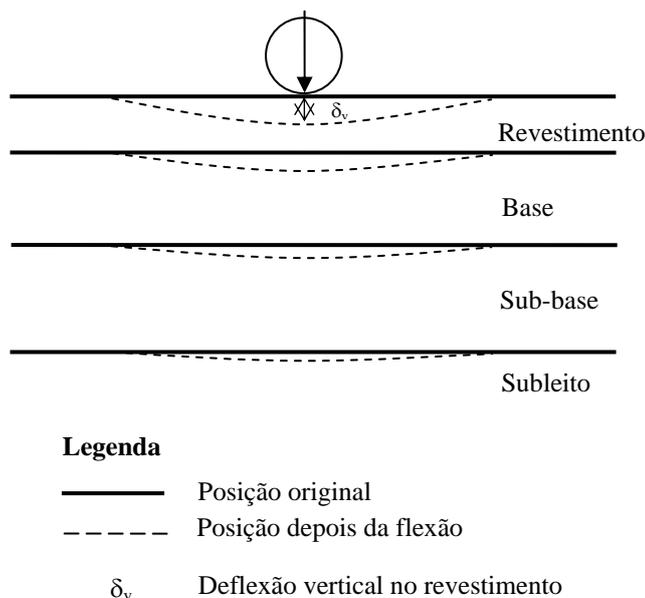


Figura 2.9 – Deformações no pavimento (adaptado do DNIT, 2006)

Os pavimentos mais sadios estruturalmente flectem menos do que outros pavimentos mais degradados. Assim, pavimentos com deflexões mais baixas suportam maior número de solicitações de tráfego.

A capacidade estrutural do pavimento existente pode ser avaliada por meio de ensaios destrutivos com colecta de materiais para determinar as características de resistência e mecânicas das camadas do pavimento, ou ainda, por meio de ensaios não destrutivos, como os ensaios defletométricos.

A avaliação estrutural do pavimento de forma não destrutiva pode ser efectuada através de vários equipamentos, dentre os quais, os mais representativos são os seguintes: (i) viga Benkelman; (ii) deflectógrafo FLASH; (iii) curvímetro; (iv) deflectómetro de impacto FWD (*Falling Weight Deflectometer*).

## 2.6. REABILITAÇÃO DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A eficiência do sistema de transportes de um país, especialmente da rede de estradas, afecta directamente sua economia, especialmente da rede de estradas. Entretanto, o aumento do número de veículos pesados e da carga transportada por eixo conduz frequentemente à

ocorrência de um estado prematuro de ruína dos pavimentos, resultando na elevação dos custos de conservação, custos de transporte e aumento dos custos dos utentes e não utentes. A melhoria da qualidade dos pavimentos, assim como da malha viária, além de proporcionar segurança, contribui para o aumento da competitividade, através da redução dos custos dos transportes e melhor escoamento da produção agrícola e industrial.

Um pavimento é dimensionado para que em um determinado período de vida possa resistir a um número projectado de repetições de carga sob a acção conjunta do clima. No entanto, a progressiva perda da qualidade de um pavimento tende a ocorrer de forma gradual ao longo dos anos, sendo que o fenómeno que rege a mudança do seu estado é denominado de degradação. A compreensão dos mecanismos que conduzem ao processo de degradação é fundamental para a identificação das suas causas e para a escolha da técnica mais adequada para a reabilitação do pavimento.

A qualidade de um pavimento deve ser avaliada a partir do conhecimento da sua estrutura e da sua superfície, determinando-se o actual desempenho estrutural e funcional. O desempenho funcional refere-se à capacidade do pavimento em fornecer uma superfície adequada e segura ao utente em termos de qualidade de rolamento. O desempenho estrutural refere-se à capacidade do pavimento em manter sua capacidade de suportar as cargas para que foi projectado, sob a acção de determinadas condições climáticas sem apresentar degradação excessiva.

A reabilitação de um pavimento é utilizada para restabelecer certas características de qualidade e envolve geralmente a correcção de deficiências na superfície (recuperação das características funcionais) ou na estrutura do pavimento (recuperação das características estruturais). A avaliação periódica do estado das estradas permite caracterizar a sua qualidade, definindo a gravidade das degradações, para apoio à definição do procedimento de reabilitação.

O projecto de reabilitação de pavimentos é uma tarefa complexa requerendo mais informações do que a concepção de pavimentos novos. De modo a encontrar a solução mais eficiente, que atenda as restrições técnicas e económicas, deve-se proceder uma adequada avaliação do pavimento e à determinação das causas e da intensidade da degradação. A rotura prematura de diversas obras de reabilitação de pavimentos pode também ser resultado de

avaliações inadequadas do pavimento. A avaliação do pavimento e o diagnóstico da situação existente requerem a colecta de dados do pavimento, a qual determinará dentre as alternativas de reabilitação consideradas, aquela que será adoptada.

### **2.6.1. Reabilitação das características funcionais**

A degradação funcional é definida como uma alteração do estado da superfície do pavimento que adversamente afecta o utente da estrada. A característica do pavimento que mais afecta a avaliação dos utentes é a irregularidade longitudinal.

As técnicas de reabilitação das características funcionais dos pavimentos rodoviários flexíveis aplicam-se ao nível da camada de desgaste, de modo a recuperar as características funcionais iniciais do pavimento. Estas técnicas devem ser aplicadas em pavimentos com boas condições estruturais (Pereira & Miranda, 1999).

A reabilitação das características funcionais de um pavimento flexível não contribui para o acréscimo da capacidade estrutural. Basicamente destinam-se a evitar o agravamento de defeitos, a impermeabilizar a camada de desgaste, prevenir o desenvolvimento prematuro de fendas ou recuperar a aspereza superficial. Estas operações não necessitam de verificação de dimensionamento.

As técnicas de reabilitação das características funcionais geralmente consistem em camadas betuminosas delgadas que sejam soluções de execução rápida e económica procurando não alterar a cota da camada de desgaste. Cada órgão rodoviário desenvolve orientações e alternativas para recuperação dos pavimentos.

As técnicas de reabilitação das características funcionais mais empregues no Brasil são as seguintes (DNIT, 2006):

- misturas betuminosas com betume convencional ou com borracha;
- lama asfáltica;
- micro-revestimento a frio;
- capa selante;

- camada porosa de atrito;
- tratamentos superficiais.

As técnicas de reabilitação das características superficiais (reabilitação da camada de desgaste) mais utilizadas nas estradas portuguesas são as seguintes (Branco *et al.* (2005):

- revestimentos superficiais;
- microaglomerado betuminoso a frio;
- lama asfáltica (*slurry seal*);
- betão betuminoso;
- microbetão betuminoso rugoso;
- argamassa betuminosa;
- betão betuminoso drenante.

### **2.6.2. Reabilitação das características estruturais**

A escolha da reabilitação das características estruturais de um pavimento é sempre precedida de uma avaliação estrutural da sua condição (estado de degradação). A reabilitação das características estruturais de um pavimento tem a finalidade de acrescentar uma nova capacidade estrutural para suportar uma nova solicitação de tráfego.

A reabilitação dos pavimentos flexíveis compreende a execução de reparações selectivas, reforços estruturais ou aplicação de camadas de regularização com a finalidade de restaurar a capacidade estrutural do pavimento ou a qualidade de rolamento. Em função do tráfego futuro estimado e da capacidade estrutural (em termos das características de resistência das camadas) do pavimento existente, é possível definir a natureza e as características das medidas destinadas a suportar novos incrementos de tráfego.

A reabilitação das características estruturais no Brasil, engloba quatro conceitos que são restauração, reforço, reconstrução e melhoramento (DNIT, 2006).

A restauração é o conjunto de operações destinadas a aumentar a capacidade estrutural do pavimento, com a substituição ou reciclagem de uma ou mais camadas do pavimento.

O reforço designa uma actividade específica de restauração que consiste na colocação de uma ou mais camadas de misturas betuminosas sobre a camada de desgaste antiga. Esta actividade é também denominada de recapeamento estrutural.

A reconstrução trata da renovação da estrutura do pavimento com remoção da estrutura danificada como resultado de negligência prolongada que resulta na impossibilidade de reabilitar o pavimento. Pode envolver a remoção parcial ou total da estrutura existente e substituição por materiais novos ou ainda através do aproveitamento de parte dos materiais antigos por meio de reciclagem.

O melhoramento processa-se quando, além da execução de alguma das actividades anteriormente relacionadas, o projecto contempla também serviços de duplicação, melhorias de traçado, ampliação, exigindo a construção de novos pavimentos.

Mesmo quando um pavimento não apresenta falhas estruturais significativas, é usual a adopção de algum reforço com o objectivo de readequar um pavimento (mesmo em estado aceitável) para uma nova demanda de tráfego. Em função do tráfego futuro estimado e da capacidade estrutural do pavimento existente, é possível definir a natureza e as características das medidas destinadas a suportar a nova demanda de tráfego (DNIT; 2006).

De acordo com Branco *et al.* (2005), em Portugal, a reabilitação estrutural dos pavimentos compreende a execução de uma ou mais camadas (de desgaste, de regularização, de base). Para a camada de desgaste são utilizadas técnicas comuns à reabilitação das características superficiais. No entanto, os materiais utilizados para as camadas de regularização e de base também são utilizados para o reperfilamento no caso da reabilitação funcional.

Os reforços envolvem a aplicação de camadas relativamente espessas em misturas betuminosas, eventualmente antecedidas de camadas de pré-regularização (reperfilamento) ou de operações de pré-regularização pontual de zonas muito deformadas.

A técnica designada por mistura betuminosa densa é utilizada em camadas de regularização e de base. Nos trabalhos preparatórios, além da pré-regularização, pode ser realizada a remoção por fresagem das camadas betuminosas nas áreas em que estas se apresentem instáveis ou em desagregação, com posterior reposição com misturas novas ou recicladas em central. Para

retardar o processo de propagação de fendas das camadas ligadas existentes, as técnicas mais empregadas são as seguintes: (i) aplicação de um geotextil impregnado em betume; (ii) aplicação de uma argamassa betuminosa incorporando betume modificado por polímeros em espessuras da ordem dos 2,0 cm.

Quanto ao tipo de reforço, em geral aplicam-se misturas betuminosas a quente, como os betões betuminosos. A mistura de aplicação mais recente e com características especiais tem sido o betão betuminoso de alto módulo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO, 1993. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Guide for Design of Pavement Structures: Appendix J – Analysis Unit Delineation by Cumulative Differences. AASHTO, Washington, D.C., USA.
- Branco, F.; Pereira, P.A.A.; Picado-Santos, L.G., 2005. Pavimentos Rodoviários. Edições Almedina, S.A., Portugal.
- Cenek, P.D.; Patrick, J.E., McGuire, J.F.; Robertson, D.A., 1994. New Zealand Experience in Comparing Manual and Automatic Pavement Condition Rating Systems. Third International Conference on Managing Pavements. Conference Proceedings 1. San Antonio, Texas, USA.
- Chowdhury, A.; Button, J.W.; Grau, J.D.C., 2001. Effects of SUPERPAVE Restricted Zone on Permanent Deformation. Report nº 201-2. Project nº ICAR 201. Texas Transportation Institute. Texas, USA.
- DNIT, 1994. TER 268 (Terminologia Rodoviária). Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), Rio de Janeiro, Brasil.  
Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)
- DNIT, 2003. TER 005 (Defeitos nos Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos – Terminologia). Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), Rio de Janeiro, Brasil.  
Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)
- DNIT, 2006. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, 2ª Edição. Ministério dos Transportes – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação IPR 720. Rio de Janeiro, Brasil.  
Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)

Freitas, E.F., 2004. Contribuição para o desenvolvimento de Modelos de Comportamento dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis – Fendilhamento com Origem na Superfície. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Grivas, D.A.; Shen, Y-C; Frosch, R.P.; Garrabrant, R., 1991. Functional Specifications of the Pavement Integrated Data Base System for Pavement Management. Transportation Research Record Nº 1311, Pavement Management. Washington, D.C., USA.

Haas, R., Hudson, W.R., Zaniewski, J., 1994. Modern Pavement Management. Malabar, Florida, Krieger Publishing Company, USA..

JAE, 1995. Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional. JAE (actual IEP), Almada, Portugal.

SHRP, 1993. SHRP – P – 338, Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Project. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C., USA.

Molenaar, A.A.A. & Potter, J., 1997. Assesment and Evaluation of Refection Crack Potential. Prevention of Reflective Cracking in Pavements, Rilem Report 18, E & FN SPON, London, UK.

Momm, L., 1998. Estudo dos Efeitos da Granulometria Sobre a Macrotextura Superficial do Concreto Asfáltico e seu Comportamento Mecânico. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Engenharia. São Paulo, Brasil.

Pereira, P.A.A: & Miranda, V., 1999. Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários. Universidade do Minho, Braga, Portugal.

Pereira, P.A.A. & Picado-Santos, L.G., 2002. Pavimentos Rodoviários. Universidade do Minho, Braga, Portugal.

Preussler, E.S. & Pinto, S., 2001. Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis. Editora Copiarte. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Sebaaly, P.E.; Lani, S.; Bemanian, S.; Cocking, C., 1997. Flexible Pavement Overlays: The State Experience. Transportation Research Board Record nº 1568 – Pavement Rehabilitation and Design. Washington, D.C., USA.

Sousa, J.B.; Craus, J.; Monismith, C.L., 1991. Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete. SHRP-A/IR-91-103. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C., USA.

Vanelstraete, A. & de Bondt, A.H., 1997. Crack Prevention and Use of Overlay Systems. Prevention of Reflective Cracking in Pavements, Rilem Report 18, E & FN SPON, London, UK.

White, T.D.; Fang, H.; Haddock, J.E., 2002. Flexible Pavement Layer Failure. Proceedings of the Third International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research. Amsterdam, The Netherlands.



## **Capítulo 3**

# **CARACTERIZAÇÃO E COMPORTAMENTO DE MISTURAS BETUMINOSAS**

### **3.1. INTRODUÇÃO**

As misturas betuminosas são compostas pela combinação de agregados minerais, filler e betume. Para que se tenha um adequado entendimento do comportamento das misturas betuminosas é necessário a caracterização individual dos componentes, um procedimento normalizado de como se processar a sua dosagem e a execução de ensaios de desempenho que possam indicar que a mistura terá um comportamento adequado em campo perante a acção do tráfego e do clima.

Este capítulo apresenta o estágio actual do conhecimento sobre o comportamento e o desempenho das misturas betuminosas.

### **3.2. AGREGADOS**

De acordo com o DNIT (2006<sub>A</sub>), os agregados utilizados na pavimentação podem ser classificados quanto à natureza, tamanho e distribuição dos grãos (granulometria).

Quanto à natureza das partículas, os agregados podem ser naturais quando constituídos de grãos oriundos da alteração das rochas pelos processos de intemperismo (seixos, areias) ou produzidos por processos de britagem (britas), ou artificiais em que os grãos são produtos ou subprodutos de processo industrial por transformação física e química do material (escória de alto forno, argila calcinada, argila expandida).

Quanto ao tamanho, os agregados são classificados da seguinte forma (DNIT, 2006<sub>A</sub>):

- agregado graúdo é o material retido no peneiro nº 10 (2,0 mm), britas, cascalhos e seixo;
- agregado miúdo é o material que passa no peneiro nº 10 (2,0 mm) e fica retido no peneiro nº 200 (0,075 mm), pó de pedra, areia;

- filer (material de enchimento) é o material que passa pelo menos 65% no peneiro nº 200 (0,075 mm), cal extinta, cimento Portland, pó de chaminé.

Os agregados graúdos, miúdos e material de enchimento são não-plásticos e inertes em relação aos demais componentes de uma mistura de agregados.

Em Portugal, a classificação dos agregados quanto à dimensão das partículas é a seguinte (LNEC, 1962):

- brita é o material cujo diâmetro equivalente ( $d_{eq}$ ) é superior a 30 mm e inferior a 150 mm;
- murraça são as partículas de diâmetro equivalente compreendido entre 15 mm e 30 mm;
- gravilha corresponde ao material granular cujas partículas têm um valor de diâmetro equivalente entre 5 mm e 15 mm;
- agregado fino é o material cujo diâmetro equivalente é inferior ou igual a 5 mm;
- filer corresponde às parcelas das partículas que têm um diâmetro equivalente inferior a 0,07 mm.

De acordo com a especificação E-233 (LNEC, 1969), para agregados finos as massas são fixadas em função da percentagem que passa nos peneiros de 4,76 mm (nº 4) e no peneiro de 2,00 mm (nº 10), sendo que para os agregados grossos, a massa é fixada de acordo com a máxima dimensão do agregado.

Quanto à granulometria, os agregados são classificados da seguinte forma DNIT (2006<sub>A</sub>):

- granulometria densa – aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com quantidade de material fino, suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores;
- granulometria aberta – aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com insuficiência de material fino, para preencher os vazios entre as partículas maiores;
- tipo macadame – aquele que possui partículas de um único tamanho (*one size aggregate*), ou seja, com uma granulometria uniforme onde o diâmetro máximo<sup>1</sup> é, aproximadamente, o dobro do diâmetro mínimo<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Diâmetro máximo de um agregado é a abertura da malha do menor peneiro na qual passam, no mínimo, 95%, do material.

<sup>2</sup> Diâmetro mínimo é a abertura da malha do maior peneiro na qual passam, no máximo, 5% do material.

A quantidade de agregado mineral utilizado em misturas betuminosas para pavimentação encontra-se geralmente entre 90 e 95% em massa ou entre 75 e 85% em volume e as suas características influenciam o desempenho dos pavimentos (Kandhal *et al.*, 1997; Janoo & Korhonen, 1999; Prowell *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2005).

Os agregados têm a função de conferir à mistura betuminosa um esqueleto mineral, ou seja, uma estrutura que forneça a estabilidade da mistura betuminosa. Isto pode ser alcançado através de melhores propriedades para os agregados (tamanho; forma; angularidade; textura; granulometria), considerando que a estrutura granular formada pelos agregados é directamente responsável pela resistência ao corte de uma mistura betuminosa. Além disto, as características físicas, químicas e mecânicas dos agregados possuem estreita relação com a origem geológica e mineralógica da rocha que os originou.

As especificações exigidas pelos organismos rodoviários para os agregados provenientes de explorações homogêneas são em geral as seguintes: (i) limpeza; (ii) dureza; (iii) reduzida alteração sob acção dos agentes climáticos; (iv) boa adesividade ao ligante; (v) qualidade uniforme; (vi) isenção de materiais decompostos, (vii) matéria orgânica ou outras substâncias prejudiciais.

### **3.2.1. Propriedades dos agregados**

As propriedades dos agregados (grossos e finos) utilizados em misturas betuminosas são essenciais para o desempenho do pavimento tais como resistência ao desgaste e deformação permanente (Janoo & Korhonen, 1999). Frequentemente as degradações de um pavimento como deformação permanente, desagregação superficial e a textura superficial são devidas ao uso e selecção inadequada de agregados (Kandhal *et al.*, 1997).

Os indicadores de qualidade dos agregados tanto na *American Society for Testing and Materials* (ASTM) como da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) para utilização em misturas betuminosas são avaliados através da medição das seguintes características: (i) tamanho e granulometria; (ii) limpeza; (iii) dureza; (iv) durabilidade; (v) textura; (vi) forma; (vii) absorção; (viii) afinidade ao ligante. Entretanto, estes ensaios não indicam claramente o desempenho do agregado em relação a degradações

como por exemplo a deformação permanente e resistência à derrapagem (Janoo & Korhonen, 1999).

Brosseaud *et al.* (1993) através de estudos desenvolvidos com o simulador de tráfego *Laboratoire des Ponts et Chaussées* (LPC) citam a influência de alguns parâmetros da mistura nomeadamente o volume de vazios, a angularidade e a curva granulométrica relacionados com o tipo de agregado, na variação da sensibilidade da mistura para a formação de rodeiras:

- o volume de vazios é um dos factores que mais influenciam a formação de rodeiras, sendo que para valores situados entre 3% e 7% a mistura torna-se mais estável. No estudo verificou-se que, para misturas ensaiadas, existe um nível óptimo de preenchimento intergranular pelo ligante onde a resistência à deformação permanente é alcançada pela imobilização efectiva dos grãos sem efeito lubrificante do ligante;
- a angularidade do agregado é outro factor determinante da resistência à deformação permanente. Verificou-se que a substituição, em uma mistura estável, de 28% de areia proveniente de britagem por areia natural, aumentou em mais de 50% a percentagem de rodeiras. Os estudos revelaram que em geral uma percentagem maior que 30% de areia no esqueleto mineral pode aumentar a sensibilidade da mistura à formação de rodeiras;
- a curva granulométrica exerce influência com algumas tendências, como: (i) uma redução em torno de 5% a fracção 0/2 mm há uma redução de 15 a 25% das rodeiras; (ii) o aumento da fracção grossa aumenta sistematicamente a resistência à formação de rodeiras.

Khandal *et al.* (1998) consideram importante caracterizar os finos de maneira a não comprometer o desempenho de uma mistura betuminosa em termos de fendilhamento por fadiga, resistência à deformação permanente e desagregação. As características dos agregados finos que influenciam o desempenho das misturas betuminosas são as seguintes:

- dependendo do tamanho da partícula, os finos podem actuar como um filer, que neste caso tende a aumentar a percentagem de betume da mistura, tendo como consequência o aparecimento de degradações como rodeiras e exsudações;
- alguns tipos de finos interagem com o betume tornando-o rígido, tendo como resultado uma mistura betuminosa mais sensível à fractura;
- alguns finos tornam a mistura betuminosa susceptível à acção da água, conduzindo à desagregação da mistura.

O Quadro 3.1 apresenta um resumo das principais propriedades dos agregados que afectam o desempenho das misturas betuminosas.

Quadro 3.1 – Propriedades dos agregados que afectam as misturas betuminosas

Propriedades	Afecta propriedades das misturas betuminosas	Recomendação
Forma	Estabilidade mecânica, imbricamento, atrito interno. Quebra durante a produção, compactação e confecção das misturas.	Utilização de agregados cúbicos e angulares ao invés de arredondados e lamelares.
Dureza	Resistência ao desgaste, esmagamento, desagregação e desintegração.	Utilização de agregados duros e resistentes.
Durabilidade	Quebra e desintegração.	Utilização de agregados resistentes.
Sensibilidade à água	Adesividade agregado-betume.	Utilização de agregados livres de materiais finos ou argila, natureza mineralógica.
Limpeza	Adesividade agregado-betume.	Utilização de agregados livres de materiais finos ou argila.
Massa volúmica	Relacionados à constituição das partículas dos agregados: densas ou impermeáveis; mais ou menos porosas.	Utilização de agregados com baixa baridade resulta em misturas menos resistentes.

As características de um agregado devem comprovar sua uniformidade. As características dos agregados que devem ser consideradas para sua utilização, de acordo com o DNIT (2006<sub>A</sub>), são: (i) granulometria; (ii) forma; (iii) absorção de água; (iv) resistência e dureza; (v) durabilidade; (vi) limpeza; (vii) adesividade ao ligante; (viii) baridade aparente; (ix) baridade real.

### 3.2.2. Ensaio de caracterização dos agregados

#### Granulometria

A granulometria do agregado é uma das características que contribuem para a estabilidade de uma mistura betuminosa, tendo em conta o atrito interno produzido pelo imbricamento das partículas, desde a mais grossa à partícula mais fina (DNIT, 2006<sub>A</sub>).

A análise granulométrica consiste na determinação das percentagens, em massa, das diferentes fracções constituintes dos agregados. Para as partículas com dimensões superiores a

0,075 mm (peneiro nº 200 da ASTM), o ensaio é realizado passando uma amostra por uma série de peneiras de malhas quadradas de dimensões padronizadas (ASTM). Pesam-se as quantidades retiradas em cada peneiro e calculam-se as percentagens que passam em cada peneira. A granulometria do material é representada através da curva granulométrica, na qual no eixo das abcissas é representado o diâmetro dos agregados (mm) em escala logarítmica e no eixo das ordenadas é representada a percentagem de material que passa.

### Índice de forma

A forma dos grãos de um agregado grosso é avaliada através do ensaio de forma, que consiste em determinar a percentagem de partículas lamelares e alongadas. Para cada tipo de camada do pavimento em que os agregados serão utilizados, as especificações limitam a quantidade, em percentagem, de agregados alongados e lamelares.

A forma caracteriza-se pelos índices de forma: índice de lamelação e índice de alongamento, traduzidos pela percentagem, em massa, de partículas respectivamente lamelares e alongadas. Para uma fracção granulométrica compreendida entre os peneiros de malhas de abertura “d” e “D”, designam-se partículas lamelares aquelas cuja espessura seja inferior a  $0,6 \times (d+D)/2$  e partículas alongadas as de comprimento superior a  $1,5 \times (d+D)/2$  (Branco *et al.*, 2005).

A Figura 3.1 apresenta os dispositivos utilizados para medição dos índices pela Norma Britânica BS 812 (1990).



Figura 3.1 – Dispositivos de medição do índice de forma (BS 812, 1990)

## Desgaste Los Angeles

A adequada resistência dos agregados grossos consiste na utilização de materiais duros, resistentes ao choque, ao atrito entre as suas próprias partículas e ao desgaste produzido pelo tráfego na superfície do pavimento. Em geral, a resistência caracteriza-se através da realização do ensaio de desgaste na máquina de Los Angeles (Branco *et al.*, 2005).

No Brasil, o ensaio Los Angeles (ou Abrasão Los Angeles) é extensamente utilizado para avaliar a resistência ao desgaste dos materiais granulares, sendo um parâmetro mecânico para auxiliar a quantificação da desagregação dos agregados grossos.

O Quadro 3.2 apresenta os valores usuais do ensaio de desgaste Los Angeles conforme o tipo de rocha que lhe deu origem (WSDOT, 2005).

Quadro 3.2 – Valores típicos de desgaste Los Angeles de acordo com o tipo de rocha  
(WSDOT, 2005)

Tipo de rocha	Desgaste Los Angeles (%)
Basalto	10 a 17
Dolomita	18 a 30
Gnaisse	33 a 57
Granito	27 a 49
Calcário	19 a 30
Quartzito	20 a 35

## Equivalente de areia

O valor de equivalente de areia (EA) é um parâmetro que permite avaliar a quantidade de matéria muito fina associada a materiais mais grosseiros, o que permite definir com rapidez se um agregado está limpo ou não (Branco *et al.*, 2005). A determinação do teor de finos utilizando o ensaio de Equivalente de Areia (NP EN 933-8, 2002) aplica-se a agregados naturais e finos da fracção 0/2 mm.

## **Determinação do valor de azul-de-metileno**

A adsorção do azul-de-metileno pelas partículas de um agregado é uma permuta iónica entre os catiões (de cálcio, sódio, magnésio ou potássio, por exemplo) existentes na superfície dessas partículas e os catiões resultantes da dissociação da molécula de azul-de-metileno em solução aquosa. Em consequência dessa troca iónica forma-se à volta da partícula uma camada monomolecular de azul-de-metileno (Branco *et al.*, 2005).

O ensaio permite medir a capacidade de adsorção do azul-de-metileno pelos elementos finos. O azul-de-metileno é preferencialmente adsorvido pelas argilas, pelos materiais orgânicos e pelos hidróxidos de ferro, sendo chamado “valor de azul” dos finos (0/2 mm), a quantidade exprimida em gramas de azul-de-metileno adsorvido por 100 g de finos (NF P 18-592, 1990).

O método de ensaio utilizado nesta investigação é o prescrito pela Norma Francesa AFNOR P-18-592, 1990 (Materiais Granulares, Ensaio de Azul-de-Metileno, Método da Mancha).

## **Adesividade**

A adesividade de um agregado ao ligante betuminoso é a propriedade que tem o agregado de ser aderido pelo material betuminoso. No Brasil, a avaliação da adesividade do agregado ao ligante é verificada, principalmente, através de dois ensaios: (i) agregados – adesividade a ligante betuminoso (DNER – ME 078, 1994) para agregados grossos; (ii) agregados – adesividade a ligante betuminoso (DNER – ME 079, 1994) para agregados finos.

No ensaio de adesividade a ligante betuminoso a agregados grossos, a adesividade é verificada pelo não deslocamento da película betuminosa que recobre o agregado, quando a mistura agregado-ligante é submetida, a 40 °C, à acção de água destilada, durante 72 horas (DNER – ME 078, 1994).

Para a avaliação da sensibilidade à água em misturas compactadas, foram desenvolvidos variados ensaios, como por exemplo, *Freeze-Thaw Pedestal Test*, ensaio de imersão estática (ASTM D 1664, 1980), ensaio Marshall com condicionamento, ensaio AASHTO T 283 (1989) ou Lottman Modificado.

Em misturas betuminosas não compactadas, para a avaliação da quantidade de betume que se separa dos agregados através da imersão em água, existem diversos ensaios, como por exemplo, de adesividade (imersão estática), o *Boling Water Test*, de imersão dinâmica e de imersão química.

No ensaio Lottman Modificado é avaliada a perda da resistência à tracção através de um processo de humidade induzida aplicado em provetes compactados com o soquete Marshall, com  $7\% \pm 1\%$  de volume de vazios, em que se aplica um número de golpes reduzido (em relação aos 75 estipulados) até que se atinja este patamar de vazios nas misturas betuminosas a serem ensaiadas.

A saturação dos provetes com água (55% a 80%) é realizada com uma bomba de vácuo, e um dessecador de vidro. O processo de saturação consiste em medir a massa inicial dos provetes e o volume de vazios. Assim, calcula-se a massa de água que deve ocupar os vazios do provete para atingir o grau de saturação exigida pelo método.

O provete é imerso em um dessecador com água e em seguida aplica-se o vácuo. Após 15 segundos, retira-se o corpo de prova da imersão e sua massa é determinada. Por comparação de massas é conhecido o grau de saturação que o provete atingiu. Caso não tenha atingido o mínimo de 55%, é retornado para a imersão e aumenta-se o tempo de permanência sob o vácuo.

Os provetes são então congelados à temperatura de aproximadamente  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por 16 horas, no mínimo. Após esta etapa, são conduzidos directamente a um banho-maria a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24 horas. Posteriormente, submetidos novamente a um banho-maria, porém, a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  e por 1 hora e, finalmente, ensaiados à tracção indirecta por compressão diametral.

Os ensaios também são executados sem o condicionamento dos provetes, onde a perda da resistência à tracção é avaliada pela razão entre os resultados obtidos com e sem condicionamento, como apresenta a Equação 3.1:

$$\text{RRT} = \frac{\text{RT}_1}{\text{RT}_2} \times 100 \quad (3.1)$$

onde:

RRT = resistência residual à tracção (%);

RT<sub>1</sub> = resistência à tracção não condicionada;

RT<sub>2</sub> = resistência à tracção condicionada.

São consideradas misturas com uma boa adesividade, aquelas cujo quociente obtido entre os valores da resistência à tracção das misturas condicionadas e não condicionadas (em percentagem), denominado de resistência residual à tracção (RRT), compreenderem um patamar de pelo menos 70% (Hicks, 1991). A metodologia norte-americana *Superior Performing Asphalt Pavements* (SUPERPAVE) recomenda valores acima de 80%.

A adesividade do agregado ao betume pode ser melhorada através da adição de aditivos químicos denominados melhoradores de adesividade, que actuam modificando as condições de interface entre o betume e os agregados e reforçando a ligação adesiva entre estes.

### **Massa volúmica, absorção e baridade**

A absorção de um agregado é avaliada através de ensaios de absorção de água e indica a quantidade de água que um agregado é capaz de absorver quando em contacto com a mesma. A determinação da absorção é realizada após imersão em água durante 24 horas expressa em percentagem em relação à massa de areia seca, caso de agregado fino (miúdo) ou em relação à massa de inerte seco, caso de agregado grosso (graúdo).

A massa volúmica de um agregado refere-se às partículas individuais e de acordo com o tipo de agregados, as partículas podem ser densas e impermeáveis, mais ou menos porosas ou o agregado pode ser constituído por misturas dos dois tipos. Cada partícula ainda pode conter poros, que podem ser inteiramente fechados e isolados do exterior ou ligados entre si e ao exterior (rede porosa).

Em Portugal, a determinação da absorção e diferentes massas volúmicas de um agregado grosso é normalizada através da NP 581 – Determinação das Massas Volúmicas e da Absorção de Água de Britas e Godos (1969). Para o agregado fino a norma utilizada é a NP 954 – Determinação das Massas Volúmicas e da Absorção de Água das Areias (1973). De acordo com estas normas, tem-se as seguintes definições:

- massa volúmica do material impermeável das partículas – quociente da massa da areia seca (ou do inerte seco) pelo volume do material das partículas mais o dos poros destas, nos quais a água não penetrou no fim de 24 horas de imersão;
- massa volúmica das partículas saturadas – quociente da massa de areia (ou do inerte) mais a da água por esta absorvida em 24 horas de imersão pelo volume do material das partículas mais o de todos os seus poros;
- massa volúmica das partículas secas – quociente da massa de areia seca (ou do inerte seco) pelo volume do material das partículas mais o de todos os seus poros.

Assim, a massa volúmica refere-se ao volume de uma partícula individual e, no conjunto do agregado, à soma dos volumes das partículas. No entanto, como fisicamente não é possível arranjar estas partículas de modo que não haja vazios entre elas, este número não serve para determinar o volume do agregado para uma amassadura<sup>3</sup>.

Quando se mede um volume de uma classe de agregado é necessário conhecer a massa do volume do agregado que enche uma medida ou recipiente com um volume unitário. Neste caso utiliza-se a baridade, para converter massas de agregado em volume de agregado e vice-versa. A baridade é a massa por unidade de volume aparente de forma que este volume aparente engloba os espaços entre as partículas e entre estas e o recipiente onde está contido.

### 3.2.3. Classificação e propriedades do filer

O DNIT especifica a granulometria do filer (material de enchimento) através da norma DNER – EM 367 (1997). Os materiais de enchimento utilizados para confecção de misturas betuminosas devem atender a granulometria, de acordo com o Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Granulometria do filer (DNER – EM 367, 1997)

Peneiro	% mínima passante
nº 40 (0,42 mm)	100
nº 80 (0,18 mm)	95 – 100
nº 200 (0,075 mm)	65 – 100

<sup>3</sup> Consiste na mistura dos agregados, material de enchimento e ligante (betuminoso ou hidráulico), com proporções definidas.

O Quadro 3.4 apresenta a especificação granulométrica do filer de acordo com a norma ASTM D 242 (1995).

Quadro 3.4 – Granulometria do filer (ASTM D 242, 1995)

Peneiro	% mínima passante
n° 30 (0,60 mm)	100
n° 50 (0,30 mm)	95 – 100
n° 200 (0,075 mm)	70 – 100

Os fileres podem ser provenientes dos agregados (fino ou grosso), sendo neste caso denominado filer natural. Assim, quando proveniente de outras fontes, como pó calcário, cal hidratada ou cimento Portland, a denominação utilizada é filer comercial ou artificial.

O uso da cal hidratada calcítica como filer em misturas betuminosas possui um efeito mais significativo, em comparação com o cimento ou com o pó de pedra. Isso porque a cal hidratada tem, em geral, 80% de partículas de tamanho menor ou igual a 0,02 mm, que interage com o ligante, aumentando seu ponto de amolecimento, reduzindo a susceptibilidade térmica e aumentando a resistência à deformação permanente. Por outro lado, o cimento tem uma distribuição muito mais contínua, com diâmetro médio de aproximadamente 0,06 mm. O pó de pedra, por sua vez, possui granulometria mais grossa com grande proporção de partículas maiores que 0,04 mm (Motta & Leite, 2000).

Quando a percentagem de material passante no peneiro n° 200 aumenta, reduz-se os vazios no esqueleto mineral, melhora-se a granulometria, e a trabalhabilidade da mistura betuminosa aumenta até certo ponto. Acima deste nível, quanto maior a percentagem passante na peneiro n° 200, os finos começam a prejudicar a estabilidade do esqueleto mineral, diminuindo os contactos entre as partículas grossas, alterando a capacidade de compactação (Motta & Leite, 2000).

A interacção filer/betume é um importante factor de caracterização do filer e de seus efeitos no comportamento das misturas betuminosas. Esta interacção depende da composição química do betume e também principalmente de características do filer como a composição mineralógica, textura superficial e superfície específica (Harris & Stuart, 1995).

De acordo com Ceratti *et al.* (2003), o índice proposto através da relação filer/betume da especificação SUPERPAVE, objectiva indicar a deficiência de “betume livre”, ou seja, aquela fracção não aderida aos agregados e que juntamente com o filer em suspensão forma o masticue, que actua na inibição do fendilhamento das misturas betuminosas, sendo esta deficiência caracterizada quando esta relação apresenta valores elevados, isto é, acima do limite máximo da escala de 0,6 a 1,2.

Em Portugal, para misturas betuminosas densas, quando a areia e o pó de granulação utilizados sejam de natureza granítica, deverá incluir obrigatoriamente uma percentagem ponderal de filer não inferior a 3,0% ou, por razões de adesividade betume-agregado, a junção de um aditivo apropriado ao ligante (Branco *et al.*, 2005).

De acordo as especificações do Caderno de Encargos JAE 1998, a relação ponderal filer/betume ( $R_{fb}$ ), para misturas betuminosas densas, deverá estar compreendida entre 1,1 a 1,5, caso se utiliza como filer a cal hidráulica.

A adição de filer calcário aumenta a resistência à deformação permanente tendo em conta o aumento da rigidez da mistura, como demonstrado pelo aumento do módulo dinâmico em misturas betuminosas com este material. A comparação do módulo dinâmico de 330 misturas estudadas, contendo ou não filer calcário, indicou que a adição deste material produziu um aumento de 25%, em média, do módulo dinâmico das misturas (NLA, 2001).

A adição de calcário nas misturas betuminosas não actua somente como um filer, mas melhora as propriedades referentes ao envelhecimento. A adição de 0,5% de filer calcário em misturas betuminosas reduz sensivelmente a oxidação destas misturas (Little & Epps, 2001).

### **3.3. BETUMES**

Os betumes, materiais aglutinantes de cor escura e constituídos por misturas complexas de hidrocarbonetos não voláteis de elevada massa molecular, são provenientes do petróleo, no qual estão dissolvidos e a partir do qual podem ser obtidos, seja pela evaporação natural de depósitos localizados na superfície terrestre (asfaltos naturais), seja por destilação em unidades industriais especialmente projectadas (IBP, 1999).

Os asfaltos naturais podem ocorrer em depressões da crosta terrestre, constituindo os lagos de betumes (Trinidad, nas Bermudas, e Lago Bermudez, na Venezuela), ou impregnando os poros de algumas rochas, formando as denominadas rochas betuminosas (gilsonita e asphaltita) (IBP, 1999).

O betume é tradicionalmente considerado como um sistema coloidal consistindo de micelas de asfaltenos de alta massa molecular dispersas ou dissolvidas em um meio oleoso de baixa massa molecular, que são os maltenos (Whiteoak, 2003). É um produto semi-sólido na temperatura ambiente, necessitando de aquecimento para ser misturado aos agregados, de modo que os agregados devem também ser aquecidos e a mistura betuminosa ser espalhada e compactada à quente.

O betume pode ser utilizado na temperatura ambiente. Entretanto, para espalhar e compactar a mistura na temperatura ambiente é necessário liquefazer o betume (Santana, 1992). O betume pode ser liquefeito das seguintes formas:

- aquecendo-o através em tanques adaptados com sistema de aquecimento;
- diluindo-o através de um solvente derivado do petróleo (nafta, querosene, óleo diesel); obtendo-se os asfaltos diluídos (ADs) ou betumes fluidificados;
- emulsificando-o através da água; obtendo-se as emulsões asfálticas (EAs) ou emulsões betuminosas.

As propriedades mais importantes dos betumes estão relacionadas com a sua aglutinação, impermeabilização, durabilidade e versatilidade de utilização. Os betumes possuem comportamento dependente do tempo de aplicação da carga e da temperatura. A durabilidade é a capacidade do material betuminoso de manter suas propriedades quando submetidos à acção do clima e carregamento, sendo caracterizada pela manutenção das suas qualidades coesivas, plásticas e pela resistência ao envelhecimento (DNIT, 2006<sub>A</sub>).

### **3.3.1. Classificação dos betumes**

A classificação ou especificação de um betume envolve a análise das suas características reológicas, físicas e químicas. A seguir são apresentadas resumidamente as especificações europeia, norte-americana, brasileira e portuguesa de classificação de betumes.

## Especificação Europeia

A norma europeia EN 12591 (1999) fornece as especificações dos betumes utilizados em pavimentação. Nesta norma, os betumes são classificados nos três seguintes grupos:

- graus designados pela penetração nominal a 25 °C de 20x0,1 mm a 330x0,1 mm, especificados pela penetração a 25 °C e ponto de amolecimento (Quadro 3.5);
- graus designados pela penetração nominal a 25 °C de 250x0,1 mm a 900x0,1 mm, especificados pela penetração a 15 °C e viscosidade dinâmica a 60 °C (Quadro 3.6);
- graus designados pela viscosidade cinemática a 60 °C para betumes moles (Quadro 3.7).

Quadro 3.5 – Especificações para o grau de penetração de 20x0,1 mm a 330x0,1 mm

Ensaio	Normas	Designação dos graus								
		20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220	250/330
Penetração 25 °C (0,1 mm)	EN 1426	20	20	35	40	50	70	100	160	250
		30	35	50	60	70	100	150	220	330
Ponto de amolecimento (°C)	EN 1427	55	52	50	48	46	43	39	35	30
		63	60	58	56	54	51	47	43	58
Resistência ao endurecimento a 163 °C (RTFOT)	EN 12607-1 ou EN 12607-2									
Perda de massa (%) máx.		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	1,0	1,0
Penetração retida (%) mín.		55	53	53	50	50	46	43	37	35
Ponto de amolecimento (°C) mín.	EN 1427	57	54	52	49	48	45	41	37	32
Ponto de fulgor (°C) mín.	EN 22592 (b)	240	240	240	230	230	230	230	220	220
Solubilidade (%) (m/m)	EN 12592	99	99	99	99	99	99	99	99	99

Quadro 3.6 – Especificações para o grau de penetração de 250x0,1 mm a 900x0,1 mm

Ensaio	Normas	Designação dos graus			
		250/330	330/430	500/650	650/900
Penetração 25 °C (0,1 mm)	EN 1426	70	90	140	180
		130	170	260	360
Viscosidade dinâmica a 60 °C (Pa.s) mín.	EN 12596	18,0	12,0	7,0	4,5
Viscosidade cinemática a 135 °C (mm <sup>2</sup> /s) mín.	EN 1427	100	85	65	50
Resistência ao endurecimento a 163 °C (RTFOT)	EN 12607-1 ou EN 12607-3				
Perda de massa (%) máx.		1,0	1,0	1,5	1,5
Penetração retida (%) mín.		4,0	4,0	4,0	4,0
Ponto de fulgor (°C) mín.	EN 22719	180	180	180	180
Solubilidade (%) (m/m)	EN 12592	99	99	99	99

Quadro 3.7 – Especificações para betumes moles

Ensaio	Normas	Designação dos graus			
		V1500	V3000	V6000	V12000
Viscosidade cinemática a 60 °C (mm <sup>2</sup> /s) mín.	EN 12595	1000	2000	4000	8000
		2000	4000	8000	16000
Ponto de fulgor (°C) mín.	EN 22719	160	160	180	180
Solubilidade (%) (m/m)	EN 12592	99	99	99	99
Resistência ao endurecimento a 120 °C (TFOT <sup>4</sup> )	EN 12607-2				
Perda de massa (%) máx.		2,0	1,7	1,4	1,0
Penetração retida (%) mín.		3,0	3,0	2,5	2,0

Os ensaios mais utilizados para classificação dos betumes são os seguintes:

- EN 1426 – *Bitumen and bituminous binders – Determination of needle penetration;*
- EN 1427 – *Bitumen and bituminous binders – Determination of softening point – Ring and Ball method;*
- EN 12592 – *Bitumen and bituminous binders – Determination of solubility;*
- EN 12595 – *Bitumen and bituminous binders – Determination of kinematic viscosity;*
- EN 12596 – *Bitumen and bituminous binders – Determination of dynamic viscosity by vacuum capillary;*
- EN 12607-1 – *Bitumen and bituminous binders – Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air – Part 1: RTFOT method;*
- EN 12607-2 – *Bitumen and bituminous binders – Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air – Part 2: TFOT method;*
- EN 22719 – *Petroleum products and lubricants – Determination of flash point – Pensky-Martens closed cup method (ISO 2719, 1988).*

### Especificação Norte-americana

A partir de 1987 foi criado, nos Estados Unidos, o *Strategic Highway Research Program* (Programa SHRP) com o objectivo de desenvolver métodos de análise de materiais e de misturas betuminosas com base em propriedades fundamentais (módulo, fadiga e deformação permanente). Concluído em 1993, os produtos obtidos deste projecto foram enquadrados em quatro categorias gerais: (i) novos materiais; (ii) novos ensaios; (iii) novos equipamentos; (iv) novas especificações.

<sup>4</sup> TFOT – *Thin Film Oven Test* – Ensaio de envelhecimento (ASTM D 1754, 1983)

Os resultados dos estudos de materiais betuminosos do Programa SHRP foram agrupados e patenteados sob a denominação SUPERPAVE, que consiste de novas especificações para betumes e misturas betuminosas, baseadas em modelos de desempenho empírico-mecanicista.

As especificações SUPERPAVE para materiais betuminosos têm base em propriedades directamente relacionadas com o desempenho dos pavimentos em serviço, de modo que para cada zona climática, são estabelecidas temperaturas máximas e mínimas de projecto. Assim, os tradicionais ensaios de consistência (penetração e viscosidade) para classificação dos betumes não são considerados nesta metodologia.

A metodologia SUPERPAVE classifica os ligantes em graus de desempenho, designados pela sigla PG (*Performance Grade*), seguidos de dois numerais. Por exemplo, o betume classificado como PG 64-22, o primeiro número, 64, representa o grau de desempenho a alta temperatura, indicando que o ligante apresenta propriedades físicas adequadas para locais nos quais a temperatura máxima observada nos pavimentos seja de até 64 °C. O número -22 representa o grau de desempenho a baixa temperatura, indicando que o ligante possui suas propriedades adequadas em pavimentos até temperaturas de -22 °C.

De acordo com o *Asphalt Institute* (AI, 1994), são indicados no Quadro 3.8 a classificação SUPERPAVE dos betumes através desta metodologia.

Quadro 3.8 – Classificação SUPERPAVE para betumes

Graus a altas temperaturas (°C)	Graus a baixas temperaturas (°C)
PG 46	-34, -40, -46
PG 52	-10, -16, -22, -28, -34, -40, -46
PG 58	-16, -22, -28, -34, -40
PG 64	-10, -16, -22, -28, -34, -40
PG 70	-10, -16, -22, -28, -34, -40
PG 76	-10, -16, -22, -28, -34
PG 82	-10, -16, -22, -28, -34

A temperatura máxima do pavimento é calculada através da média de sete dias consecutivos de máxima temperatura do ar, transformada em temperatura medida a 20 mm no interior da camada betuminosa, enquanto que a temperatura mínima é definida como a menor temperatura do ar da região. Também são levadas em conta a latitude e a temperatura do ar da

região. A temperatura mínima do pavimento é a mínima temperatura do ar, a ser determinada através de um banco de dados de temperaturas da região, enquanto que a temperatura máxima é calculada de acordo com a Equação 3.2 (Bernucci *et al.*, 2007).

$$T_{\text{máx } 20\text{mm}} = T_{\text{máx ar}} - \left(0,00618 \times \text{LAT}^2 + 0,2289 \times \text{LAT} + 42,2\right) \times (0,9545) - 17,78 \quad (3.2)$$

onde:

$T_{\text{máx } 20\text{mm}}$  = temperatura máxima de projecto do revestimento betuminoso à profundidade de 20 mm, abaixo da superfície (°C);

$T_{\text{máx ar}}$  = média das temperaturas máximas do ar dos sete dias consecutivos mais quentes do ano (°C);

LAT = latitude da região (°);

Na metodologia SUPERPAVE, as propriedades físicas são medidas para avaliar o comportamento dos betumes virgens durante o transporte, armazenagem e manuseio e, também, após o envelhecimento. O envelhecimento do betume é simulado através dos seguintes ensaios:

- RTFOT (*Rolling Thin-Film oven Test*) para reproduzir o envelhecimento durante a produção em central (usinagem) e aplicação da mistura;
- PAV (*Pressure Aging Vessel*) para simular o envelhecimento do betume durante a vida em serviço de um pavimento (neste ensaio, utiliza-se a amostra envelhecida no RTFOT).

As propriedades dos betumes através da metodologia SUPERPAVE são obtidas através de ensaios realizados nos seguintes equipamentos:

- reómetro de cisalhamento dinâmico – DSR (*Dynamic Shear Rheometer*);
- viscosímetro rotacional (*Rotational Viscosimeter*);
- reómetro de viga à flexão – BBR (*Bending Beam Rheometer*);
- prensa de tracção Directa – DTT (*Direct Tension Test*).

O reómetro de cisalhamento dinâmico (DSR) é utilizado para caracterizar as propriedades viscoelásticas dos betumes virgens e envelhecidos (Figura 3.2). O equipamento é composto de duas placas paralelas, sendo uma fixa e outra oscilante. A amostra de betume é colocada entre as placas e submetida a esforços de corte com frequência de 1,59 Hz. A caracterização do

comportamento viscoso e do elástico é feita através da medida do módulo de corte complexo ( $G^*$ ) e do ângulo de fase ( $\delta$ ). Este assunto será abordado na reologia dos betumes (item 3.3.3).

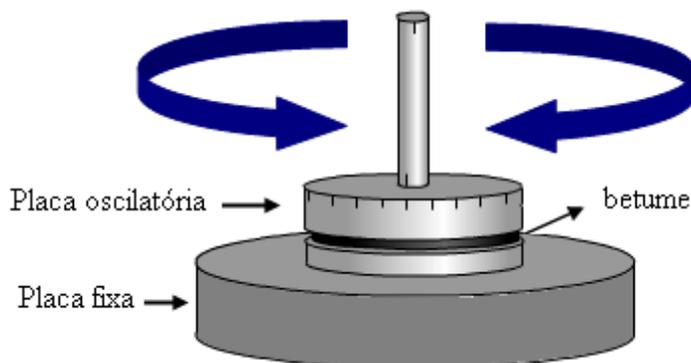


Figura 3.2 – Equipamento reómetro de cisalhamento dinâmico (DSR)

O controlo da viscosidade é realizado para assegurar que um betume seja fluido o suficiente para ser bombeado e misturado com os agregados. O ensaio para determinar a viscosidade dos betumes utiliza um viscosímetro rotacional do tipo Brookfield, que mede a viscosidade aparente através do torque necessário para rodar um veio (haste ou *spindle*) imerso na amostra de betume quente, à velocidade constante (Figura 3.3). De acordo com a especificação SUPERPAVE, a viscosidade rotacional deve ser inferior a  $3 \text{ Pa}\cdot\text{s}^5$  (a  $135 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

O reómetro de viga à flexão (BBR) é utilizado para caracterizar o betume à baixa temperatura. Neste ensaio é medida a deflexão no ponto médio de uma viga prismática de betume (virgem ou envelhecido), simplesmente apoiada, submetida a carregamento constante, aplicado no meio do vão, por 240 s (Figura 3.4).

Os betumes são previamente submetidos ao envelhecimento no PAV (*Pressure Aging Vessel*). A temperatura de ensaio é controlada e depende das temperaturas mínimas na região onde será construído o pavimento. Os gráficos de carga e de deflexão versus tempo de carregamento são usados para a determinação da rigidez  $S$  e do módulo de relaxação  $m$  (*creep rate*), que representa a variação da rigidez em função do tempo de carregamento,  $S(t)$ .

<sup>5</sup> A unidade de viscosidade no Sistema Internacional (SI) é o Pascal-segundo (Pa.s). No sistema CGS (Centímetro-Grama-Segundo), a unidade é Poise, e é equivalente a  $0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . O centipoise (cP) é equivalente ao milipascal segundo (mPa.s) e é frequentemente utilizado como unidade de viscosidade.

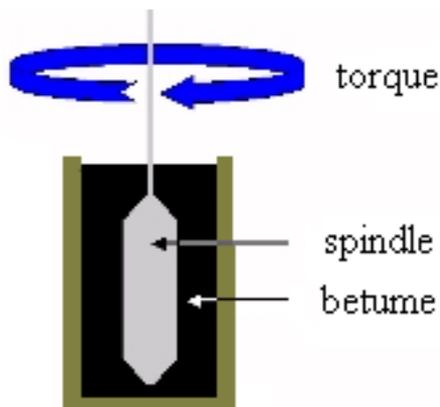


Figura 3.3 – Esquema do ensaio de viscosidade aparente com viscosímetro Brookfield

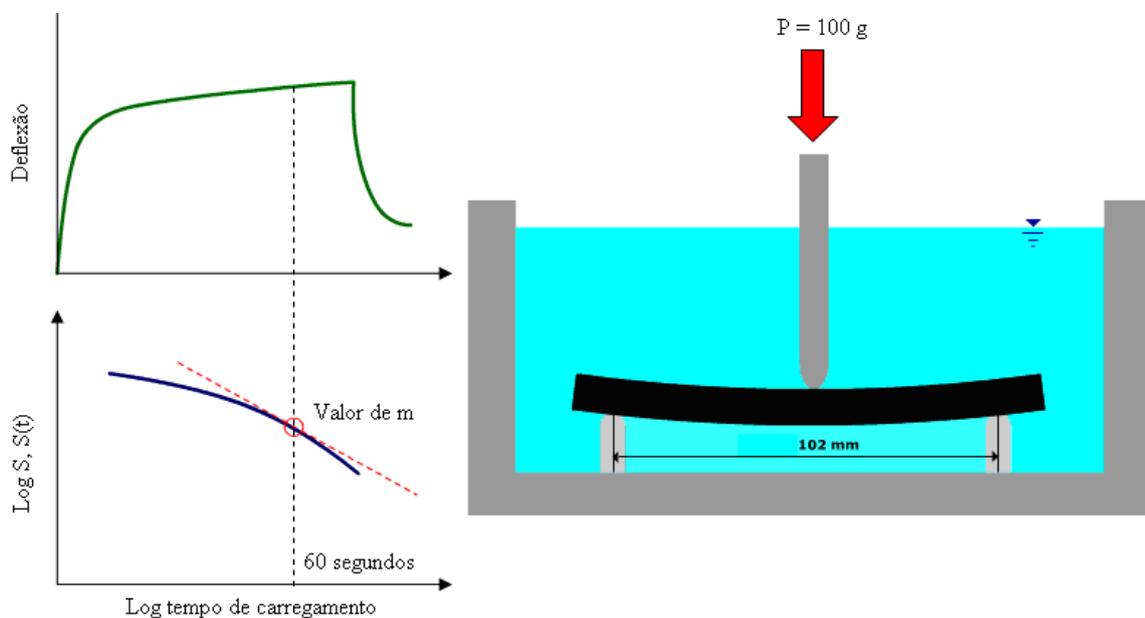


Figura 3.4 – Ensaio com reómetro de viga à flexão (BBR)

A especificação SUPERPAVE recomenda que o valor da rigidez no ensaio BBR seja menor que 300 MPa a 60 segundos. Analogamente, ligantes com altos valores de  $m$  são mais eficientes na dissipação das tensões formadas durante a contracção do betume quando a temperatura do pavimento cai abruptamente, minimizando a formação de fendas. De acordo com a especificação SUPERPAVE, o  $m$ , calculado para um tempo  $t = 60$  s, deve ser maior ou igual a 0,30 (AI, 1994).

Alguns betumes, como os modificados, podem apresentar rigidez a baixa temperatura maior que o especificado, sem contudo, apresentar fendilhamento tendo em conta a capacidade de se deformar sem romper. O ensaio de tracção directa (DTT) avalia a ductilidade dos betumes a

baixas temperaturas e consiste em estirar uma amostra de betume previamente submetidas ao envelhecimento de longo prazo, em temperatura controlada, até o seu rompimento, como mostrado na Figura 3.5. A deformação de ruptura deverá ser maior ou igual a 1%.

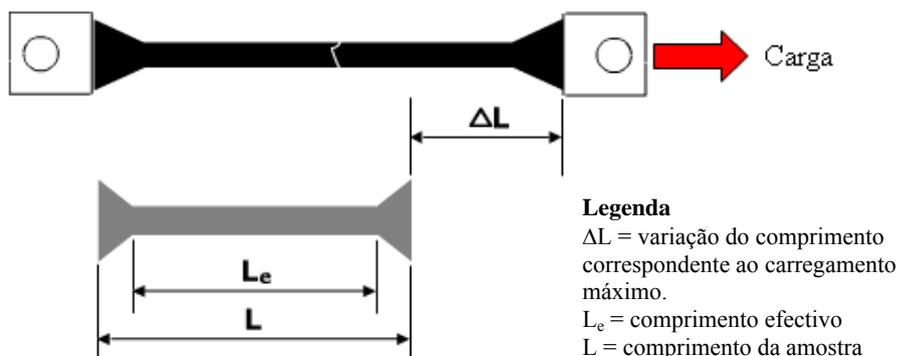


Figura 3.5 – Esquema do ensaio de tracção directa (DTT)

O Quadro 3.9 apresenta parte da especificação SUPERPAVE para betumes (Bernucci *et al.*, 2007).

Quadro 3.9 – Especificação SUPERPAVE para betumes (parte)

Ensaio	Grau de desempenho											
	PG 64 -10 -16 -22			PG 70 -10 -16 -22			PG 76 -10 -16 -22			PG 82 -10 -16 -22		
Betume virgem												
Viscosidade aparente Brookfield (máx. 3000 cP) (°C)	135											
Ponto de Fulgor (°C)	230											
Cisalhamento dinâmico (10 rad/s; G*/senδ mín. 1,0 kPa) (°C)	64			70			76			82		
Após RTFOT												
Variação em massa (%)	< 1											
Cisalhamento dinâmico (10 rad/s; G*/senδ mín. 1,0 kPa) (°C)	64			70			76			82		
Após RTFOT/PAV												
Cisalhamento dinâmico (10 rad/s; G*/senδ mín. 5,0 kPa) (°C)	31	28	25	34	31	28	37	34	31	40	37	34
Fluência (BBR) (60 s) (°C), Coeficiente angular, m (mín. 0,3)	0	6	12	0	6	12	0	6	12	0	6	12
Módulo de rigidez, S (máx. 300 MPa)	0	6	12	0	6	12	0	6	12	0	6	12
Alongamento na ruptura (°C) mín. 1,0%, 1,0 mm/min	0	6	12	0	6	12	0	6	12	0	6	12

### Especificação brasileira

No Brasil os cimentos asfálticos do petróleo têm o símbolo CAP (Cimento Asfáltico do Petróleo) que deve preceder às indicações de vários tipos, conforme sua classificação por penetração, de acordo com o especificado pela norma DNIT – EM 095 (2006).

Até 2005, os betumes produzidos e comercializados no Brasil eram classificados pela penetração ou por viscosidade<sup>6</sup>. Os betumes classificados por viscosidade seguiam a norma DNER – EM 204 (1995). A partir de 2006, a classificação mudou para penetração e os betumes passaram a seguir o prescrito na norma DNIT – EM 095 (2006). Ainda, até 2005, somente as refinarias Landulpho Alves (RLAM, no Estado da Bahia) e ASFOR (Asfaltos Fortaleza, no Estado do Ceará) utilizavam a classificação por penetração, sendo que nas demais refinarias brasileiras a classificação era feita por viscosidade.

Os Quadros 3.10 e 3.11 apresentam as classificações dos betumes no Brasil, por penetração e por viscosidade, vigentes até 2005, respectivamente. O Quadro 3.12 apresenta as actuais especificações dos cimentos asfálticos brasileiros, classificados por penetração (DNIT - EM 095, 2006).

Quadro 3.10 – Classificação por penetração (100 g; 5 s; 25 °C)

Betume (CAP)	Penetração (0,1 mm)
30/45	30 a 45
50/60	50 a 60
85/100	85 a 100
150/200	150 a 200

Quadro 3.11 – Classificação por viscosidade a 60 °C

Betume (CAP)	Viscosidade (poise)
7	700 a 1500
20	2000 a 3500
40	4000 a 8000

<sup>6</sup> A especificação dos cimentos asfálticos do petróleo (CAP), vigente de 1992 (Portaria do Departamento Nacional de Combustível DNC – 5 de 19/02/1993) até Julho de 2005, separava em duas famílias de ligantes, os especificados por penetração e os especificados pela viscosidade, conforme apresentado nos Quadros 3.10 e 3.11. Em Julho de 2005 foi aprovada pela Agência Nacional de Petróleo, Gás e Energia (ANP) uma nova especificação de CAP para todo o Brasil, em substituição às anteriores, que baseia-se na penetração e em ensaios, de acordo com o Quadro 3.12. O DNIT implementou a nova especificação em 2006, através da norma DNIT – EM 095, 2006. No início desta investigação, Setembro de 2004, o CAP ainda era especificado pela norma DNER – EM 2004, 1995.

Quadro 3.12 – Especificação do CAP – classificação por penetração (DNIT – EM 095, 2006)

Características	Unidade	Especificações				Métodos		
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200	DNER (ME)	ABNT (NBR)	ASTM
Penetração (100 g; 5 s; 25 °C)	0,1 mm	30 45	50 70	85 100	150 200	003/99	6576	D 5
Ponto de amolecimento (mín.)	°C	52	46	43	37		6560	D 36
Viscosidade <i>Saybolt Furol</i>	s					004/94	14950	E 102
135 °C, mín.		192	141	110	80			
150 °C, mín.		90	50	43	36			
177 °C		40-150	30-150	15-60	15-60			
OU								
Viscosidade Brookfield								
135 °C, sp <sup>(i)</sup> 21, 20 rpm <sup>(ii)</sup> , mín.	cP	374	274	214	155		15184	D 4422
150 °C, sp <sup>(i)</sup> 21, mín.	cP	203	112	97	81			
177 °C, sp <sup>(i)</sup> 21	cP	76-285	57-285	28-114	28-114			
Índice de Susceptibilidade Térmica		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)			
Ponto de Fulgor, mín.	°C	235	235	235	235	149/94	11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% em massa	99,5	99,5	99,5	99,5	153/94	14855	D 2042
Ductilidade a 25 °C, mín.	cm	60	60	100	100	163/98	6293	D 113
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min.								D 2878
Variação em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5			
Ductilidade a 25 °C, mín.	cm	10	20	50	50	163/98	6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8		6560	D 36
Penetração retida, mín.	%	60	55	55	50	003/99	6576	D 5

Observações referentes ao Quadro 3.12:

- (i) sp – *spindle* (veio em português);  
(ii) rpm – rotações por minuto.

De acordo com a norma DNIT – EM 095 (2006), o índice de susceptibilidade térmica, a variação em massa e a penetração retida são calculados como segue.

O índice de susceptibilidade térmica é calculado através da Equação 3.3:

$$IS = \frac{(500) \times (\log PEN) + (20) \times (t) - 1951}{120 - (50) \times (\log PEN) + (t)} \quad (3.3)$$

onde:

IS = índice de susceptibilidade térmica;

PEN = valor da penetração (0,01 mm);

t = temperatura do ponto de amolecimento (°C).

A variação em massa, em percentagem, é definida através da Equação 3.4:

$$M = \left( \frac{M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}}}{M_{\text{inicial}}} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

onde:

M = variação em massa (%);

M<sub>inicial</sub> = massa do betume antes do ensaio RTFOT (g);

M<sub>final</sub> = massa do betume após o ensaio RTFOT (g).

A penetração retida é definida através da Equação 3.5:

$$PEN_{\text{retida}} = (PEN_{\text{final}} - PEN_{\text{inicial}}) \times 100 \quad (3.5)$$

onde:

PEN<sub>retida</sub> = penetração retida (%);

PEN<sub>inicial</sub> = penetração antes do ensaio RTFOT (0,01 mm);

PEN<sub>final</sub> = penetração após o ensaio RTFOT (0,01 mm).

### **Especificação portuguesa**

Em Portugal, as características do betume seguem a especificação E-80 (LNEC, 1997). O boletim de ensaios, que acompanha o fornecimento de betumes, deverá sempre indicar as temperaturas a que o material apresenta viscosidades de  $170 \pm 20$  cSt e de  $280 \pm 30$  cSt (Aporbet, 1996).

As duas propriedades consideradas mais importantes para a caracterização de um betume são a penetração e a temperatura de amolecimento. Apesar de se tratar de ensaios empíricos para avaliação da viscosidade, é possível estimar outras propriedades importantes com base naquelas duas, tais como as temperaturas que o ligante atinge consistência pretendida (Branco *et al.*, 2005). O Quadro 3.13 apresenta as especificações para os betumes, de acordo com especificação E-80 (LNEC, 1997).

Quadro 3.13 – Tipos de betumes de pavimentação (LNEC, 1997)

Propriedades (Condições de ensaio)		Tipos de betumes e exigências de conformidades								
		Tipos	10/ 20	20/ 30	35/ 50	50/ 70	70/ 100	100/ 150	160/ 220	250/ 330
Penetração (0,1 mm) [25 °C; 100 g; 5 s]	mín.	10	10	35	50	70	100	160	250	
	máx.	20	30	50	70	100	150	220	330	
Temperatura de amolecimento Método anel e bola (°C)	mín.	63	55	50	46	43	39	35	30	
	máx.	76	63	58	54	51	47	43	38	
Viscosidade cinemática (mm <sup>2</sup> /s) [135 °C]	mín.	10 <sup>3</sup>	530	370	295	230	175	135	100	
Solubilidade em tolueno ou xileno (%)	mín.	99	99	99	99	99	99	99	99	
Temperatura de inflamação (°C)	mín.	250	240	240	230	230	230	220	220	
Resistência ao endurecimento	Varição de massa (% , ±)	máx.	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	1,0	1,0
	Penetração (% p.o <sup>(i)</sup> ) [25 °C; 100 g; 5 s]	mín.	60	55	53	50	46	43	37	35
	Temp. amolecimento (°C)	mín.	65	57	52	48	45	41	37	32
	Aumento da temperatura de amolecimento (°C)	máx.	8	10	11	11	11	12	12	12

Observação referente ao Quadro 3.13:

(i) % da penetração original.

Em Portugal, a susceptibilidade térmica dos betumes é calculada através do Índice de Penetração (Shell, 2003). A Equação de Pfeiffer e Van Doormaal (Equação 3.6) expressa o Índice de Penetração, que relaciona os parâmetros penetração e de ponto de amolecimento definido nos ensaios:

$$IPen = \frac{20TAB + 500 \times \logpen25 - 1955,55}{TAB - 50 \times \logpen25 + 120,15} \quad (3.6)$$

onde:

IPen = índice de penetração;

TAB = valor do ponto de amolecimento (método anel e bola), (°C);

pen25 = valor da penetração obtida no ensaio de penetração a 25 °C (100 g, 5s), (0,01 mm).

O índice de penetração dos betumes situa-se entre -3 para betumes muito susceptíveis termicamente e 7 para betumes pouco susceptíveis termicamente (Shell, 2003).

O Quadro 3.14 apresenta os métodos de ensaio para caracterização dos betumes em Portugal, de acordo com a especificação E-80 (LNEC, 1997) (Branco *et al.*, 2005).

Quadro 3.14 – Métodos de ensaio de betumes (Branco *et al.*, 2005)

Propriedades		Métodos de ensaio	
Penetração 25 °C; 100 g; 5 s		ASTM D 5	
Temperatura de amolecimento (Método anel e bola)		ASTM D 36	
Viscosidade cinemática 135 °C		ASTM D 2170	
Solubilidade em tolueno ou xileno (%)		ASTM D 2042 <sup>(i)</sup>	
Temperatura de inflamação (Vaso aberto de Cleveland)		EN 22592 ASTM D 92	
Resistência ao endurecimento	Varição de massa	RTFOT (ASTM D 2872)  ou TFOT: (ASTM D 1754)	-
	Penetração, 25 °C; 100 g; 5 s		ASTM D 5
	Temperatura de amolecimento (Método anel e bola)		ASTM D 36
	Aumento da temperatura de amolecimento <sup>(ii)</sup> (Met. anel e bola)		ASTM D 36

Observações referentes ao Quadro 3.14:

(i) O ensaio de solubilidade é realizado com tolueno ou xileno em substituição ao tricloroetileno;

(ii) O aumento de temperatura de amolecimento representa o valor obtido através da diferença entre a temperatura de amolecimento antes e depois do endurecimento.

### Outras considerações

O ensaio de penetração isoladamente não caracteriza perfeitamente a qualidade do betume mas fornece uma indicação do seu grau de dureza, de modo a ser utilizado nas especificações como um parâmetro de classificação.

Uma propriedade importante do betume asfáltico é a viscosidade, já que quantifica a consistência do ligante a uma dada temperatura, permitindo avaliar qual o intervalo de temperaturas em que é possível, por exemplo, manipular um ligante em boas condições (Branco *et al.*, 2005).

Para os betumes classificados por viscosidade, a temperatura ideal de aquecimento do betume para a confecção de uma mistura betuminosa corresponde a uma viscosidade do betume de  $85 \pm 10$  segundos preconizada em especificação (DNIT, 2006<sub>A</sub>).

De acordo com o manual da Shell (2003), durante a produção de misturas betuminosas, o betume deve ter uma viscosidade ideal para recobrimento dos agregados, fabrico e

compactação. As viscosidades do betume devem estar compreendidas entre os seguintes valores: (i) mistura: 0,2 Pa.s; (ii) compactação: entre 2 e 20 Pa.s.

### 3.3.2. Envelhecimento dos betumes

O fenómeno da oxidação do betume, que acontece devido à reacção das moléculas com o oxigénio do meio ambiente, o torna mais rígido e, por conseguinte, mais susceptível ao fendilhamento térmico e por fadiga. Na prática, uma considerável parcela de enrijecimento por oxidação e perda de voláteis ocorre antes mesmo do betume ser aplicado, durante os processos de mistura, transporte e compactação. Durante o processo de mistura e transporte da massa, devido ao delgado filme de ligante que recobre o agregado pré aquecido, a oxidação ocorre em taxas bastante expressivas (Spech, 2004).

Durante o processo de envelhecimento ocorre normalmente uma diminuição do teor de aromáticos, que se transforma em resina, que por sua vez, parte se transforma em asfaltenos. Ao final do processo ocorre pequena ou nenhuma variação do teor de saturados e resinas, diminuição do teor de aromáticos e aumento no teor de asfaltenos (Tonial, 2001).

Chipperfield *et al.* (1970) avaliou as mudanças dos componentes químicos dos betumes (aromáticos, saturados, resinas e asfaltenos) em termos de Índice de Envelhecimento (relação entre a viscosidade do betume recuperado,  $\eta_r$ , e a viscosidade inicial do ligante,  $\eta_o$ , a 25 °C) durante o fabrico, aplicação e em serviço, como apresentado na Figura 3.6.

De acordo com a Figura 3.6, as mudanças mais significativas na viscosidade do betume estão associadas ao fabrico, e também se pode observar que o teor de asfaltenos aumenta significativamente durante o fabrico da mistura e depois, gradualmente ao longo do tempo. O teor de resinas e aromáticos decresce com o tempo. Estas observações são corroboradas por Whiteoak (2003), como mostrado na Figura 3.7, na qual o Índice de Envelhecimento é representado pela razão  $\eta_a/\eta_o$ , onde  $\eta_a$  representa a viscosidade em uma dada condição de envelhecimento e  $\eta_o$ , representa a viscosidade inicial do betume.

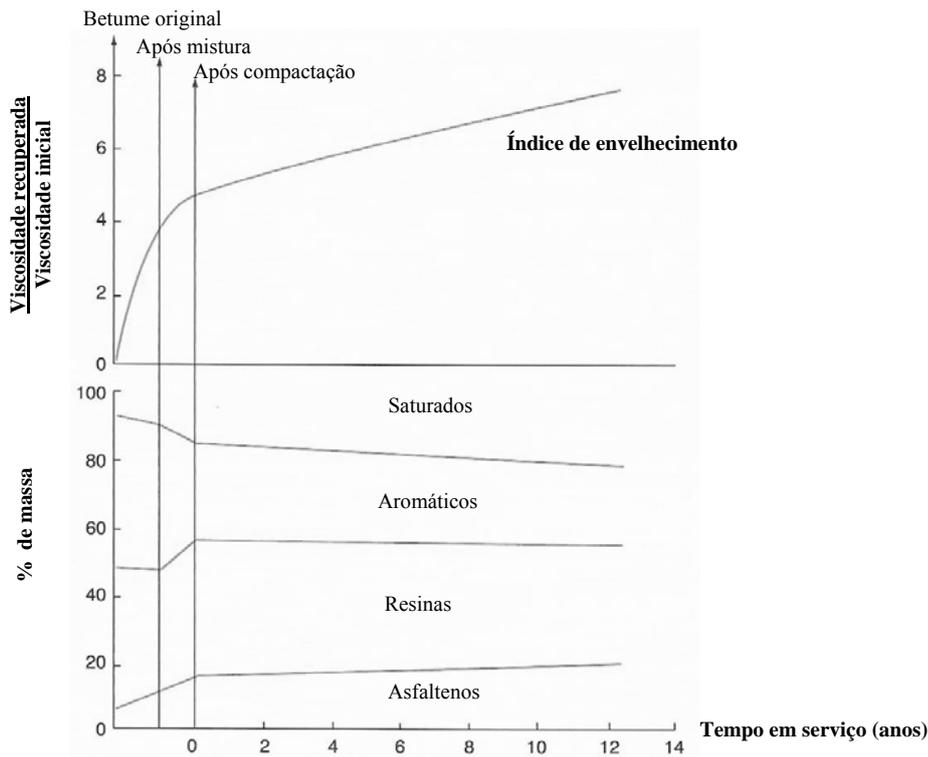


Figura 3.6 – Alterações na composição química do betume após o fabrico, aplicação e durante a vida em serviço (adaptado de Shell, 2003)

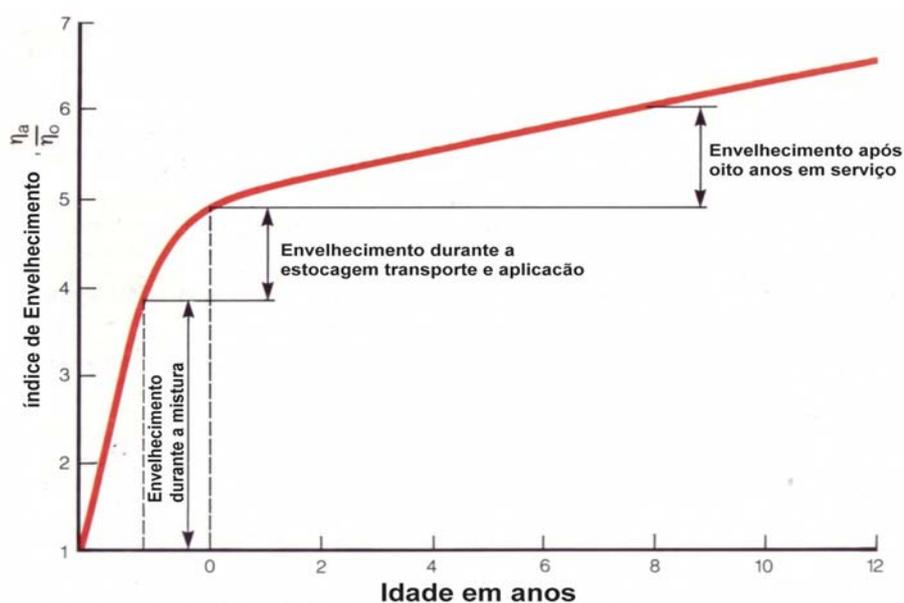


Figura 3.7 – Envelhecimento do betume desde a produção da mistura betuminosa até a vida em serviço (Whiteoak, 2003)

De acordo com a Figura 3.7, o envelhecimento do betume durante as etapas de fabrico, espalhamento e compactação da mistura betuminosa até à vida em serviço como uma camada de pavimento ocorre nas três seguintes etapas:

- 1ª etapa – ocorre no fabrico da mistura betuminosa e representa aproximadamente 60% do envelhecimento total sofrido pelo betume;
- 2ª etapa – ocorre durante o armazenamento (comum em centrais norte-americanas de grande porte, mas não no Brasil), transporte, espalhamento e compactação, representando aproximadamente 20% do envelhecimento total sofrido pelo betume;
- 3ª etapa – o envelhecimento ocorre durante a vida útil, como camada betuminosa e se dá devido à acção do meio ambiente, representando aproximadamente 20% do envelhecimento total sofrido pelo betume.

Na metodologia SUPERPAVE, o ensaio utilizado para avaliar o envelhecimento do betume a curto prazo é o RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) e a longo prazo, o PAV (*Pressure Aging Vessel*).

O ensaio RTFOT simula de forma efectiva o envelhecimento do ligante no fabrico e compactação da mistura. Este ensaio é realizado em uma estufa eléctrica especial com circulação de ar (4 litros por minuto) onde amostras com  $35 \pm 0,5$  g de ligante virgem são colocadas em recipientes cilíndricos abertos e aquecidas a  $163 \text{ }^\circ\text{C}$  por  $80 \pm 5$  minutos em um suporte rotativo. Em seguida as amostras são resfriadas à temperatura ambiente, pesadas e, então, é calculada a perda de massa das amostras. A perda de massa em estufa de filme delgado rotativo determina a perda de voláteis durante o processo de mistura e aplicação. Alguns betumes podem ganhar massa durante o processo devido à oxidação do betume. A norma do ensaio RTFOT é a ASTM D2872 (1997).

O PAV (*Pressure Aging Vessel*) ou vaso de envelhecimento sob pressão é preconizado pela norma ASTM D 6521 (2005) e simula o endurecimento oxidativo que ocorre no betume ao longo da vida útil do pavimento, em até 15 anos. Após envelhecidas no RTFOT, as amostras de 50 g de betume são submetidas a uma pressão de 2070 kPa durante vinte horas e as temperaturas de ensaio utilizadas são de  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3.3.3. Reologia dos betumes

Reologia é a parte da física que investiga as propriedades e o comportamento mecânico de corpos que sofrem uma deformação (sólidos elásticos) ou um escoamento (fluido-líquido ou gás) devido à ação de uma tensão de corte. Muitos sistemas, principalmente os de natureza coloidal, apresentam um comportamento intermediário entre esses dois extremos, apresentando tanto características viscosas como elásticas. Esses materiais são chamados de viscoelásticos, como por exemplo os betumes, os plásticos e os pigmentados (Shaw, 1975).

A principal característica de um betume é a sua susceptibilidade térmica, ou seja, suas propriedades são dependentes da temperatura. O betume é denominado de viscoelástico porque apresenta ao mesmo tempo características viscosas e elásticas. Em altas temperaturas, o betume se comporta como um fluido viscoso e a baixas temperaturas como um sólido quase que elástico. No entanto, em temperaturas intermediárias, as quais o betume está submetido no campo, o seu comportamento é viscoelástico, como mostra a Figura 3.8 (SHRP<sub>A</sub>, 1994).

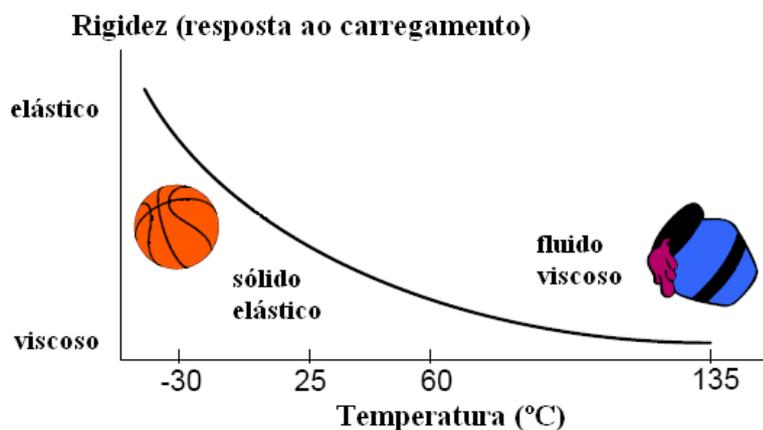


Figura 3.8 – Propriedades viscoelásticas do betume (SHRP, 1994<sub>A</sub>)

O ideal seria que o betume apresentasse características viscosas quando da aplicação da carga e características elásticas quando da remoção da carga. Considerando o comportamento viscoelástico dos betumes convencionais, a escolha por betumes modificados tem sido intensificada objectivando melhorar as suas propriedades e o desempenho em campo.

A caracterização das propriedades viscoelásticas dos betumes tem sido feita através de ensaios de reometria, realizados em reómetros de pratos paralelos, reómetros rotacionais ou

reômetros de torque. Através da reometria é possível medir o módulo complexo de corte ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ), submetendo-se uma pequena amostra de betume a tensões de corte.

Durante o ensaio de reometria, são medidos  $G^*$  e  $\delta$  através da resposta a uma deformação de corte a um torque constante em uma amostra. No entanto, a resposta à deformação de corte está defasada em relação a tensão aplicada por um certo intervalo de tempo  $\Delta t$ , como apresenta a Figura 3.9 (SHRP, 1994 A).

O intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) representa o atraso na deformação obtida em relação à tensão aplicada é representada pelo ângulo de fase. O ângulo de fase  $\delta$  é um indicador da quantidade relativa de deformação recuperável e não-recuperável e das propriedades elásticas e viscosas de um material. Para materiais completamente elásticos, não existe atraso entre a tensão de corte aplicada e a deformação de corte obtida e  $\delta$  é igual a  $0^\circ$ . Analogamente, para materiais totalmente viscosos, a deformação obtida está completamente defasada e  $\delta$  é igual a  $90^\circ$ .

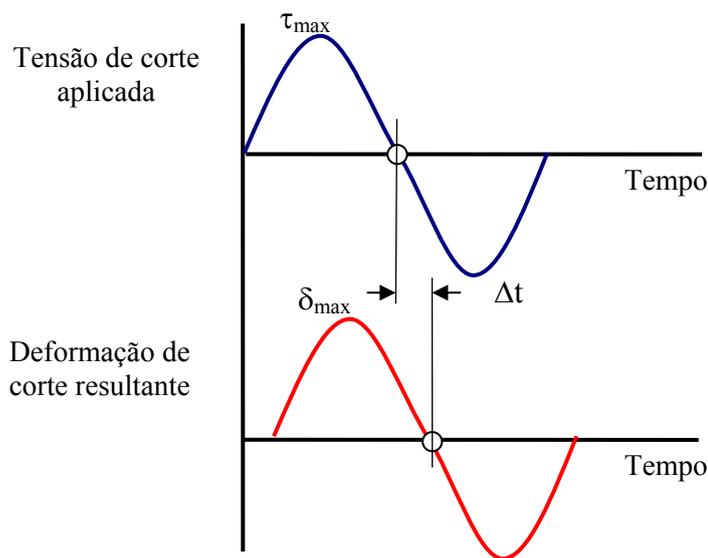


Figura 3.9 – Tensão de corte aplicada e deformação de corte resultante (adaptado de SHRP, 1994 A)

O módulo complexo de corte  $G^*$  é a medida da resistência total do material à deformação quando exposto a pulsos repetidos de tensões de corte e consiste de uma componente elástica (recuperável) e outra componente viscosa (não recuperável).

Em elevadas temperaturas, nas quais o betume se comporta como um fluido viscoso,  $\delta$  tende a  $90^\circ$ . Em baixas temperaturas, o betume se comporta como um material elástico e  $\delta$  tende a  $0^\circ$ . O controlo da rigidez a altas temperaturas pode assegurar que o betume fornece a resistência ao corte global da mistura, em termos de elasticidade a altas temperaturas, e o controlo da rigidez a temperaturas intermediárias deve assegurar que o ligante não contribua para o fendilhamento por fadiga.

De acordo com Roberts *et al.* (1996), o módulo de armazenamento ( $G'$ ), que é a componente recuperável ou elástica, representa a quantidade de energia armazenada em uma amostra durante cada ciclo de carregamento, enquanto que o módulo dissipativo, ou de perda ( $G''$ ), que é a componente não recuperável ou viscosa, representa a energia perdida durante cada ciclo de carregamento.

A Figura 3.10 representa a descrição gráfica do ângulo de fase, do módulo complexo ( $G^*$ ) e de suas respectivas componentes, elástica e viscosa. Na Figura 3.10, em (a), a componente elástica é maior (menor  $\delta$ ) e em (b), a componente viscosa é maior (maior  $\delta$ ).

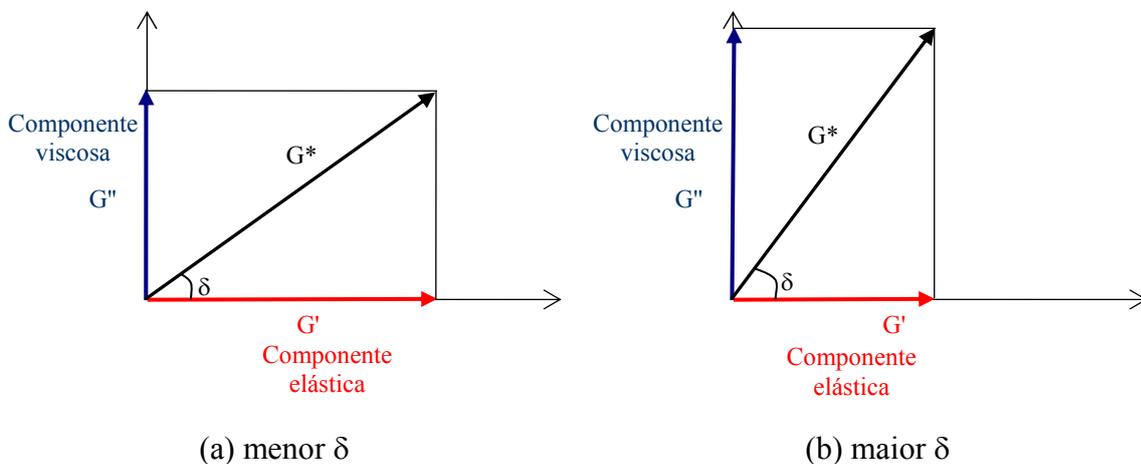


Figura 3.10 – Componentes do módulo complexo de corte  $G^*$

O módulo complexo de corte é calculado através da Equação 3.7 (SHRP, 1994<sub>A</sub>).

$$G^* = \frac{\sigma_{\max}}{\epsilon_{\max}} \tag{3.7}$$

onde:

$G^*$  = módulo complexo de corte;

$\sigma_{\max}$  = tensão de corte máxima aplicada;

$\varepsilon_{\max}$  = deformação de corte máxima resultante.

Os valores de  $G^*$  e  $\delta$  medidos no ensaio são utilizados como parâmetros de predição da resistência à deformação permanente e da resistência à fadiga das misturas betuminosas.

A deformação permanente é considerada um fenómeno de tensão controlada em um carregamento cíclico. A cada ciclo de carregamento, é dissipada energia para deformar a superfície da camada betuminosa do pavimento. Parte desta energia é recuperada, enquanto que a parte restante é dissipada através da deformação permanente e aquecimento. Para materiais viscoelásticos, a energia (ou trabalho) dissipada por ciclo de carregamento  $W_c$  é uma função da tensão e da deformação, como apresentado na Equação 3.8 (Roberts *et al.*, 1996; Zaniwski & Pumphrey, 2004):

$$W_c = \pi \times \sigma \times \varepsilon \times \text{sen } \delta \quad (3.8)$$

onde:

$W_c$  = energia dissipada;

$\sigma$  = tensão;

$\varepsilon$  = deformação;

$\delta$  = ângulo de fase (°);

$\pi$  = número pi (3,1416).

Assumindo-se que a deformação permanente é um fenómeno cíclico à tensão controlada ( $\sigma_0$ ), o trabalho dissipado por ciclo de carregamento é dado através da Equação 3.9:

$$W_c = \pi \times \sigma_0 \times \varepsilon \times \text{sen } \delta \quad (3.9)$$

onde:

$\sigma_0$  = tensão controlada;

e, as demais variáveis já foram definidas anteriormente.

De acordo com a Equação 3.7 e considerando um ensaio a tensão controlada, tem-se a Equação 3.10:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{G^*} \quad (3.10)$$

onde:

$\varepsilon$  = deformação de corte resultante;

$\sigma_0$  = tensão de corte aplicada;

$G^*$  = módulo complexo de corte.

Substituindo-se a Equação 3.10 na Equação 3.9, tem-se a Equação 3.11:

$$W_c = \pi \times (\sigma_0)^2 \times \left[ \frac{1}{G^* / \sin \delta} \right] \quad (3.11)$$

Assim,  $G^*/\sin\delta$  é o parâmetro estabelecido pelo programa SHRP para controlo da deformação permanente. De acordo com a Equação 3.11, tem-se que quanto maior for o valor de  $G^*/\sin\delta$ , menor é o trabalho dissipado a cada ciclo de carregamento e conseqüentemente, melhor será a resistência à deformação permanente.

O fendilhamento por fadiga é considerado um fenómeno a deformação controlada em pavimentos de pequena espessura (inferiores a 5,0 cm), porque as degradações são o resultado muito mais da baixa capacidade de suporte das camadas subjacentes do que da rigidez da camada betuminosa. A fadiga é considerada um fenómeno de tensão controlada para camadas betuminosas com espessuras superiores a 15,0 cm, onde a camada betuminosa constitui a principal responsável pela capacidade de dissipar o carregamento imposto. A combinação de ambos, tensão e deformação controlada ocorre em camadas betuminosas com espessuras intermediárias entre 5,0 e 15,0 cm (Huang, 1993).

O fendilhamento por fadiga ocorre primeiramente em camadas betuminosas com pequena espessura, sendo considerada um fenómeno a deformação controlada ( $\varepsilon_0$ ). A energia por ciclo

de carregamento a deformação controlada é descrita através da Equação 3.12 (Bahia & Anderson, 1995; Roberts *et al.*, 1996):

$$W_c = \pi \times \sigma \times \varepsilon_0 \times \text{sen } \delta \quad (3.12)$$

onde:

$\sigma$  = tensão;

$\varepsilon_0$  = amplitude de deformação controlada aplicada;

e, as demais variáveis já foram definidas anteriormente.

De acordo com a Equação 3.10, tem-se a Equação 3.13:

$$\sigma = \varepsilon_0 \times G^* \quad (3.13)$$

onde:

$\sigma$  = tensão de corte aplicada;

$\varepsilon_0$  = amplitude de deformação aplicada;

$G^*$  = módulo complexo de corte.

Substituindo-se a Equação 3.13 na Equação 3.12, tem-se a Equação 3.14:

$$W_c = \pi \times (\varepsilon_0)^2 \times [G^* \cdot \text{sen } \delta] \quad (3.14)$$

Assim,  $G^* \cdot \text{sen } \delta$  é o parâmetro estabelecido pelo programa SHRP para controlo da fadiga. De acordo com a Equação 3.14, o trabalho dissipado a deformação controlada a cada ciclo de carregamento é directamente proporcional a  $G^* \cdot \text{sen } \delta$ . Desta forma, limitando-se o parâmetro  $G^* \cdot \text{sen } \delta$ , através do decréscimo de  $G^*$  e de  $\delta$ , a energia dissipada por ciclo de carregamento é também limitada. A limitação deste parâmetro é razoável, pois um betume com um baixo valor de  $G^*$  é menos rígido e pode estar submetido a deformações sem desenvolver um elevado estado de tensão, e um betume com um baixo valor de  $\delta$  será mais elástico, capaz de permitir que a estrutura retorne a sua condição original após a deformação, sem dissipar energia. Para resistir à fadiga, o betume precisa ser elástico para dissipar a energia e não fendilhar. Assim, a componente viscosa do módulo complexo de corte  $G^*$  deve ser pequena.

As propriedades viscoelásticas dos betumes avaliadas no programa SHRP são realizadas através do reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR). O programa SHRP estabeleceu os seguintes valores mínimos de  $G^*/\text{sen } \delta$  para a garantir adequada resistência ao acúmulo de deformações permanentes: (i) 1,0 kPa para amostras virgens; (ii) 2,2 kPa para amostra envelhecidas no equipamento RTFOT. Para o fendilhamento por fadiga, o programa SHRP especificou um limite máximo para o parâmetro  $G^*.\text{sen}\delta$  de 5000 kPa após o envelhecimento no equipamento PAV.

### 3.4. MISTURAS BETUMINOSAS

#### 3.4.1. Introdução

As misturas betuminosas constituem camadas de pavimentos e consoante o tipo de camada a construir, exige-se das misturas boas características mecânicas ou aptidão para o desempenho de funções relacionadas com a segurança ou o conforto dos utentes da via (Branco *et al.*, 2005).

Em geral, as misturas betuminosas são constituídas por um conjunto de materiais granulares doseados de uma forma ponderal ou volumétrica e misturados em uma central (usina) com uma quantidade de ligante previamente determinada.

O comportamento mecânico das misturas betuminosas empregues em estruturas de pavimentos depende das propriedades constituintes das misturas (agregados, ligante betuminoso, aditivos) e das respectivas proporções (Antunes, 2005).

Em sistema de camadas de um pavimento é desejável que uma mistura betuminosa possua as seguintes características para obter um desempenho estrutural satisfatório (Epps *et al.*, 2003):

- capacidade para distribuir as tensões;
- estabilidade para resistência às deformações permanentes;
- resistência ao fendilhamento;
- resistência ao congelamento e descongelamento.

As principais propriedades a exigir das misturas betuminosas são as seguintes (i) estabilidade; (ii) durabilidade; (iii) flexibilidade; (iv) resistência à fadiga; (v) resistência à deformação permanente; (vi) resistência à derrapagem; (vii) impermeabilidade; (viii) trabalhabilidade.

### 3.4.2. Composição das misturas betuminosas

De acordo com Roberts *et al.* (1996), a compreensão da relação massa-volume de misturas betuminosas compactadas é importante tanto do ponto de vista de um projecto de uma mistura quanto do ponto de vista de sua construção em campo. Assim, é essencial compreender também que o projecto de uma mistura é um processo volumétrico cujo propósito é determinar o volume de betume e agregado requerido para produzir uma mistura com as propriedades desejadas. No entanto, medidas de volume de agregados e betume em laboratório ou em campo são muito difíceis de serem realizadas. Por esta razão, para simplificar o problema de medidas, massas são usadas no lugar de volumes e a baridade (massa específica) é utilizada para converter massa em volume.

As misturas betuminosas possuem três componentes, agregados, betume e ar e é possível estabelecer relações entre as massas e os volumes destes, como apresenta a Figura 3.11. O Quadro 3.15 apresenta as abreviaturas adoptadas na Figura 3.11.

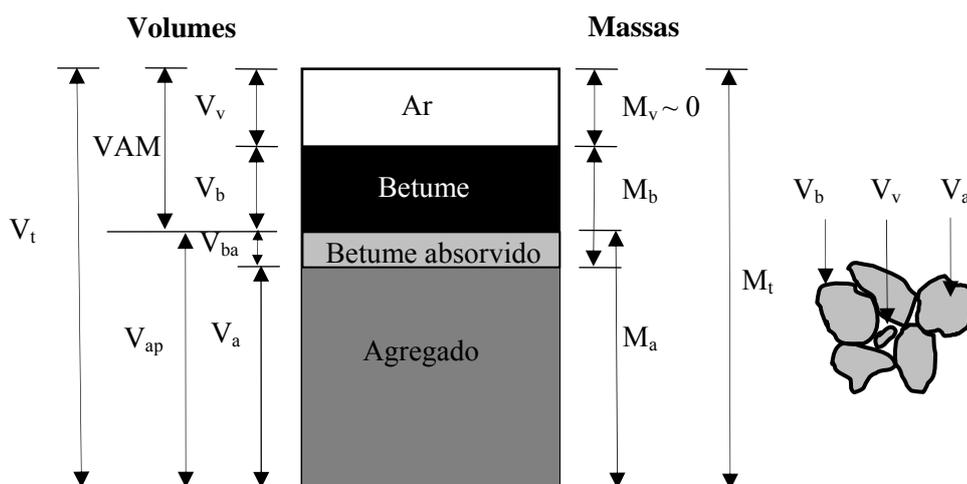


Figura 3.11 – Composição de uma amostra de mistura betuminosa compactada

Quadro 3.15 – Abreviaturas adoptadas na Figura 3.11

Abreviatura	Grandeza
M <sub>a</sub>	Massa de material agregado.
M <sub>b</sub>	Massa de betume.
M <sub>v</sub>	Massa dos vazios (ar) (desprezável).
M <sub>t</sub>	Massa total.
V <sub>a</sub>	Volume de material agregado.
V <sub>b</sub>	Volume de betume.
V <sub>v</sub>	Volume de vazios.
V <sub>ba</sub>	Volume de betume absorvido.
V <sub>t</sub>	Volume total.
VAM = V <sub>b</sub> + V <sub>v</sub>	Volume de vazios no agregado mineral.

A composição volumétrica de uma mistura betuminosa deve ser analisada em pormenor durante a formulação, de modo que esta possa ter um adequado desempenho em campo. Desta forma, deve ser determinada a relação entre as diversas fracções dos agregados (granulometria), percentagem de betume e volume de vazios que, para determinado ligante e agregados, garantem um comportamento adequado da mistura betuminosas (Silva, 2005).

Dois parâmetros muito importantes são os vazios na mistura total ou o volume de vazios (V<sub>v</sub>) e o volume de vazios no agregado mineral (VAM), que representa o que não é agregado numa mistura, ou seja, vazios com ar e betume (Bernucci *et al.*, 2007).

A compactação é o processo que produz a redução dos vazios da mistura betuminosa, de modo a propiciar adequadas propriedades mecânicas à esta. Este processo influencia propriedades como estabilidade, deformabilidade e durabilidade. O método utilizado para compactação das misturas em laboratório em que utiliza-se um cilindro de rolos propicia uma orientação das partículas e a densidade idênticas às obtidas *in situ* (Bonnot, 1986).

O esqueleto estrutural da mistura betuminosa pode ser definido com base na formação granulométrica, denominada equação de Fuller como apresenta a Equação 3.15:

$$p = 100 \times \left( \frac{d}{D} \right)^n \tag{3.15}$$

onde:

$p$  = percentagem de material que passa no peneiro de abertura  $d$  (%);

$d$  = abertura do peneiro (mm);

$D$  = tamanho máximo, abertura do peneiro que passa 100% (mm);

$n$  = expoente o qual ajusta a curva (tomado como aproximadamente igual a 0,45).

A composição volumétrica influencia as propriedades da mistura betuminosa. O Quadro 3.16 apresenta as variáveis da composição volumétrica que afectam as propriedades das misturas betuminosas.

Quadro 3.16 – Variáveis que afectam as propriedades das misturas betuminosas  
(adaptado de AI, 1989; Roberts *et al.*, 1996)

Propriedades	Definição	Variáveis que afectam as propriedades
Flexibilidade	Capacidade de deformar-se, de modo a permitir a adaptação das camadas betuminosas a assentamentos graduais das camadas inferiores.	Granulometria; percentagem de betume; rigidez do betume.
Estabilidade	Capacidade adequada para resistir, com pequena deformação, às cargas a que fica submetida em serviço.	Textura da superfície do agregado; granulometria; percentagem, tipo e qualidade do betume; processo construtivo magnitude, frequência, pressão e velocidade de carregamento.
Durabilidade	Resistência à degradação causada pelo tráfego e pelos efeitos dos agentes atmosféricos.	Granulometria; percentagem de betume; grau de compactação; sensibilidade à água.
Resistência à fadiga	Aptidão da mistura em resistir a esforços de flexão repetidos sem fendilhar.	Granulometria; percentagem de betume; rigidez do betume; grau de compactação.
Resistência à deformação permanente	Desenvolve-se gradualmente com a passagem do tráfego, manifestando-se pela ocorrência de depressões transversais (rodeiras), sendo acompanhadas de elevações laterais.	Granulometria; percentagem de betume; rigidez do betume; grau de compactação.
Resistência à derrapagem	Capacidade da superfície de um pavimento, quando molhada, em oferecer resistência ao deslizamento e à derrapagem.	Granulometria; tipo e textura do agregado; resistência do agregado ao polimento.
Impermeabilidade	Aptidão da mistura em impedir o acesso de água às camadas inferiores.	Granulometria; percentagem de betume; grau de compactação.
Trabalhabilidade	Facilidade de uma mistura betuminosa em ser espalhada e compactada.	Granulometria; percentagem e tipo de betume; tipo de agregado.

### 3.4.3. Formulação das misturas betuminosas

A formulação de misturas betuminosas tem por objectivo a obtenção de qualidades e propriedades desejáveis das misturas através da selecção e proporção adequada dos materiais constituintes. Além disto, o projecto de uma mistura betuminosa deve considerar os principais factores que correspondem às principais causas das degradações que ocorrem nos pavimentos flexíveis, como a deformação permanente, o fendilhamento por fadiga, o trincamento a baixas temperaturas, e também as degradações relacionadas aos efeitos do clima e do envelhecimento (AI, 1989).

De acordo com as propostas do *Report 17 Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions* (RILEM), os métodos de formulação das misturas betuminosas foram reunidos nas seguintes categorias: (i) tipo receita; (ii) empíricos; (iii) analíticos; (iv) volumétricos; (v) relacionados com o comportamento das misturas betuminosas; vi) baseados no comportamento das misturas betuminosas (Luminari & Fidato, 1998). O Quadro 3.17 apresenta os critérios de classificação dos métodos de formulação das misturas.

Quadro 3.17 – Categorias de métodos de formulação e critérios (Luminari & Fidato, 1998)

Categorias de métodos de formulação	Critérios em que se baseia a formulação								
	Baseado na experiência com misturas de composição conhecida.	Produção e compactação de provetes.	Critérios volumétricos.	Análise e composição volumétrica.	Compactação de provetes, reproviz o processo <i>in situ</i> .	Utilização de ensaios empíricos.	Utilização de ensaios de simulação.	Utilização de ensaios fundamentais.	Modelo de previsão do comportamento do pavimento.
Tipo receita	X								
Empíricos		X	X			X			
Analíticos		X	X	X		X			
Volumétricos		X	X	X	X		X		
Relacionados com o comportamento das misturas betuminosas		X	X	X	X		X	X	
Baseados no comportamento das misturas betuminosas		X	X	X	X		X	X	X

O Quadro 3.18 apresenta um resumo dos métodos de formulação de diversos países, a categoria em que estão enquadrados e os critérios aos quais estes obedecem.

Quadro 3.18 – Métodos de formulação e respectivas categorias (Luminari &amp; Fidato, 1998)

Países	Categorias de métodos de formulação					
	Tipo receita.	Empíricos.	Análíticos.	Volumétricos.	Relacionados com o comportamento das misturas betuminosas.	Baseados no comportamento das misturas betuminosas.
Austrália				NAR Guide 96 Nível1	NAR Guide 96 Níveis 2 e 3	
Bélgica			CRR R61/87 CRR 1996			
Finlândia				ASTO/PANK 95 Nível1	ASTO/PANK 95 Níveis 2 e 3	
França		Duriez			AFNOR FN P98	
Alemanha	DIN ZTV bit atB94					
Itália		CNR e AUTOSTRADE				
Suíça		SN 640-431				
Portugal		NP 142 e APOBERT				
Países Baixos		RAW standards			CROW (draft)	
Reino Unido	BS 594-4987				Nottingham University	
Estados Unidos	Marshall Hveem Hubbard-Field			SHRP SUPERPAVE Nível1		SHRP SUPERPAVE Níveis 2 e 3 SHRP A-698

Dentre os principais métodos de formulação de misturas betuminosas, pode-se destacar a metodologia Marshall, o método francês e a metodologia SUPERPAVE. No Brasil e em Portugal a metodologia Marshall é o procedimento mais utilizado.

### Metodologia Marshall

A determinação da percentagem óptima de betume pode ser feita através da metodologia Marshall. Os conceitos da metodologia Marshall de formulação de misturas betuminosas foram concebidos na década de 40 por Bruce Marshall, engenheiro do *Mississippi State Highway Department*. Posteriormente, o USACE (*United States Army Corps of Engineers*), através de extensivas investigações e estudos de correlação, aperfeiçoou e adicionou parâmetros à metodologia.

Nesta metodologia, a selecção da percentagem de betume é feito considerando valores empíricos, determinados no ensaio Marshall para a estabilidade e a fluência e em parâmetros volumétricos como densidade e volume de vazios. A estabilidade é a capacidade da mistura em deformar-se sob a acção de cargas e está relacionada principalmente com a percentagem de betume e ao tipo e proporções dos agregados constituintes da mistura. A fluência é o parâmetro relacionado com a deformação sofrida pela mistura (compactada) quando submetida a uma tensão constante.

Os parâmetros considerados na metodologia Marshall para determinação da percentagem de betume de projecto são os seguintes (AI, 1997):

- densidade – procura obter a máxima densidade para garantir a máxima estabilidade;
- volume de vazios ( $V_v$ );
- vazios no agregado mineral (VAM);
- relação betume vazios (RBV);
- estabilidade;
- fluência.

Apesar da metodologia Marshall não fornecer indicações das propriedades das misturas relacionadas ao desempenho em serviço, fornecendo apenas um indicativo da percentagem de betume de projecto, ela é mundialmente conhecida e utilizada.

As principais limitações da metodologia Marshall são as seguintes (Picado-Santos, 2005):

- temperatura de realização do ensaio;
- representatividade dos provetes;
- dimensão nominal máxima do agregado de 25,0 mm;
- desadequado perante novos materiais e novas exigências dos pavimentos rodoviários, já que não se baseia nas propriedades fundamentais e de desempenho das misturas betuminosas.

### **Método francês**

A metodologia de dosagem das misturas betuminosas, de acordo com a metodologia francesa, segue os seguintes procedimentos (Corté & Serfass, 2000):

- controlo tecnológico dos materiais constituintes da mistura betuminosa (agregados, betume, aditivos);
- execução de ensaios de laboratório para previsão do desempenho das misturas como camadas do pavimento;
- especificações nas quais são definidas determinadas classes de desempenho em substituição às especificações tipo receita da composição volumétrica da mistura;
- ensaio padrão de modo a certificar que a composição irá atender às especificações;
- controlo da mistura durante o fabrico em central;
- controlo de compactação da camada do pavimento em campo de modo a assegurar o limite do volume de vazios.

O ensaio para determinação dos parâmetros volumétricos da mistura é o realizado na prensa de corte giratório (PCG), que é normalizado pela AFNOR – NF P98-252 (1999). A PCG produz amostras de misturas betuminosas com densidades mais realistas que as obtidas com o equipamento Marshall.

O ensaio consiste em compactar a mistura na qual se aplica uma pressão axial estática de 600 kPa sobre provetes cilíndricos de 160 mm de diâmetro e 150 mm de altura. O molde gira com um ângulo de  $30'$  a  $2^\circ$  em relação à vertical com uma rotação de 30 rpm, simulando a compactação exercida pelo rolo compactador. A evolução da altura é registrada e transformada em percentagem de vazios em função do número de giros. O princípio de compactação com a PGC é apresentado na Figura 3.12, onde  $h_{\min}$  é a altura mínima da amostra para o volume de vazios de 0%,  $h$  é a altura para um número  $n$  de giros,  $F$  é a força axial,  $F_c$  a força de corte e  $\alpha$  é o ângulo de corte.

As especificações fixam uma percentagem mínima de vazios após 10 giros (abaixo do qual a estabilidade da mistura não é satisfatória ou não conforme) e um intervalo aceitável para esta percentagem de vazios (dependente do tipo de camada) após um determinado número de giros que depende da espessura da camada, como exemplifica a Figura 3.13, na qual a percentagem de vazios (% de vazios) é avaliada através da correlação entre a altura da amostra e o número de giros ( $\log ng$ ).

As percentagens de betume na fase de projecto são determinadas tendo em conta a densidade dos agregados e a distribuição granulométrica utilizada.

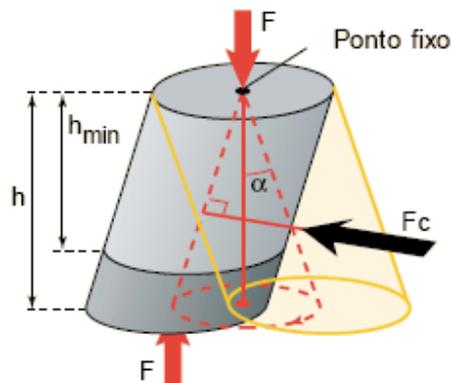


Figura 3.12 – Princípio de compactação com a PCG (LCPC, 2007)

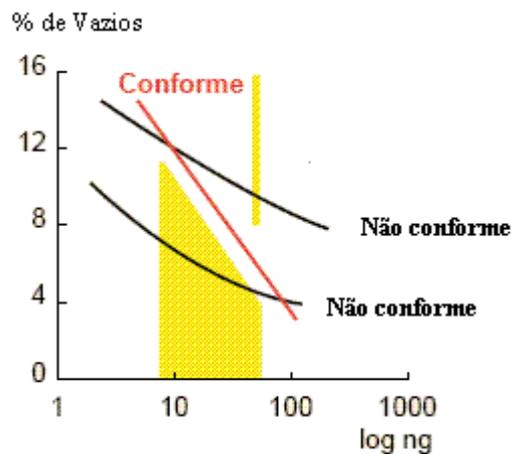


Figura 3.13 – Exemplo de interpretação do ensaio com a PCG (LCPC, 2007)

Na metodologia francesa, a sensibilidade à água é avaliada através do ensaio de Duriez (NF P 98-251.1). Após a determinação da percentagem de betume de projecto, a mistura é avaliada através de ensaios de desempenho, denominados de ensaio padrão, em que são determinados o módulo dinâmico, a resistência à deformação permanente e a resistência à fadiga.

### Metodologia SUPERPAVE

A dosagem das misturas através da metodologia SUPERPAVE é dividida em três níveis que dependem do tráfego em termos de número de passagens do eixo equivalente (ESAL – *Equivalent Axle Loads*). O nível 1 corresponde à dosagem volumétrica da mistura betuminosa

para um tráfego com  $ESAL < 10^6$  e para os níveis 2 e 3 é realizada a avaliação do desempenho da mistura, correspondendo aos tráfegos moderado ( $10^6 < ESAL < 10^7$ ) e elevado ( $ESAL > 10^7$ ), respectivamente.

O nível 1 engloba a moldagem dos provetes utilizando o compactador giratório SUPERPAVE (SGC), a selecção da percentagem de betume com base no teor de vazios, vazios no agregado mineral (VAM), vazios preenchidos com betume (RBV) e razão filer/betume. Assim como na metodologia francesa, a compactação na dosagem SUPERPAVE é realizada por amassamento (giros), sendo que as principais diferenças entre a PCG e o compactador giratório SUPERPAVE (SGC) são o ângulo de cisalhamento ( $1,25^\circ$ ) e o diâmetro do molde (150 mm), como apresenta a Figura 3.14.

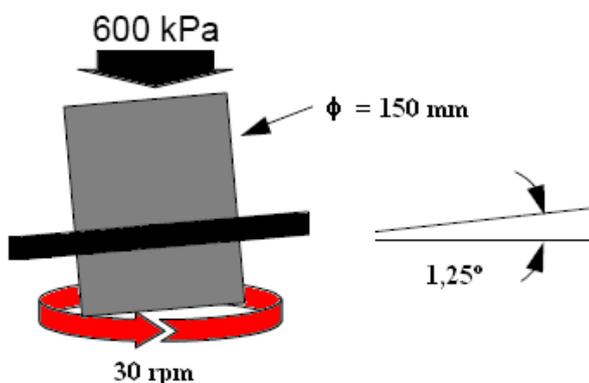


Figura 3.14 – Princípio de compactação do compactador giratório SUPERPAVE (SGC) (WSDOT, 2005)

Durante o procedimento de compactação dos provetes através do SGC tem-se o acompanhamento das alturas e, conseqüentemente, das baridades aparentes ( $G_{mm}$ ). O controlo das alturas possibilita a dosagem da mistura através do cálculo dos parâmetros volumétricos em relação ao número de giros (inicial, máximo e de projecto). O número de giros está relacionado com o tráfego e a temperatura da região (Roberts *et al.*, 1996; AI, 1997).

Os esforços de compactação em  $N_{inicial}$  ( $N_{ini}$ ) e  $N_{máximo}$  ( $N_{máx}$ ) são usados para avaliar a compatibilidade da mistura, enquanto o  $N_{projeto}$  ( $N_{proj}$ ) é utilizado para seleccionar a percentagem de betume, como mostra a Figura 3.15.

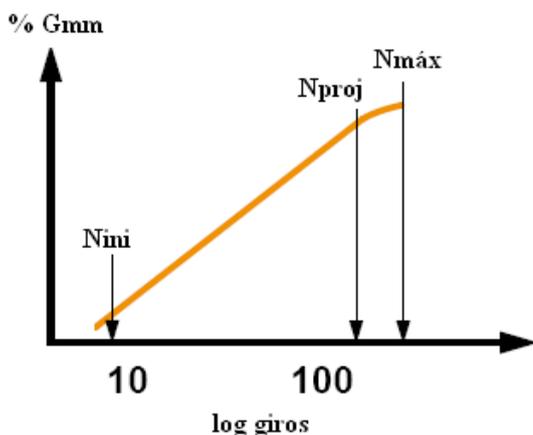


Figura 3.15 – Esforços de compactação do SGC (WSDOT, 2005)

Os requisitos volumétricos da mistura, para determinação da percentagem óptima de betume, incluem ainda a avaliação dos vazios da mistura, VMA e RBV. Na metodologia SUPERPAVE, o volume de vazios de projecto da mistura é 4,0%, os limites do VAM são especificados em função do tamanho nominal máximo do agregado e o RBV é especificado considerando o volume de vazios e o tráfego.

Outra consideração desta metodologia é a relação filer/betume, na qual os valores aceitáveis devem estar situados entre 0,6 e 1,6. Para todas as misturas é avaliada ainda a sensibilidade à água através da norma AASHTO T 283, 1989 (Resistência ao dano pela humidade induzida em misturas compactadas) (AI, 1995).

No projecto de mistura SUPERPAVE, ensaios de desempenho são requeridos somente em situações de tráfego moderado a elevado, ou seja, de misturas nível 2 e 3. Os ensaios de desempenho utilizam novos equipamentos e procedimentos para assegurar que as misturas formuladas apresentem um desempenho adequado em termos de deformação permanente, fendilhamento por fadiga e fendilhamento térmico a baixa temperatura.

### 3.5. MÓDULOS DAS MISTURAS BETUMINOSAS

#### 3.5.1. Introdução

A rigidez dos materiais de construção como o aço ou o betão podem, em geral, ser descritos através do módulo de Young (razão entre a tensão aplicada e a correspondente deformação) o qual, em condições normais, é independente da temperatura e do tempo de carregamento. Ao contrário, os materiais betuminosos exibem variações de suas propriedades mecânicas em função da temperatura e do tempo de aplicação de carga (Partl & Francken, 1998).

Um material é dito perfeitamente elástico se a deformação aparece ou desaparece imediatamente quando se aplica ou se remove a tensão aplicada. Entretanto, esta definição não implica em linearidade na relação tensão/deformação. As misturas betuminosas exibem uma combinação de respostas elásticas e viscosas, dependentes do tempo de aplicação da carga e da temperatura.

A rigidez de uma mistura betuminosa depende da temperatura e do tempo de carregamento, estando este relacionado com a velocidade de circulação dos veículos, com as seguintes considerações (Pais, 1999):

- a rigidez é mais elevada quando se está na presença de baixas temperaturas e curtos tempos de carregamento. Neste caso, o comportamento da mistura é essencialmente elástico;
- a rigidez elástica é utilizada na caracterização da mistura betuminosa para dimensionamento;
- a rigidez elástica de uma mistura betuminosa é função da rigidez elástica do betume e da composição volumétrica e granulometria da mistura betuminosa;
- por outro lado, a rigidez é mais reduzida para altas temperaturas e longos tempos de carregamento, e o comportamento da mistura é essencialmente viscoso, sendo que esta rigidez é fundamental para a previsão das deformações permanentes;
- usualmente, a quantificação da rigidez é avaliada através dos equipamentos utilizados nos ensaios para a determinação das características de fadiga ou de deformações permanentes das misturas betuminosas.

As misturas betuminosas são, em geral, consideradas como sendo homogêneas, isotrópicas, viscoelásticas e com média linearidade. Entretanto, estas suposições aplicam-se somente a determinadas condições de acordo com o seguinte (Di Benedetto & De La Roche, 1998):

- continuidade – enquanto sua estrutura granular torna as misturas betuminosas actualmente utilizada nos pavimentos heterogêneas, a continuidade macroscópica pode ser considerada em termos de escala da camada do pavimento. No caso de provetes de laboratório, em geral, são preparados na relação de 10 em termos do diâmetro máximo do agregado. No caso de ensaios de fadiga, a relação utilizada é da ordem de 3;
- isotropia – a maneira como as misturas betuminosas são colocadas na estrada (em camadas espalhadas e compactadas em camadas) fornece ao material uma certa anisotropia. Similarmente, os provetes fabricados em laboratório exibem esta propriedade;
- viscoelaticidade e linearidade – em toda a gama de solicitações a que são submetidas, as misturas betuminosas exibem um complexo comportamento elastoviscoplastico, mas a baixas amplitudes de deformação ( $< 10^{-4}$ ) este comportamento pode ser considerado puramente viscoelástico e linear;
- influência da temperatura – a temperatura é um parâmetro decisivo no comportamento das misturas betuminosas. Como efeito, assim como o betume que contém, a mistura betuminosa é termo-sensível, o que significa que o estado de tensão-deformação é fortemente dependente da temperatura.

Tendo em conta o acima exposto, para medir as propriedades dos materiais que possuem um comportamento viscoso deve ser levado em consideração a evolução da aplicação da carga *versus* o tempo a uma dada temperatura.

As propriedades relativas à rigidez dos materiais são representadas em termos do módulo complexo e do ângulo de fase. As características de rigidez podem ser utilizadas para seguintes diferentes finalidades (Francken, 1997):

- para avaliar e controlar a qualidade do material;
- para comparações e ordenações dos materiais;
- para avaliar o comportamento do material e o efeito das mudanças climáticas, mecânicas e idade;
- como um parâmetro essencial no dimensionamento estrutural para calcular a distribuição das tensões e as deformações em métodos de multicamadas ou de elementos finitos;

- para investigação, desenvolvimento e inovação na criação e validação de novos modelos e novas práticas construtivas;
- para previsão de modelos de comportamento baseados no desempenho, incluindo a fadiga e leis de degradações.

### 3.5.2. Tipos e ensaios de módulos

Relativamente à avaliação dos módulos das misturas betuminosas, é importante definir determinados conceitos e terminologias frequentemente utilizadas na literatura (Capitão, 2003):

- módulo de deformabilidade – ( $E_{mist}$ ) corresponde à relação entre a amplitude da tensão aplicada ( $\sigma_0$ ) e a correspondente extensão verificada ( $\epsilon_0$ ) para determinadas condições de temperatura ( $T$ ) e de frequência ( $F_r$ ), fixas. Habitualmente medem-se estas propriedades através de ensaios de cargas repetidas, nos quais se aplica uma tensão que varia ciclicamente ao longo do tempo, com uma velocidade angular ( $\omega$ ), sendo  $\omega = 2\pi \times F_r$ . No entanto, o exposto é válido se o ensaio decorrer no domínio das pequenas deformações e de modo que o comportamento seja linear;
- módulo de rigidez – significa o mesmo que módulo de deformabilidade;
- módulo dinâmico – significa, no essencial, o mesmo que módulo de deformabilidade. Na norma ASTM D 3497 (1995), o módulo dinâmico é definido como “o valor absoluto de módulo complexo  $|E^*|$  que define as propriedades elásticas dum material viscoelástico linear submetido a um carregamento sinusoidal”, sem períodos de repouso. Entretanto, o termo dinâmico deve ser utilizado somente para ensaios com efeitos de inércia não desprezáveis, os quais estão relacionados com o movimento da massa do provete ou das partes do equipamento a ela ligadas. Para ensaios clássicos aqueles efeitos podem ser desprezados;
- módulo secante – módulo em geral medido em ensaios de tracção directa, nos quais aplica-se um carregamento que varia linearmente com o tempo, sendo aquele calculado pela relação entre a tensão aplicada e a extensão verificada num dado instante “ $t$ ”;
- módulo resiliente – módulo medido em ensaio de tracção indirecta, cuja determinação baseia-se numa relação entre a tensão e a deformação reversível, em carregamento aplicado com períodos de repouso;

- módulo tangente – relação entre a tensão aplicada e a extensão produzida num dado instante ( $t$ ), correspondente à inclinação da tangente ao caminho das tensões representado num sistema de eixos tensão-extensão, quando aquela variável não é linear.

Nos materiais betuminosos são utilizadas duas principais categorias de ensaios: (i) ensaios homogéneos; (ii) ensaios heterogéneos.

Os ensaios homogéneos são directamente relativos às tensões e deformações e à sua lei constitutiva (se viscoelástico ou não). Os ensaios não-homogéneos requerem primeiramente uma lei (viscoelasticidade linear, por exemplo) e consideram a geometria do provete para posteriormente obter-se os parâmetros constitutivos da lei e podem ser utilizados se o comportamento em questão for simples (isotrópico linear ou isotrópico linear viscoelástico).

Para descrever o comportamento viscoelástico linear do material, é possível utilizar diferentes sinais de carregamento *versus* o tempo. Os três principais tipos de carregamentos aplicados em ensaios de misturas betuminosas são (Di Benedetto & De La Roche, 1998):

- carregamento monotónico, analisado através da introdução do tempo (modo tempo);
- carregamentos sinusoidais, processados utilizando a frequência ( $F_r$ ) ou a pulsação ( $\omega$ ) (modo frequência). Nestes ensaios, o módulo complexo  $|E^*|$  é medido directamente;
- carregamentos cíclicos não-sinusoidais, do tipo testes de pulsos, os quais requerem análises específicas.

### **Módulo Complexo**

A utilização do módulo complexo para caracterização da rigidez de misturas betuminosas não é um novo conceito. Em 1962, Papazian foi o primeiro a realizar ensaios em materiais viscoelásticos, como as misturas betuminosas. Papazian aplicou uma tensão sinusoidal em um provete cilíndrico a uma determinada frequência e mediu a resposta em forma de extensão sinusoidal à mesma frequência. Os ensaios foram conduzidos em condições controladas de temperatura com diversas amplitudes de carregamento e de frequências. Assim, Papazian concluiu que os conceitos da viscoelasticidade poderiam ser aplicados na caracterização do desempenho de misturas betuminosas (Clyne *et al.*, 2003).

O módulo complexo  $E^*$  é o número complexo definido como a razão entre a amplitude complexa de uma tensão sinusoidal a uma pulsação ou velocidade angular ( $\omega = 2\pi F_r$ ) aplicada a um material e a amplitude complexa de uma extensão sinusoidal. Considerando o carácter viscoelástico do material, a extensão possui um atraso em relação à tensão, que é representado pelo ângulo de fase ou de defasagem ( $\phi$ ). Dada esta definição, o módulo complexo não é uma função do tempo mas depende da pulsação ou da frequência a uma determinada temperatura (Di Benedetto & De La Roche, 1998). A Figura 3.16 representa a tensão aplicada ( $\sigma_0$ ) e a extensão ( $\epsilon_0$ ) em um carregamento dinâmico apresentando um desfasamento em relação à carga ( $\phi$ ).

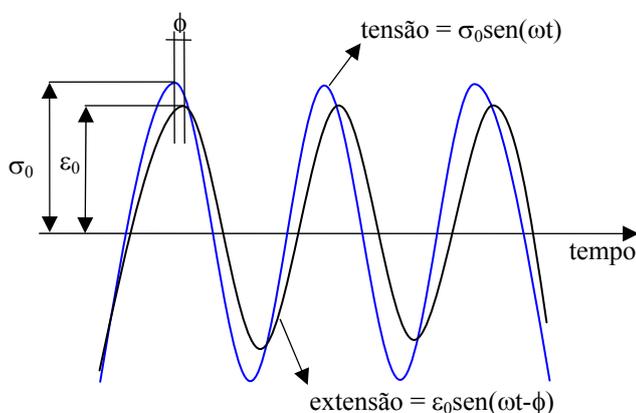


Figura 3.16 – Tensão ( $\sigma_0$ ) e a extensão correspondente ( $\epsilon_0$ ), com o ângulo de fase ( $\phi$ )

Tendo em conta que as misturas betuminosas possuem o comportamento variável em relação à temperatura e ao tempo de carregamento, para a caracterizar o seu comportamento é necessário a execução de ensaios que abranjam o controlo de temperaturas e de frequências. A metodologia utilizada, em geral, consiste na aplicação de cargas sinusoidais em provetes, medindo-se a razão tensão-extensão como um valor característico da sua rigidez mecânica a diferentes combinações de temperaturas e frequências (Partl & Francken, 1998).

A Equação 3.16 apresenta uma tensão sinusoidal a uma frequência e amplitude aplicada:

$$\sigma = \sigma_0 \times \text{sen}(\omega \times t) \tag{3.16}$$

onde:

$\sigma$  = tensão;

$\sigma_0$  = amplitude de tensão;

$\omega$  = velocidade angular ( $2\pi F_f$ ) (rad/s);

t = tempo (s).

A resposta do material à solicitação aplicada resulta numa deformação que segue uma lei caracterizada pela mesma frequência, mas apresentando uma defasagem em relação à tensão aplicada. Por esta razão, a extensão resultante será sinusoidal, de modo que a defasagem é representado pelo ângulo de fase ( $\phi$ ). A Equação 3.17 apresenta a deformação resultante:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \times \text{sen}(\omega \times t - \phi) \quad (3.17)$$

onde:

$\varepsilon$  = extensão;

$\varepsilon_0$  = amplitude de extensão;

$\omega$  = velocidade angular ( $2\pi F_f$ ) (rad/s);

t = tempo (s);

$\phi$  = ângulo de fase ( $^\circ$ ).

A relação entre as amplitudes de tensão e deformação define o valor absoluto do módulo complexo, que é o módulo dinâmico e expressado através da Equação 3.18 (Ferry, 1980):

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (3.18)$$

A correspondente razão entre a tensão e a extensão é representada por duas componentes: (i) o módulo complexo  $|E^*|$  (ou  $|G^*|$  no caso de tensão de corte); (ii) ângulo de fase  $\phi$  (ou  $\delta$  para betumes). O módulo complexo, pode ser dividido em duas componentes como o seguinte (Ferry, 1980; Partl & Francken, 1998):

- componente real, a qual representa a energia armazenada no material, que é expressa pelas Equações 3.19 e 3.20:

$$E_1 = |E^*| \times \cos(\phi) \quad (3.19)$$

$$E_1 = \frac{\sigma_0 \cos \varphi}{\varepsilon_0} \quad (3.20)$$

onde:

$E_1$  = componente real do módulo complexo;

e as demais variáveis já definidas anteriormente.

- componente imaginária representando a energia perdida por atrito interno, que é expressa através das Equações 3.21 e 3.22 (Ferry, 1980; Partl & Francken, 1998):

$$E_2 = |E^*| \times \sin(\varphi) \quad (3.21)$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0 \sin \varphi}{\varepsilon_0} \quad (3.22)$$

onde:

$E_2$  = componente imaginária do módulo complexo;

e as demais variáveis já definidas anteriormente.

As tensões e deformações podem ser escritas na forma complexa, como apresentado nas Equações 3.23 e 3.24. Destas equações, tem-se o módulo complexo através da Equação 3.25.

$$\sigma^* = \sigma_0 \times e^{i\omega t} \quad (3.23)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 \times e^{i[\omega t - \varphi]} \quad (3.24)$$

$$E^* = E_1 + iE_2 \quad (3.25)$$

O módulo complexo pode também ser apresentado pelo seu valor em módulo ( $|E^*|$ ) e pelo seu ângulo de fase ( $\varphi$ ), respectivamente de acordo com a Equações 3.26 e 3.27 (Pais, 1999):

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (3.26)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad (3.27)$$

Quando a tensão de corte é aplicada o módulo complexo  $G^*$  é determinado da mesma forma para o módulo de rigidez  $E^*$  através das Equações 3.26 e 3.27. Para materiais lineares e homogêneos, a relação entre  $E^*$  e  $G^*$  é dada pela Equação 3.28:

$$E^* = 2 \times G^* (1 + \nu^*) \quad (3.28)$$

onde:

$E^*$  = módulo complexo de rigidez;

$G^*$  = módulo complexo de corte;

$\nu^*$  = coeficiente de Poisson.

Na Equação 3.28,  $\nu^*$ , a princípio, é um número complexo. Entretanto, a medida directa de  $\nu$  com base na medida volumétrica da deformação nos ensaios de módulo complexo, com ou sem uma pressão de contenção lateral, têm mostrado que a parte imaginária é muito pequena. Para ensaios em materiais betuminosos, o valor de  $\nu$  varia entre 0,3 e 0,5, dependendo da temperatura e da frequência do ensaio (Di Benedetto & De La Roche, 1998).

A caracterização do módulo complexo implica na determinação das duas componentes ( $|E^*|$  e  $\phi$ ) ou ( $E_1$  e  $E_2$ ) para diferentes temperaturas e frequências. O comportamento reológico das misturas betuminosas pode ser representado através de diferentes variações entre seus componentes, como os seguintes: (i) em função da variação da temperatura e da frequência; (ii) da relação entre as partes real e imaginária; (iii) dos módulos e ângulo de fase. Os gráficos normalmente representados são os seguintes (Partl & Francken, 1998): (i) curvas isotérmicas; (ii) espaço ou diagrama de Black; (iii) curvas isócronas; (iv) representação no Plano Cole-Cole; (v) curva equivalência frequência-temperatura ou *master-curve*.

### ***Curvas Isotérmicas***

As curvas isotérmicas são obtidas através do gráfico, no qual a norma do módulo complexo (ordenadas), para cada nível de temperatura do ensaio, é traçada em função da frequência aplicada (abcissas), em escala logarítmica, como o exemplo apresentado na Figura 3.17.

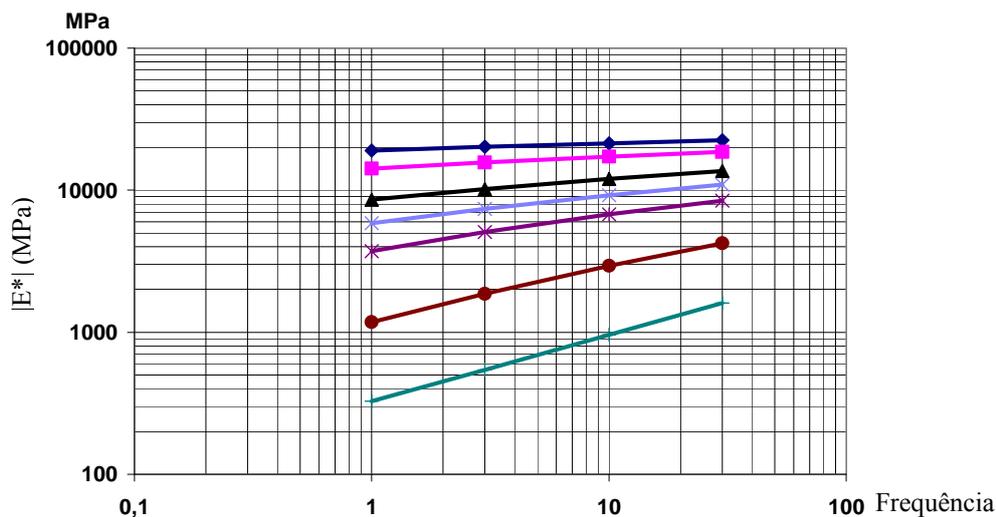


Figura 3.17 – Curvas isotérmicas de uma mistura betuminosa (Momm, 1998)

A susceptibilidade cinética pode ser apreciada pela inclinação de uma curva isotérmica, em relação à uma temperatura dada. Relativamente a estas curvas, para a metodologia de dimensionamento do pavimento adoptada nesta investigação, encontra-se um ponto particular utilizado para os cálculos, 20 °C e 10 Hz.

***Espaço ou Diagrama de Black***

O Espaço de Black é representado através do gráfico do logaritmo da norma do módulo complexo (eixo das ordenadas) em função do ângulo de fase (eixo das abcissas). Se a sobreposição frequência-temperatura for perfeita, a curva obtida deve ser única. Isto é, para cada valor da defasagem  $\phi$  corresponde um só valor da norma de módulo na frequência considerada (Partl & Francken, 1998). A Figura 3.18 apresenta um exemplo do gráfico Espaço de Black.

Esta curva permite visualizar a zona dos módulos onde ocorre a redução de ângulo de fase para elevadas temperaturas (Baaj, 2002). Como esta curva apresenta directamente a relação entre o módulo de rigidez e o ângulo de fase, permite a obtenção da componente elástica do módulo de rigidez ( $E_{\infty}$  ou módulo puramente elástico). Esta característica é obtida por correlação linear entre o módulo e o ângulo de fase, correspondentes a temperaturas inferiores a 30 °C (Pais, 1999).

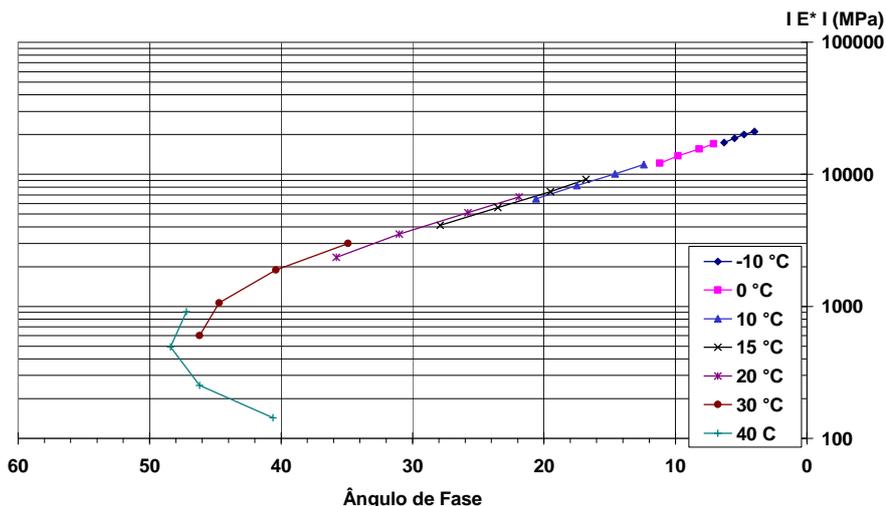


Figura 3.18 – Espaço ou Diagrama de Black de uma mistura betuminosa (Momm, 1998)

### Curvas Isócronas

As curvas isócronas são representadas através dos gráficos do módulo complexo (ordenadas), para cada nível de frequência, em função da temperatura (abcissas), em escala semi-logarítmica.

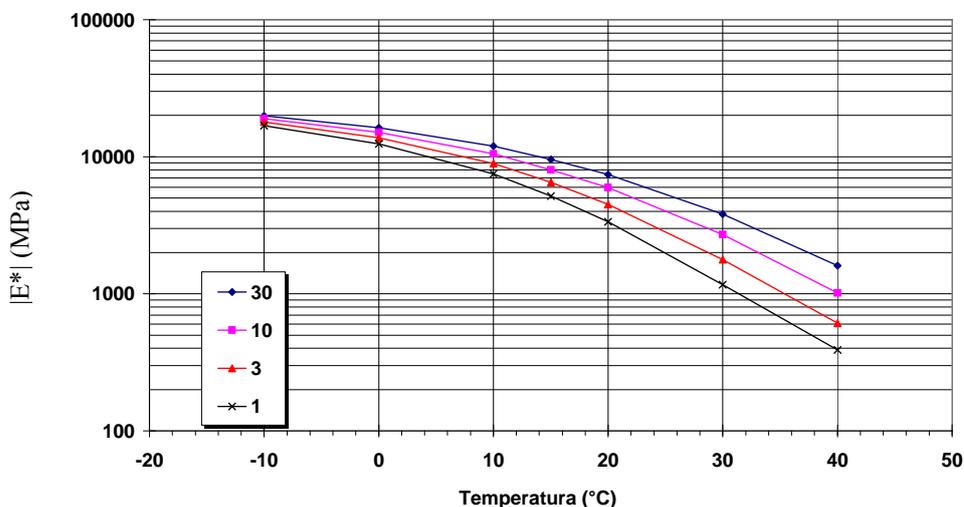


Figura 3.19 – Curvas isócronas de uma mistura betuminosa (Momm, 1998)

As curvas isócronas permitem a verificação da susceptibilidade térmica (variação do módulo para a variação de temperatura) das misturas betuminosas (Partl & Francken, 1998).

**Representação no Plano Cole-Cole**

Quando a parte imaginária ( $E_2$ ) do módulo complexo for representada em função da parte real ( $E_1$ ) em coordenadas aritméticas, obtém-se uma curva única semelhante a um arco de círculo (Figura 3.20), independente da frequência e da temperatura (Partl & Francken, 1998).

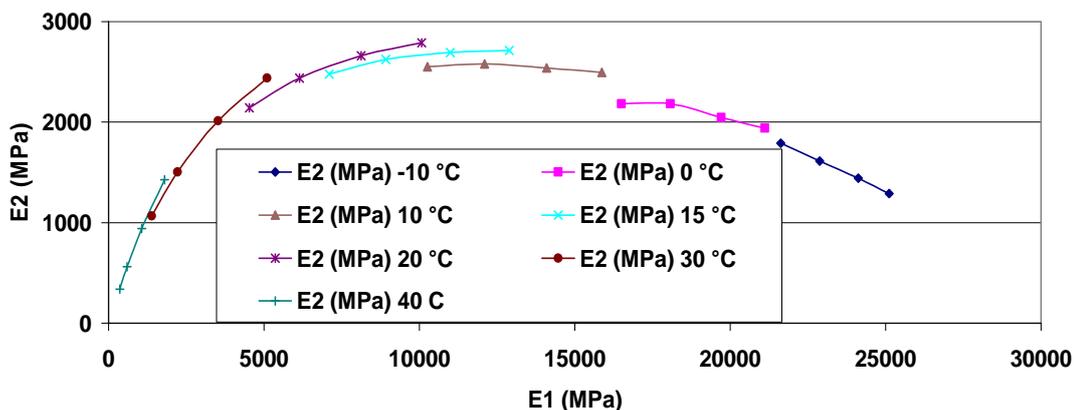


Figura 3.20 – Representação do módulo complexo no Plano Cole-Cole (Momm, 1998)

**Curva equivalência frequência-temperatura ou master-Curve**

A *master-Curve* (curva mestra) é obtida pela translação das curvas módulo-frequência (isotérmicas) de diversas temperaturas, para uma mesma curva, sendo a translação feita através da aplicação de um factor de escala  $\log(\alpha_t)$ . A transformação de escalas permite que as variáveis temperatura e frequência sejam combinadas numa nova variável “X” representada através da Equação 3.29:

$$X = \log(\alpha_T \times F_r) \tag{3.29}$$

onde:

X = factor de translação ou de escala;

$\log(\alpha_t)$  = factor de escala;

$F_r$  = frequência (Hz).

Desta forma, a *master-curve* é representada graficamente através da norma do módulo complexo  $|E^*|$  versus o factor de escala “X”, de modo que a frequência-temperatura é dependente do módulo de rigidez para uma temperatura de referência fixada.

A *master-curve* é construída através da aplicação do princípio da equivalência frequência-temperatura. A aplicação deste princípio refere-se traçar o gráfico do módulo complexo (ordenadas) em função da frequência (abscissas), fazendo-se a translação de cada curva isotérmica de forma a obter-se uma curva contínua na escala logarítmica. A vantagem da aplicação deste procedimento é que uma vez que a *master-curve* esteja esboçada, é possível, através de interpolação, obter o valor do módulo de rigidez para qualquer combinação de temperatura e frequência, dentro da abrangência das medidas (Partl & Francken, 1998).

Considerando que a *master-curve* caracteriza a viscoelasticidade do material, uma curva horizontal representa uma mistura betuminosa com comportamento puramente elástico, enquanto que, uma curva vertical mostra o comportamento de uma mistura betuminosa susceptível às variações de temperatura e de frequência (Momm, 1998).

O factor de translação, em geral, baseia-se em duas equações: (i) de Arrhenius, apresentada através da Equação 3.30; (ii) de WLF (William, Landel, Ferry), mostrada na Equação 3.31.

$$\log \alpha_T = 0,4343 \times \frac{\delta H}{R} \times \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad (3.30)$$

onde:

$\delta H$  = energia de activação aparente característica do material (kcl/mole);

R = constante universal dos gases (8,31 j/mole/Kelvin);

T = temperatura (Kelvin);

$T_R$  = temperatura de referência (Kelvin).

$$\log \alpha_T = \frac{-C_1 \times (T - T_R)}{(T - T_R) + C_2} \quad (3.31)$$

onde

$C_1$  e  $C_2$  = constantes dependentes do material;

e as demais variáveis anteriormente descritas.

A translação das curvas isotérmicas pode ser feita, ainda, com a translação de cada uma das curvas isotérmicas de cada temperatura de modo a construir uma curva de equivalência

frequência-temperatura contínua sobrepondo as frequências com módulos de mesmo valor, o que se denomina translação gráfica. De acordo com Ferry (1980), este princípio permite que os dados colectados a diferentes temperaturas sejam deslocados horizontalmente relativamente a uma temperatura de referência, como mostra a Figura 3.21 (Bernucci *et al.*, 2007).

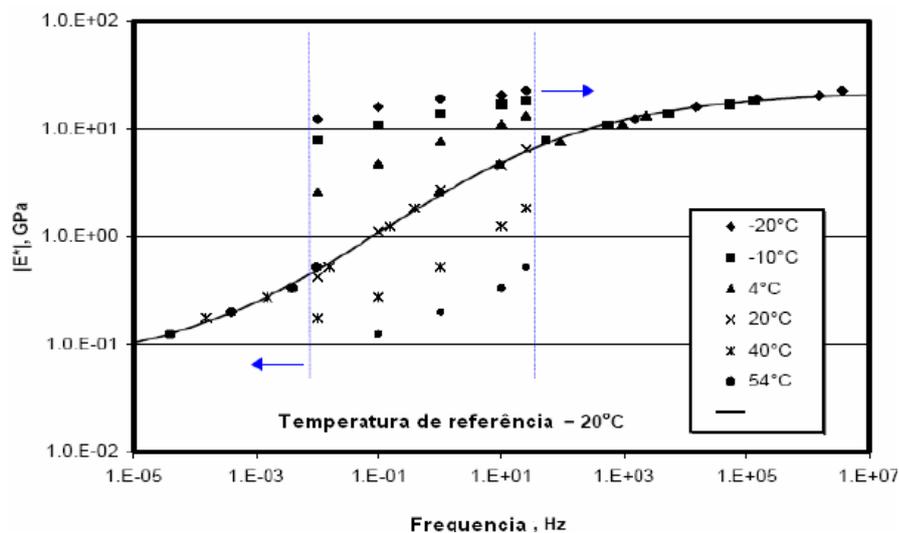


Figura 3.21 – *Master curve* (Bernucci *et al.*, 2007)

Os vários ensaios existentes (homogéneos ou não homogéneos) de medida do módulo complexo são apresentados no Quadro 3.19. Em geral, nestes ensaios, a partir de valores da tensão e do deslocamento aplicados nos limites dos provetes e o ângulo de fase entre estes dois sinais, o módulo complexo pode ser determinado com base no factor forma ( $\gamma$ ), que depende das dimensões do provete, e no factor massa<sup>7</sup> ( $\mu$ ), que leva em consideração (se necessário) os efeitos de inércia relativos a massa do provete. (Di Benedetto & De La Roche, 1998; Di Benedetto *et al.*, 2001). Assim, a parte real e a imaginária do módulo complexo são dadas através das Equações 3.32 e 3.33:

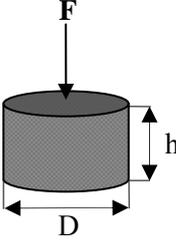
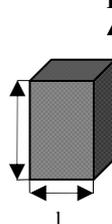
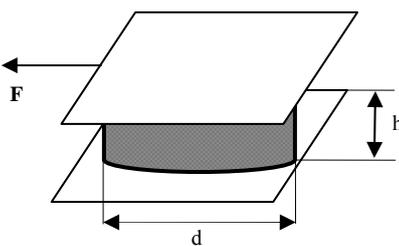
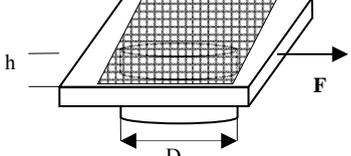
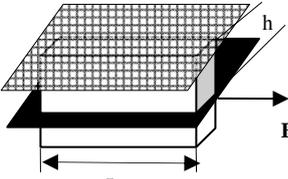
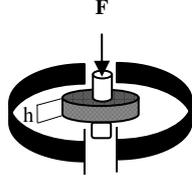
$$E_1 = \gamma \times \left( \frac{F}{D} \times \cos \varphi + \mu \omega^2 \right) \tag{3.32}$$

$$E_2 = \gamma \times \left( \frac{F}{D} \times \text{sen} \varphi \right) \tag{3.33}$$

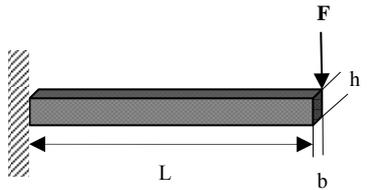
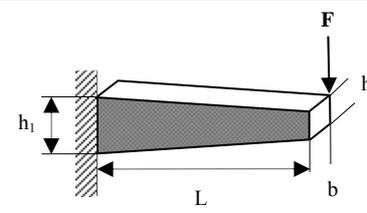
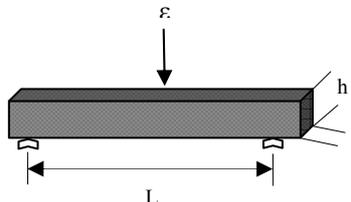
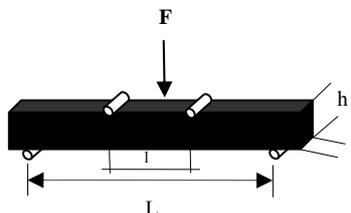
<sup>7</sup> Para condições clássicas (inferiores a 30 Hz), o factor massa é desprezado.

Quadro 3.19 – Tipos de ensaios de módulo

(adaptado de Di Benedetto & De La Roche, 1998; Di Benedetto *et al.*, 2001)

Tipo	Ensaio	Esquema	Factor de forma	Factor de massa
Ensaio homogêneo	Compressão axial (com ou sem contenção lateral)		$h/\pi D^2$	-
	Corte simples ( <i>shearing test</i> )		$l/he$	-
	corte a altura constante ( <i>repetitive simple shear test</i> )		$h/\pi D^2$	-
	corte ( <i>shearing test machine</i> )		$h/\pi D^2$	-
			$h/2Lb$	-
	Corte co-axial ( <i>co-axial shear test</i> )		$\ln (d/D)/2\pi h$	-

(Continuação do Quadro 3.19)

Ensaio não homogêneo	flexão 2 pontos (two point bending)		$4L^3/bh^3$	$M/4 + m$
			$12L^3/b(h_1 - h_2)^3 \times [(2 - h_2/2h_1) \times h_2/h_1 - 3/2 - \ln(h_2/h_1)]$	$0,135M + m$
	flexão 3 pontos (three point bending)		$24L^3/\pi^4bh^3$	$0,5M + m$
	flexão 4 pontos (four point bending)		$(2L^3 - 3Ll^2 - l^3)/8bh^3$	-

Os parâmetros que influenciam os valores do módulo complexo de misturas betuminosas são divididos em duas categorias (Di Benedetto & De La Roche, 1998):

- parâmetros relativos às condições do ensaio (frequência de aplicação da carga, temperatura, nível de carregamento, tipo de ensaio);
- parâmetros relativos à composição da mistura (tipo e percentagem de betume, volume de vazios, tipo de agregados e filer).

Os principais factores que influenciam o valor do módulo complexo das misturas betuminosas são a frequência de aplicação das cargas e a temperatura. O módulo aumenta quando a frequência aumenta e quando a temperatura diminui. Dada a influência da temperatura no valor do módulo, este parâmetro deve ser controlado durante a execução dos ensaios. Quanto

ao nível de carregamento, o módulo deve ser determinado com um nível de extensão para o qual a mistura betuminosa exibe um comportamento linear<sup>8</sup>, de modo a não prejudicar a qualidade das medidas. Relativamente ao ângulo de fase, este aumenta com o aumento da temperatura, até um determinado patamar, diminuindo após este valor.

Sob determinadas condições de frequência e temperatura, valor do módulo complexo é fortemente influenciado pelo tipo de betume. Quanto mais duro for o betume, maior será o valor do módulo de uma mistura betuminosa. Relativamente à percentagem de betume em uma mistura betuminosa, observou-se a tendência de aumento do módulo com o aumento da percentagem de betume, partindo de uma menor percentagem, até a percentagem ótima. A partir da percentagem ótima, o módulo tende a diminuir de valor.

A adição do filer em uma mistura betuminosa melhora a qualidade do mastic e conseqüentemente das propriedades mecânicas de uma mistura betuminosa. Para uma determinada percentagem de betume, a espessura do filme que recobre os agregados é dependente da qualidade do filer, o qual possui uma elevada superfície específica. Entretanto, para uma determinada quantidade limite de filer adicionada, a melhoria das propriedades diminui, especialmente se a percentagem de betume for insuficiente para garantir o recobrimento dos agregados.

A mineralogia e a forma dos agregados têm uma pequena influência no valor do módulo complexo, principalmente quando o betume é suficientemente rígido. Por outro lado, os agregados possuem uma grande importância no comportamento das misturas betuminosas quando os betumes se apresentam viscosos (a baixas frequências e elevadas temperaturas). A influência da curva granulométrica está vinculada ao volume de vazios.

O volume de vazios é um parâmetro que resulta dos factores de formulação e de compactação das misturas betuminosas, que influencia o valor do módulo complexo. A diminuição do volume de vazios resulta em um aumento do módulo das misturas betuminosas.

---

<sup>8</sup> Nos ensaios de módulo, assume-se que as misturas betuminosas apresentam um comportamento elástico linear quando a extensão do provete for inferior a  $100 \times 10^{-6}$ , em temperaturas entre -20 e 40 °C.

### Módulo Secante

Outra forma de determinar o módulo de misturas betuminosas é através da medição do módulo secante no domínio de tempo em ensaios monotónicos. Quando a taxa de carregamento for zero, pode-se obter a função relaxação,  $r(t) = 1/S(t)$  se o carregamento for uma extensão; ou pode-se obter uma função *creep*,  $f(t) = S(t)$  se o carregamento for uma tensão (Di Benedetto & De La Roche, 1998). O módulo secante  $S(t)$  é determinado através da Equação 3.34:

$$S(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} \quad (3.34)$$

onde:

$S(t)$  = módulo secante;

$\sigma(t)$  = tensão no tempo  $t$ ;

$\varepsilon(t)$  = extensão no tempo  $t$ .

O ensaio padronizado pela norma francesa (NFP 98-260-1) é um exemplo do ensaio de módulo secante. Este ensaio consiste em submeter-se um provete cilíndrico a uma tensão a uma determinada extensão de tracção  $\varepsilon_{\text{máx}}$  fixada do domínio da deformação linear do material, através de um carregamento em controlo de extensão. O ensaio é repetido para vários carregamentos em tempos  $t$ , de modo que a deformação é sempre igual a  $\varepsilon_{\text{máx}}$  (Di Benedetto & De La Roche, 1998).

### Módulo Resiliente (ou de resiliência)

De acordo com a norma DNER – ME 133 (1994), o módulo de resiliente (MR) de uma mistura betuminosa é a relação entre a tensão de tracção ( $\sigma_t$ ), aplicada repetidamente no plano diametral de uma amostra cilíndrica e a deformação específica recuperável ( $\varepsilon_r$ ) correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura, como apresenta a Equação 3.35:

$$MR = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_r} \quad (3.35)$$

onde:

MR = módulo resiliente ou de resiliência;

$\sigma_t$  = tensão de tracção;

$\varepsilon_r$  = deformação específica recuperável.

As misturas betuminosas não possuem um comportamento puramente elástico, no entanto, de acordo com Huang (1993), se a carga aplicada é pequena quando comparada à resistência do material e é repetida por um número elevado de vezes (em geral, acima de 200), a deformação sofrida pelo material é quase completamente recuperável e pode ser considerada como elástica.

O módulo resiliente pode ser determinado através de ensaios triaxiais, com ou sem tensão de confinamento, ou por ensaios de compressão diametral e compressão uniaxial (Huang, 1993). O ensaio de compressão diametral é padronizado pela ASTM D 4123 (1982) e no Brasil pela norma DNER – ME 133 (1984).

O ensaio de módulo resiliente é realizado aplicando-se uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um provete cilíndrico regular. Esta carga gera uma tensão de tracção transversalmente ao plano de aplicação da carga. Assim, mede-se o deslocamento diametral recuperável na direcção horizontal correspondente à tensão gerada, numa dada temperatura. Os provetes cilíndricos, moldados no compactador Marshall, possuem aproximadamente 100,0 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura, ou, 100,0 mm de diâmetro e altura entre 35,0 mm e 65,0 mm quando extraídos da estrada ou de amostras de maiores dimensões (Bernucci *et al.*, 2007)

De acordo com o procedimento de ensaio adoptado no Brasil, na fase de condicionamento do provete, aplica-se 200 vezes uma carga vertical repetida diametralmente ao provete, de modo a se obter uma tensão menor ou igual a 30% da resistência à tracção determinada no ensaio de compressão diametral estático (DNER – ME 138, 1994). A frequência de aplicação da carga é de 60 ciclos por minuto e uma duração de 0,1 segundos (e 0,90 segundos de repouso). Após a fase de condicionamento, mede-se através de LVDTs (*linear variable differential transformers*), a deformação resiliente para 300, 400 e 500 aplicações de carga. O módulo resiliente (MR) é determinado através das Equação 3.36:

$$MR = \frac{P}{\Delta \times H} (0,9976v + 0,2692) \quad (3.36)$$

onde:

MR = módulo resiliente (MPa);

P = carga vertical repetida aplicada directamente no provete (N);

$\Delta$  = deslocamento elástico ou resiliente, registrado para 300, 400 e 500 aplicações de carga (P) (mm);

H = altura do provete (mm);

v = coeficiente de Poisson.

A norma DNER – ME 133 (1984) recomenda ainda o seguinte:

- adoptar o valor de 0,30 para o coeficiente de Poisson (v);
- o MR do provete ensaiado será a média aritmética dos valores determinados a 300, 400 e 500 aplicações de carga (P);
- quando a temperatura<sup>9</sup> do ensaio não for especificada, o MR deve ser determinado a  $30 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

A investigação conduzida por Flintsch *et al.* (2005) com diversos ensaios de módulo em misturas betuminosas constatou que os ensaios de tracção indirecta são simples e fornecem bons resultados para caracterização da rigidez do material. No entanto, os ensaios de flexão para determinação do módulo dinâmico fornecem uma melhor caracterização da mistura betuminosa do que o módulo resiliente tendo em conta a utilização de uma gama de temperaturas, frequência e carregamento.

---

<sup>9</sup> Actualmente no Brasil, tem sido utilizada a temperatura de referência de 25 °C para a determinação do módulo resiliente.

## 3.6. CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA

### 3.6.1. Introdução

Os materiais betuminosos aplicados nos pavimentos estão sujeitos a carregamentos em pequenos intervalos de tempo quando os veículos circulam sobre eles. Este carregamento causa micro degradações que resulta na perda da rigidez do material e, por acumulação, conduz ao fenómeno da fadiga (Di Benedetto & De La Roche, 1998).

O fenómeno de fadiga é descrito como um processo de deterioração estrutural que um material sofre quando submetido a um estado de tensões e de extensões repetidas, resultando em fendas ou rotura completa, após um número suficiente de repetições de carregamento, ou seja, é a perda que o material sofre, quando solicitado repetidamente por uma carga (Preussler & Pinto, 2001).

A fadiga conduz ao aparecimento do fendilhamento resultante da aplicação repetida das cargas do tráfego e das variações térmicas (Pais, 1999).

As leis de fadiga (relação entre o estado de tensão-deformação e o número de ciclos de carga até atingir uma rotura convencional) são, em geral, estabelecidas a partir de ensaios de laboratório de cargas repetidas que são conduzidos a diferentes níveis de tensão ou de extensão, devendo reproduzir o quanto possível as condições das misturas betuminosas em camadas de pavimentos em serviço.

De acordo com Di Benedetto (1990), pode-se identificar os três seguintes comportamentos típicos das misturas betuminosas conforme a amplitude o número de carregamentos aplicados:

- para um pequeno número de carregamentos e pequenas percentagens de deformação, o comportamento observado é não-linear;
- para carregamentos de algumas centenas de ciclos e pequenas deformações ( $< 10^{-4}$ ), o comportamento observado é viscoelástico linear;
- para carregamentos da ordem de milhões de ciclos e pequenas deformações, observa-se o aparecimento de uma degradação, ou seja, o material apresenta fadiga.

Antunes (2005) considera que o fendilhamento por fadiga devido à aplicação repetida de tensões de tracção na base das camadas betuminosas induzidas pela passagem dos rodados dos veículos pesados é o único mecanismo de degradação com origem nas camadas betuminosas considerado na generalidade dos métodos de dimensionamento baseados na análise estrutural. Este fenómeno é geralmente tido em conta através da adopção de uma lei de fadiga que relaciona a extensão máxima horizontal de tracção induzida na base das camadas com o correspondente número admissível de aplicações de carga.

### 3.6.2. Tipos de solicitações

De modo a caracterizar a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa, é necessário avaliar esse comportamento, sob estado de tensão semelhante ao encontrado *in situ*. De La Roche, (1996) mediu na pista de teste do LPC (Nantes, França), o sinal das deformações através de uma célula de deslocamento colocada na face inferior de uma camada betuminosa. Como apresenta a Figura 3.22, este estudo mostrou uma alternância de deformações longitudinais de compressão-tração-compressão, durante a passagem do eixo solicitante, resultando em um sinal sinusoidal de deformação. Entretanto, a obtenção deste tipo de sinal nos ensaios de fadiga em laboratório é difícil, pois a amplitude das deformações e das tensões dos sinais obtidos pela passagem do eixo pode variar em função do tipo de tráfego e das condições climáticas (Momm, 1998).

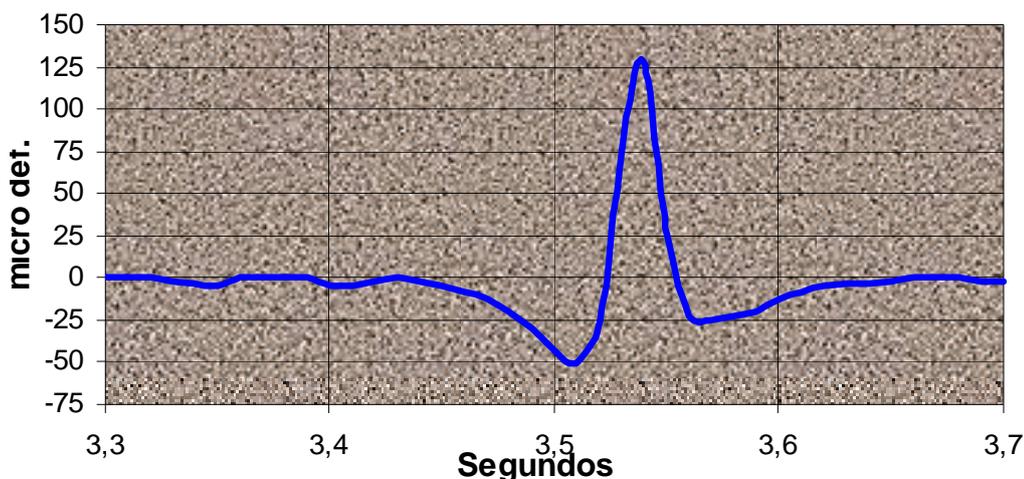


Figura 3.22 – Sinal de deformação longitudinal na face inferior de uma camada betuminosa sob o efeito da passagem de um eixo (De La Roche, 1996)

A resistência à fadiga de uma mistura betuminosa é geralmente expressa como uma relação entre a tensão ou extensão inicial e o número de repetições de carga que produzem a ruína. Este número é habitualmente determinado usando ensaios de flexão repetida, tracção directa ou ensaios diametrais realizados a determinados níveis de tensão ou extensão (Pais, 1999).

As principais formas de carregamento utilizadas em ensaios de fadiga são as seguintes: (i) sinusoidal; (ii) pulsatório; (iii) cíclica, representadas na Figura 3.23.

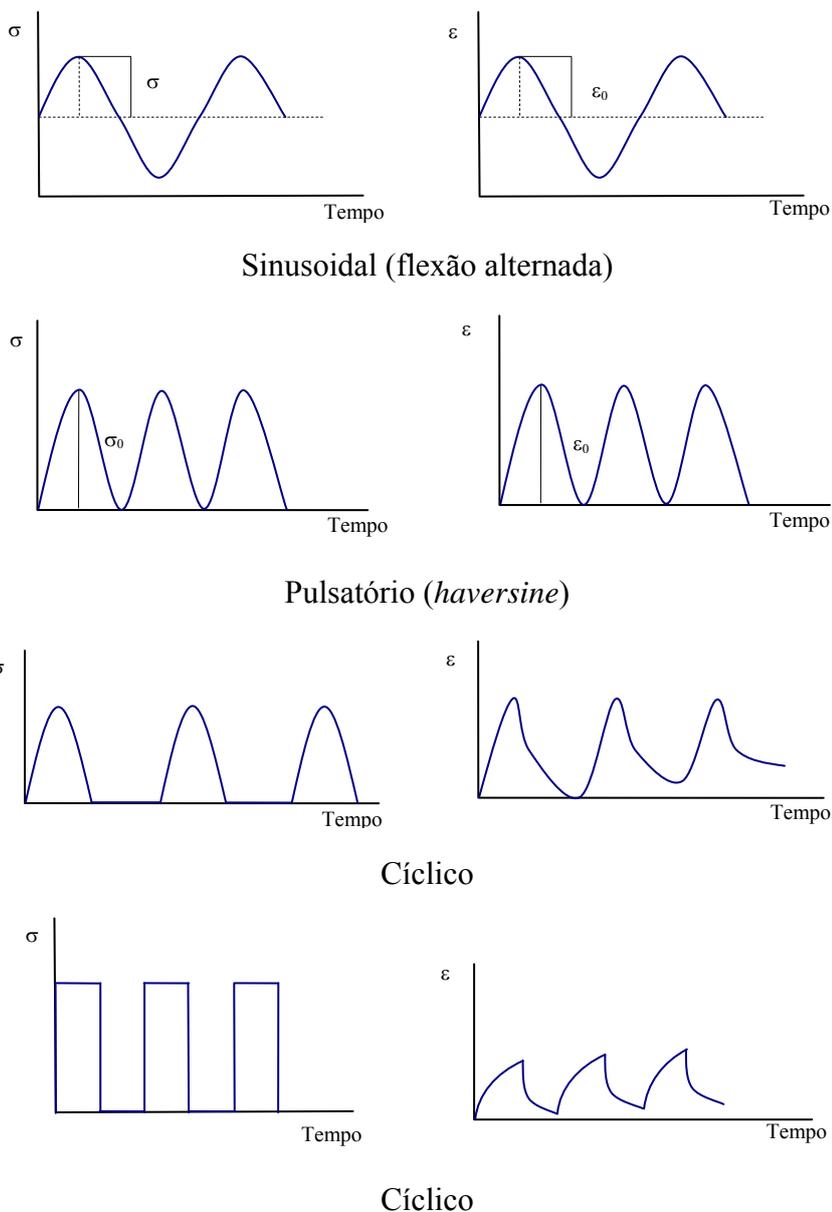


Figura 3.23 – Formas de carregamentos utilizadas em ensaios de fadiga (adaptado de Said, 1988)

Considerando um sistema de camadas de um pavimento, uma camada betuminosa espessa deforma-se menos comparada a uma delgada, de modo que o pavimento espesso aproveita menos o suporte das camadas inferiores. Nestes casos, a camada betuminosa absorve grande parte do carregamento, traduzindo-se na geração de maiores tensões nesta camada e a rigidez do material betuminoso diminui com o número de solicitações de carregamento (FHWA, 1994; FHWA, 1995).

Analogamente, uma camada betuminosa delgada de um pavimento deforma-se mais (comparado à uma espessa) de modo a tirar mais proveito do suporte das camadas inferiores, que limitarão as deflexões na camada betuminosa. Considerando que a camada betuminosa delgada possua alta rigidez, esta será propensa ao fendilhamento devido às elevadas tensões que podem ser geradas no caso de um suporte inadequado (FHWA, 1994; FHWA, 1995).

O tipo de carregamento que ocorre no pavimento sob a acção do tráfego é difícil de ser reproduzido em laboratório. Quando um rodado circula sobre um elemento de pavimento as tensões tangenciais mudam de sentido (Figura 3.24). Em laboratório aplicam-se ciclos de carga que se mantêm iguais ao longo do tempo, embora seja possível aplicar ondas de carga com formas variadas (Figura 3.23), controlando a força ou a extensão que se aplicam em cada ciclo de carga. Isto significa que a maioria dos carregamentos aplicados não reproduzem exactamente as condições do pavimento na estrada, embora dêem a possibilidade de avaliar os módulos e as características de fadiga numa gama de condições de carga (Capitão, 2003).

Em laboratório, o carregamento pode ser aplicado em tensão controlada, em que a carga ou a amplitude da tensão permanece constante durante o ensaio, ou em extensão controlada, onde a deformação ou a amplitude da extensão são mantidas constantes durante o ensaio (Monismith *et al.*, 1971).

Como nos ensaios em tensão controlada a amplitude de carga é constante nas várias aplicações desta carga, a deformação do provete aumenta à medida que a rigidez da mistura betuminosa diminui. No caso dos ensaios em extensão controlada, a extensão é mantida constante para as várias aplicações de carga, assim, a tensão no provete diminui à medida que a rigidez da mistura betuminosa diminui.

As principais diferenças entre os dois modos de carregamento, tensão controlada e extensão controlada, são as apresentadas no Quadro 3.20 (Rao Tangella *et al.*, 1990).

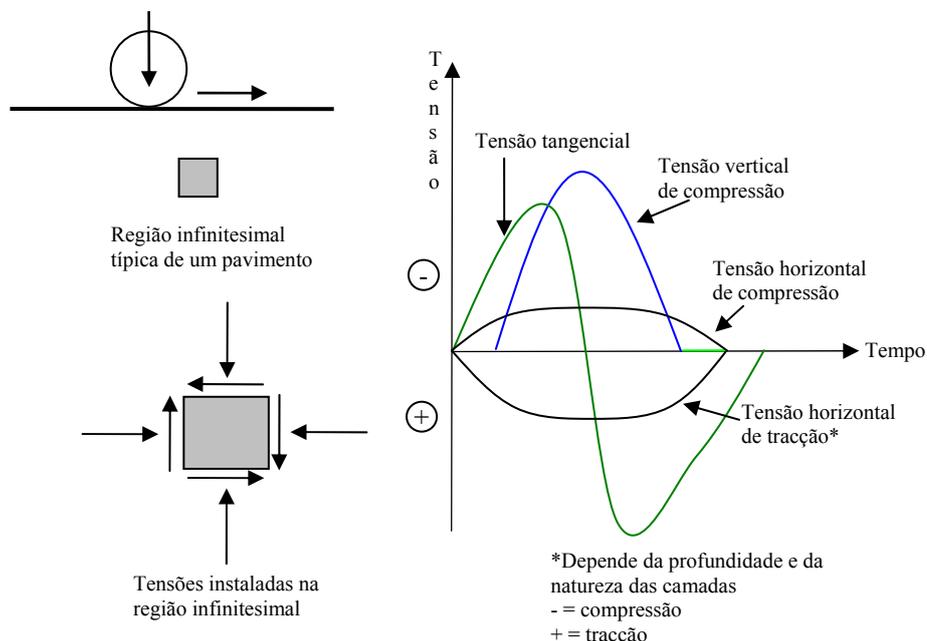


Figura 3.24 – Tensões induzidas num pavimento por uma carga em movimento

Quadro 3.20 – Diferenças entre os dois modos de carregamento (Rao Tangella *et al.*, 1990)

Factor	Ensaio em tensão controlada	Ensaio em extensão controlada
Espessura da camada betuminosa	Camadas espessas.	Camadas finas (< 7,5 cm).
Definição da rotura, número de aplicações de carga	Rotura bem definida.	Rotura arbitrária, sendo definida quando a rigidez do provete atinge uma percentagem da inicial.
Dispersão dos resultados	Menor dispersão.	Maior dispersão
Número de provetes a ensaiar	Menor número.	Maior número
Envelhecimento da mistura betuminosa	O envelhecimento aumenta a rigidez e possivelmente um aumento da resistência à fadiga.	O envelhecimento aumenta a rigidez e este provoca uma redução da resistência à fadiga.
Resistência à fadiga no critério da extensão	Menor vida.	Maior vida.
Efeito da composição da mistura betuminosa	Mais sensível.	Menos sensível.
Dissipação da energia	Rápida.	Lenta.
Propagação das fendas	Rápida em relação ao que ocorre nos pavimentos.	Mais representativo do que ocorre nos pavimentos.
Efeito dos períodos de repouso	Efeito benéfico.	Menor efeito benéfico.

No ensaio à tensão controlada, o critério de fadiga está associado a rotura do provete. A tensão é mantida constante ao longo do ensaio e as deformações atingem um valor máximo até o estágio de colapso do provete. Assim, a vida de fadiga (N) é definida como o número total de aplicações de uma carga necessária à rotura completa do provete. No ensaio à extensão controlada, o critério de fadiga não está condicionado à rotura completa do provete. De modo que a deformação seja mantida constante ao longo do ensaio, é necessário que haja uma diminuição do carregamento aplicado (Preussler & Pinto, 2001).

Os dois principais factores que afectam a resistência à fadiga relativos à composição das misturas betuminosas são a percentagem de betume e a porosidade da mistura betuminosa. O tipo de agregado tem menor influência comparativamente às outras duas variáveis. Deste ponto de vista, quanto maior for a percentagem de betume, maior é a capacidade da mistura betuminosa para resistir à fadiga.

O Quadro 3.21 apresenta a influência dos factores componentes de uma mistura betuminosa que afectam a resistência à fadiga, com base em diversas referências (Pell 1973; Monismith *et al.*, 1971; Monismith, 1981; SHRP<sub>B</sub>, 1994).

Quadro 3.21 – Influência da composição das misturas no comportamento à fadiga

Factor	Evolução do factor	Efeito da evolução do factor no ensaio	
		Tensão controlada	Extensão controlada
Viscosidade do betume	Aumento	Aumenta	Reduz
Percentagem de betume	Aumento	Aumenta	Aumenta
Granulometria do agregado	Aberta para fechada	Aumenta	Reduz
Porosidade	Redução	Aumenta	Aumenta
Temperatura	Redução	Aumenta	Reduz

Além dos factores mencionados no Quadro 3.21, a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa é influenciada pelo seguinte:

- as misturas betuminosas produzidas com betumes mais duros são menos susceptíveis às variações de temperatura e por consequência, possuem uma maior vida de fadiga;
- para percentagens de betume abaixo da percentagem óptima, a vida de fadiga diminui;
- em ensaios que cuja forma de carregamento permite períodos de repouso, ocorre o fenómeno da auto reparação que pode ser traduzido como um ganho de vida dos provetes;

- a forma dos agregados possui uma influência indirecta sobre a duração da vida das misturas betuminosas, sendo a porosidade o factor mais influente;
- a percentagem de filer tem influência na rigidez da mistura betuminosa, assim, para um teor óptimo de filer, a vida de fadiga é maior;
- entretanto, dependendo do tipo de filer, dada a sua elevada superfície específica elevada, a resistência à fadiga pode ser menor;
- em ensaios à extensão controlada e realizados a temperaturas de 0 °C a 25 °C, a duração da vida de fadiga aumenta com o aumento da temperatura; enquanto que em ensaios à tensão controlada, a vida diminui com o aumento de temperatura;
- esta aparente contradição entre a fadiga nos ensaios à extensão e extensão controlada reflecte a variação do módulo de rigidez das misturas betuminosas com a temperatura. Se a temperatura aumento o módulo diminui e, mantendo os outros factores influentes iguais, nos ensaios à tensão controlada a deformação cresce ao longo do ensaio (maior aquecimento interno) e nos ensaios à extensão controlada a tensão diminui ao longo do ensaio (menor aquecimento interno);
- o efeito da frequência de aplicação de carga é semelhante ao da variação da temperatura, ou seja, com aumento da frequência aumenta a duração da vida para os ensaios à tensão controlada e uma diminuição da duração da vida para ensaios à extensão controlada;
- entretanto, o efeito da variação da duração da vida não pode ser considerado proporcional à variação do módulo em função da frequência para os ensaios à extensão controlada.

### **3.6.3. Critérios de rotura**

O ensaio clássico que caracteriza o fenómeno de fadiga consiste em submeter provetes de misturas betuminosas à solicitações repetidas e registrar o número de ciclos até que entre em rotura. A análise da resistência à fadiga pode ser feita de formas diferentes, seja através da análise clássica ou da energia dissipada.

O critério de rotura arbitrado em ensaios de fadiga (ensaio em extensão controlada) para misturas betuminosas é definido como correspondente ao decréscimo de 50% da rigidez em um provete de mistura betuminosa do seu valor inicial. Assim, em ensaios à tensão

controlada, o valor da extensão irá duplicar, enquanto que nos ensaios à extensão controlada, o valor da tensão irá reduzir-se para a metade do seu valor inicial.

A curva que representa a duração da vida *versus* a amplitude do carregamento aplicado (tensão ou extensão) é a denominada curva de Wohler, que foi o primeiro investigador do fenómeno da fadiga, em 1852 (Di Benedetto *et al.*, 1997). A Figura 3.25 apresenta um exemplo da curva de Wholer, representada através da Equação 3.37:

$$\log N = A \times \log S + B \quad (3.37)$$

onde:

N = vida à fadiga, representada pelo número de ciclos;

S = amplitude do carregamento aplicado (tensão ou extensão);

A, B = parâmetros de regressão.

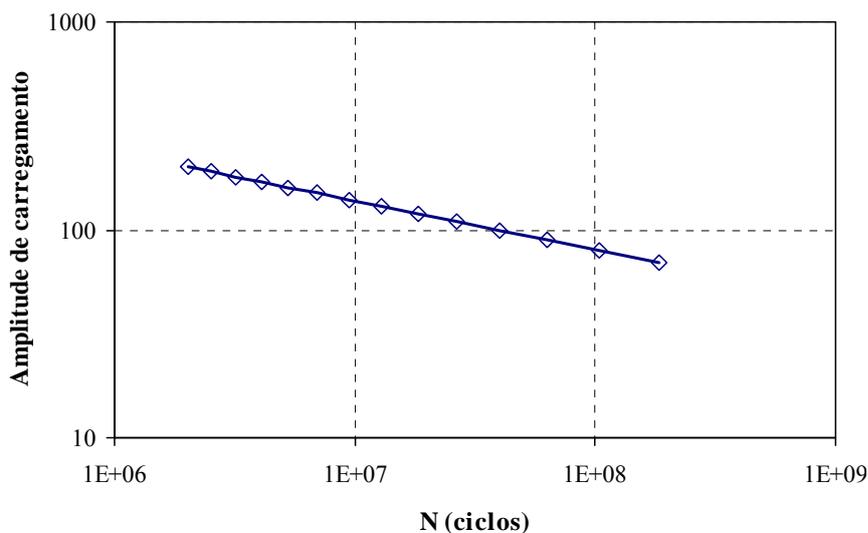


Figura 3.25 – Exemplo da curva de Wohler

Os critérios de rotura nos ensaios de extensão controlada e de tensão controlada são diferentes. No entanto, ambos podem ser expressos por relações como o apresentado na Equação 3.38 desenvolvida por Monismith (1981):

$$N = a \times \left( \frac{1}{\varepsilon \text{ ou } \sigma} \right)^b \quad (3.38)$$

onde:

$N$  = vida de fadiga expressa em número de solicitações de carga;  
 $\varepsilon$  ou  $\sigma$  = extensão ou tensão de tracção controlada, respectivamente;  
 $a, b$  = constantes determinadas experimentalmente.

Nos ensaios em extensão controlada, a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa, pode ser caracterizada em função do nível de extensão aplicado e da rigidez inicial da mistura betuminosa. A relação entre a resistência à fadiga e o nível de extensão e a rigidez da mistura betuminosa, pode ser expressa pelo modelo desenvolvido por Monismith *et al.* (1985), apresentado na Equação 3.39:

$$N_f = a \left( \frac{1}{\varepsilon_0} \right)^b \times \left( \frac{1}{S_0} \right)^c \quad (3.39)$$

onde:

$N_f$  = resistência à fadiga;  
 $\varepsilon_0$  = extensão de tracção;  
 $S_0$  = rigidez inicial da mistura betuminosa;  
 $a, b, c$  = coeficientes determinados experimentalmente.

### **Energia Dissipada e resistência à fadiga**

Considerando que a rigidez de uma mistura betuminosa, para um determinado número de repetições de carga, é calculada pelo quociente da tensão de tracção pela extensão respectiva, esta diminui com o número de aplicações de carga e apresenta valores diferentes para ensaios à extensão ou deformação controlada, como mostra a Figura 3.26.

Os ensaios acelerados para a determinação do comportamento à fadiga das misturas betuminosas provocam um aquecimento do material, responsável por uma diminuição da rigidez da mistura betuminosa nos primeiros ciclos de carga. Após este período, o material recupera a sua rigidez função da temperatura de ensaio. Para análise da vida à fadiga, a parte do ensaio correspondente ao aquecimento da mistura betuminosa deve ser eliminada, sendo a rigidez inicial obtida por extrapolação do patamar de rigidez de variação linear (Di Benedetto *et al.*, 1997).

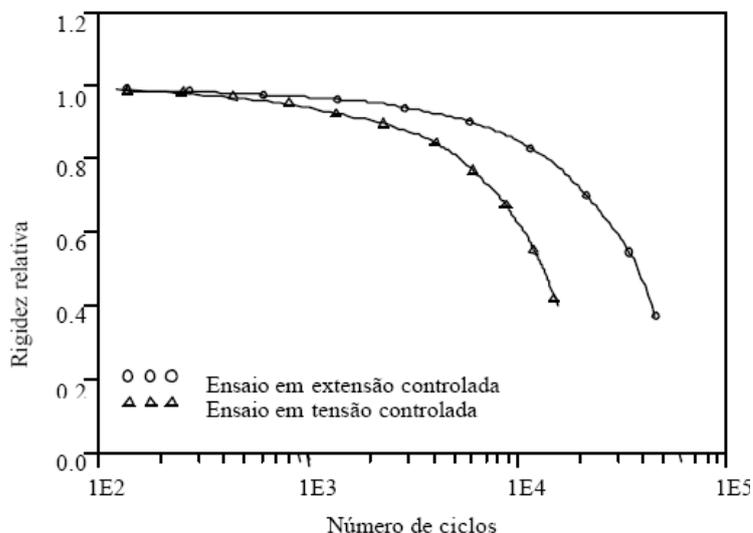


Figura 3.26 – Variação da rigidez em ensaios à tensão e extensão controlada (adaptado de SHRP<sub>B</sub>, 1994)

Conforme mencionado anteriormente, a resistência à fadiga também é dependente do modo de carregamento. Nos ensaios realizados em tensão controlada, a rotura é bem definida uma vez que estes apresentam fendas que se desenvolvem até à rotura. Nos ensaios de extensão controlada, a rotura não é visível pelo que se convencionou que a mistura betuminosa atingiu a ruína quando a sua rigidez inicial foi reduzida em 50%, (extensão controlada) como mostrado no exemplo da Figura 3.27.

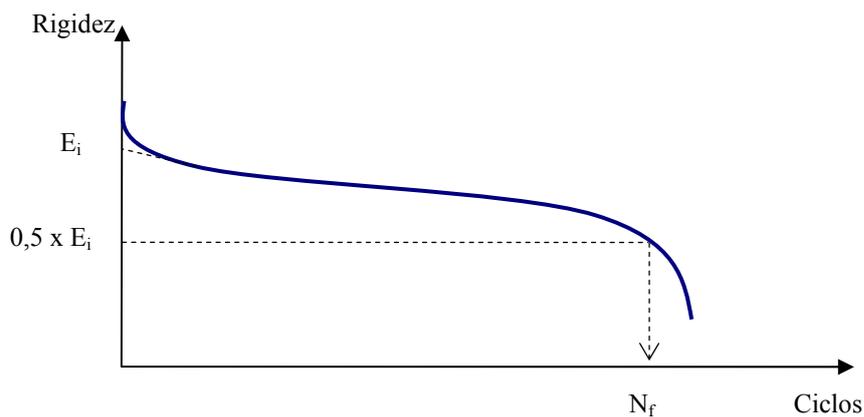


Figura 3.27 – Definição da ruína em ensaios de flexão à extensão controlada (adaptado de Di Benedetto *et al.*, 1997)

Na análise da resistência à fadiga através da energia dissipada tem-se que, para cada ciclo de carga, para um provete ensaiado sob a acção de uma carga pulsatória, é igual à área dentro do

ciclo de histerese tensão-extensão, como apresenta a Figura 3.28. Esta energia dissipada por ciclo de carga varia em função do modo de carregamento. Em tensão controlada a energia dissipada aumenta com o número de aplicações de carga, enquanto que em extensão controlada se verifica o contrário (Figura 3.29). A energia dissipada acumulada até a rotura, num ensaio de flexão, é igual à área entre a curva da energia dissipada e o número de aplicações de carga.

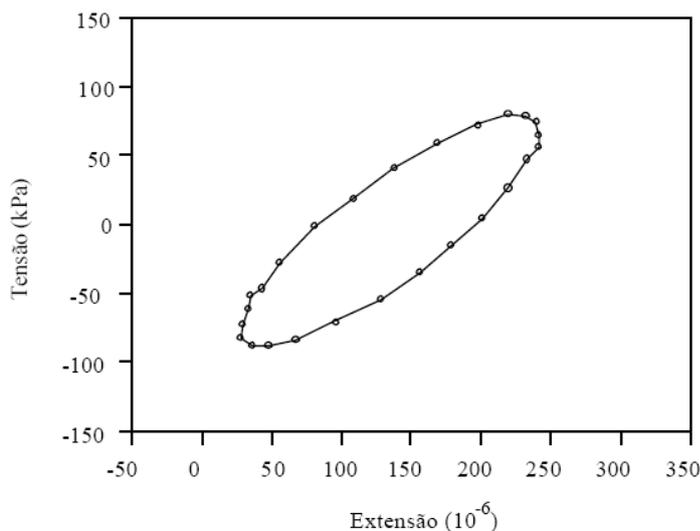


Figura 3.28 – Ciclo de histerese tensão-extensão num ensaio de fadiga por flexão à extensão controlada (adaptado de SHRP<sub>B</sub>, 1994)

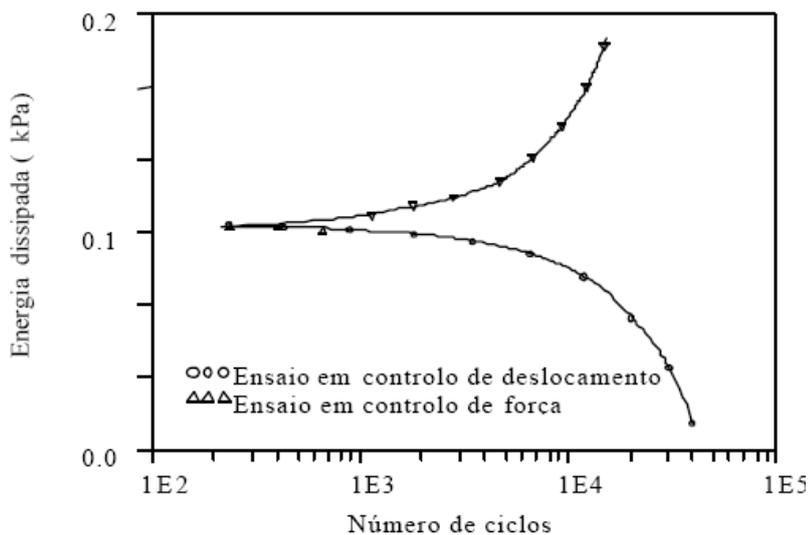


Figura 3.29 – Variação da energia dissipada em ensaios à tensão e extensão controlada (adaptado de SHRP<sub>B</sub>, 1994)

Para um carregamento sinusoidal, a energia dissipada por ciclo de carga é dada através da Equação 3.8, representada aqui para ciclo “i”, como mostra a Equação 3.40:

$$w_i = \pi \times \sigma_i \times \varepsilon_i \times \text{sen}\phi_i \quad (3.40)$$

onde:

$w_i$  = energia dissipada no ciclo i;

$\sigma_i$  = amplitude da tensão no ciclo i;

$\varepsilon_i$  = amplitude da extensão no ciclo i;

$\phi_i$  = ângulo de fase entre tensão e extensão no ciclo i.

A energia dissipada acumulada até à rotura é definida pela Equação 3.41:

$$w_i = \sum_{i=1}^{N_f} \pi \times \sigma_i \times \varepsilon_i \times \text{sen}\phi_i \quad (3.41)$$

onde:

$N_f$  = número de ciclos até a rotura;

e as demais variáveis já definidas anteriormente.

Entre o número de ciclos de carga até à rotura e a respectiva energia dissipada acumulada existe uma relação única. Esta relação permite que os ensaios laboratoriais sejam realizados mais rapidamente, com a utilização de menor número de ensaios para cada condição de ensaio e que se possa levar em conta carregamentos compostos. Estes factores são responsáveis pelo aparecimento de relações entre o número de ciclos até à rotura e a energia dissipada acumulada (Pais, 1999).

Vários investigadores, inicialmente Chomton & Valayer (1972) e posteriormente van Dijk (1975), utilizaram o critério da energia dissipada, para prever o comportamento à fadiga das misturas betuminosas. Van Dijk & Visser (1977) sugeriram que a energia dissipada permite obter resultados descritos sob a forma de uma única relação entre o número de aplicações de carga até à ruína e a energia dissipada acumulada, independentemente do tipo de ensaio, das condições de ensaio e do tipo de mistura betuminosa utilizada.

Uma relação desse tipo torna possível prever o comportamento à fadiga de misturas betuminosas em laboratório sob uma grande variedade de condições, tendo por base resultados de ensaios de fadiga. Esta relação pode ser definida da forma semelhante à apresentada na Equação 3.42:

$$W_N = A(N)^z \quad (3.42)$$

onde:

$N$  = vida de fadiga;

$W_N$  = energia dissipada acumulada até a fadiga;

$A, z$  = coeficientes determinados experimentalmente.

A análise da resistência à fadiga das misturas betuminosas recorrendo ao critério da energia dissipada tem sido estudada por vários autores não sendo por enquanto um tema que reúna um amplo consenso.

#### 3.6.4. Ensaio de fadiga

O estudo laboratorial da resistência à fadiga numa mistura betuminosa deve obedecer a várias hipóteses de ensaio. Estas hipóteses geralmente descrevem o comportamento à fadiga das misturas betuminosas, ensaiadas em laboratório, servindo também para utilização em modelos analíticos de dimensionamento de pavimentos.

As hipóteses para o estudo da resistência à fadiga devem ser (SHRP, 1994<sub>B</sub>):

- hipótese 1 – o fendilhamento por fadiga é causado pela aplicação repetida das cargas dos veículos. Nos pavimentos flexíveis, a fadiga resulta da tensão ou extensão de tracção na base das camadas betuminosas. A extensão de tracção principal máxima é considerada determinante no fendilhamento por fadiga;
- hipótese 2 – para a análise da resistência à fadiga, o estado crítico de tensão ou extensão na estrutura do pavimento pode ser estimado dum modo aproximado usando a teoria linear da elasticidade, na qual o comportamento mecânico das misturas betuminosas é caracterizado pelo seu módulo de rigidez e coeficiente de Poisson;

- hipótese 3 – Os ensaios devem ser levados até à rotura da mistura betuminosa de modo a obter um valor, o mais correcto possível, para a resistência à fadiga;
- hipótese 4 – nos ensaios laboratoriais de determinação da resistência à fadiga é preferível a utilização de cargas pulsatórias em vez das sinusoidais, porque os períodos de repouso permitem a relaxação da mistura betuminosa, tal como acontece às misturas betuminosas *in situ*;
- hipótese 5 – embora os pavimentos sofram fadiga como resposta à flexão repetida a que estão submetidos, a fadiga é basicamente um fenómeno de tracção, e os ensaios sobre provetes podem ser realizados tanto em tracção como em flexão;
- hipótese 6 – o modo de carregamento é um factor crítico na análise das misturas betuminosas, dado as misturas betuminosas apresentarem um comportamento em tensão controlada diferente do apresentado para extensão controlada. O efeito do modo de carregamento faz sentir-se principalmente na velocidade de propagação das fendas e não no tempo de início da fenda;
- hipótese 7 – os ensaios de resistência à fadiga acelerados pela aplicação de elevados níveis de tensões ou extensões são satisfatórios para a análise do comportamento das misturas betuminosas;
- hipótese 8 – em carregamento cíclico, o número de aplicações de carga até à ruína da mistura betuminosa está relacionada com o nível de tensão ou extensão (Equação 3.37);
- hipótese 9 – em carregamento composto ou misto, devido, por exemplo, a múltiplas temperaturas e/ou vários níveis de tensão ou extensão, o fendilhamento de uma dada mistura betuminosa pode ser deduzido quando se verifica a hipótese de Miner (Hipótese de danos acumulados), dada pela Equação 3.43:

$$\sum \left( \frac{n_i}{N_i} \right) = 1 \quad (3.43)$$

onde:

$n_i$  = número de aplicações de tensão  $\sigma_i$  ou extensão  $\varepsilon_i$  ;

$N_i$  = número de aplicações até à ruína de tensão  $\sigma_i$  ou extensão  $\varepsilon_i$ .

- hipótese 10 – os princípios da mecânica da fractura representam a aproximação mecanicista mais fiável para estimar a propagação das fendas nas estruturas dos pavimentos.

Os ensaios de fadiga devem ser realizados de modo a não haver acumulação de deformação permanente. Apesar deste fenómeno se verificar nas misturas betuminosas, em simultâneo com o fenómeno do fendilhamento por fadiga, ele não deve existir durante os ensaios de resistência à fadiga por dificultar a análise dos resultados (Pais, 1999).

A avaliação da resistência à fadiga pode ser realizada à escala real, em troços experimentais de pavimentos reais submetidos ao tráfego controlado ou em pistas laboratoriais lineares ou circulares. Em laboratório, os ensaios existentes para avaliação da resistência à fadiga envolvem uma variedade de técnicas de ensaio (Quadro 3.19), tipos de equipamentos, configuração, tipo e modo de carregamento, condições de ensaio e procedimentos de análise, dentre os quais se destacam:

- flexão simples ou alternada;
  - flexão 3 pontos (1 carga, 2 pontos de apoio);
  - flexão 4 pontos (2 cargas, 2 pontos de apoio);
- flexão em consola;
- tracção indirecta.

### **Ensaio de flexão**

A maior parte dos dados existentes de ensaios de resistência à fadiga foram desenvolvidos em ensaios de flexão, em que as tensões ou extensões são aplicadas repetitivamente até que o provete atinja a rotura, ou exiba alterações nas suas características que tornem a mistura betuminosa inadequada ao fim a que se destina (Pais, 1999).

Vários tipos de equipamento, baseados na flexão, foram desenvolvidos para estudar a resistência à fadiga das misturas betuminosas, como os seguintes:

- ensaios de flexão sobre vigas prismáticas nos quais as cargas são aplicadas em três ou quatro pontos;
- ensaios de flexão sobre vigas em consola sujeitas a cargas sinusoidais rotacionais;
- ensaios de flexão sobre vigas (provetes) trapezoidais em consola sujeitas a cargas aplicadas no extremo livre.

No ensaio de flexão em 3 ou 4 pontos, uma viga prismática é sujeita a uma carga ou deformação constante ao longo do ensaio. No caso da flexão em quatro pontos verifica-se a existência de uma zona central de momento flector constante com esforço de corte nulo, mais aconselhável para a realização de ensaios de resistência à fadiga. A frequência de ensaio de 10 Hz é suficiente para permitir um ensaio rápido enquanto ainda é representativa de pulsos de carga gerados pelo tráfego (SHRP<sub>B</sub>, 1994).

As vigas em consola sujeitas a cargas sinusoidais rotacionais foram inicialmente utilizadas por Pell (1973) e Pell & Cooper (1975), na Universidade de Nottingham, utilizando um equipamento de rotação de consolas, na qual o provete é montado verticalmente sobre um veio e a carga é aplicada no topo, sendo induzida uma tensão constante no provete.

Os provetes trapezoidais em consola sujeitos à flexão devem o seu desenvolvimento aos investigadores da Shell (van Dijk, 1975), da Bélgica (Verstraeten, 1972) e do LCPC (Bonnot, 1986). Nestes ensaios, as bases (maior e menor) do provete são engastadas, mantendo-se estática a base maior ao longo do ensaio, e na base menor é aplicada uma extensão de sinal sinusoidal.

As principais vantagens dos ensaios de flexão são as seguintes:

- os ensaios são bem conhecidos sendo de uso generalizado e de fácil compreensão;
- os resultados podem ser usados directamente (com um apropriado factor de correlação entre resultados laboratoriais e comportamento em serviço) no dimensionamento estrutural de pavimentos;
- os resultados obtidos sob tensão controlada podem ser usados para o dimensionamento de pavimentos cuja espessura betuminosa é considerável, enquanto que os obtidos em extensão controlada devem ser usados para pavimentos de reduzida espessura betuminosa;
- na flexão em quatro pontos, a rotura do provete ocorre numa zona de tensão uniforme e sem tensões de cisalhamento. Este facto ajuda a reduzir o coeficiente de variação dos resultados dos ensaios, requerendo-se menos ensaios que na flexão em três pontos.

As principais limitações destes ensaios são as seguintes:

- na flexão em três pontos o início da rotura pode não ocorrer na zona de tensão máxima, como seria desejável, com consequências gravosas na avaliação da rigidez e do comportamento à fadiga;
- ao contrário do que se passa na estrutura de um pavimento, o estado de tensão é essencialmente uniaxial (tensão simples).

### **Compressão Diametral**

O ensaio de compressão diametral é executado sobre um provete cilíndrico sendo o seu carregamento em compressão, o qual actua paralelamente ao plano diametral vertical. Esta configuração de carga desenvolve uma tensão de tracção uniforme no provete paralelamente à direcção de aplicação da carga e ao longo do plano diametral vertical.

O ensaio é de execução simples sendo considerado um método eficaz para a caracterização dos materiais quanto às propriedades fundamentais, nomeadamente o módulo de rigidez e o coeficiente de Poisson, tendo sido largamente utilizado por Kennedy & Hudson (1968).

Adicionalmente ao estado biaxial de tensão, existem diferenças entre a flexão simples e os ensaios de compressão diametral. As deformações permanentes, não permitidas nos ensaios de flexão, são possíveis nos ensaios de compressão diametral enquanto as tensões inversas são impraticáveis. O efeito previsível destas diferenças é a obtenção de uma menor resistência à fadiga nos ensaios de compressão diametral, comparativamente aos ensaios de flexão.

No Brasil, o ensaio de fadiga por compressão diametral a tensão controlada é muito utilizado e pode ser realizado no mesmo equipamento utilizado para o ensaio de módulo de resiliência, com temperatura controlada. Neste ensaio, a carga aplicada induz tensões normais horizontais de 10% a 30% do valor da resistência à tracção. A carga é aplicada com duração de 0,1 s e descanso de 0,9 s. A deformação aumenta até à rotura completa do provete (Medina, 2005).

As principais vantagens deste método são as seguintes: (i) o ensaio é muito simples; (ii) a rotura é iniciada numa zona de tensões uniformes; (iii) existe um estado biaxial de tensões que, possivelmente, representa melhor as condições *in situ*.

A principal desvantagem deste método é que apesar de existir um estado biaxial de tensão no centro do provete, é impossível variar a razão entre as componentes horizontal e vertical e, deste modo, simular o estado de tensão em pontos críticos num pavimento.

### **3.7. CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE**

#### **3.7.1. Mecanismos de deformação permanente**

Nesta secção, dedicada ao estudo da deformação permanente, são avaliados os mecanismos que regem este fenómeno e factores que afectam a deformação permanente de misturas betuminosas em serviço.

No respeitante aos ensaios de laboratório para avaliação da deformação permanente das misturas, são apresentados os ensaios mais comumente utilizados e dada ênfase especial ao ensaio utilizado nesta investigação (ensaio de corte a altura constante).

A investigação conduzida por Hofstra & Klomp (1972) em pistas experimentais indicou que a deformação de corte ocorre primeiro do que a densificação como mecanismo de deformação permanente.

Eisenmann & Hilmer (1987) concluíram que a deformação permanente era causada principalmente pela deformação de fluência sem mudança de volume. Na abertura ao tráfego, denominada fase inicial, o aumento da deformação irreversível que ocorre nos flancos dos pneus é claramente superior do que nas zonas de irrompimento. Nesta fase inicial de abertura ao tráfego a compactação das camadas do pavimento pelo tráfego tem uma grande importância na deformação permanente. Após a fase inicial, o volume do material deslocado pelos rodados é aproximadamente igual ao volume das zonas de irrompimento adjacentes. Isto é uma indicação que a compactação devida ao tráfego está completa e que a partir desta fase a deformação permanente é causada essencialmente por deslocamento com constância de volume. Esta fase é considerada representativa do comportamento da deformação permanente durante a vida do pavimento.

A deformação permanente que ocorre através das camadas betuminosas é maior próxima à carga e gradualmente decresce com a profundidade. Tendo em conta que a deformação permanente é causada por fluência plástica, o conceito da distribuição da deformação permanente com a profundidade é razoável de modo que uma maior resistência à deformação plástica é encontrada a maiores profundidades ao contrário da tensão de corte (Hofstra & Klomp, 1972).

Sousa *et al.* (1991) avaliaram a resistência à deformação permanente em misturas betuminosas. Nesta investigação, para as misturas estudadas, os autores relacionaram as características das misturas que afectam a deformação permanente nos pavimentos rodoviários, como as apresentadas no Quadro 3.22.

Quadro 3.22 – Factores que afectam resistência à deformação permanente de misturas betuminosas (Sousa *et al.*, 1991)

Parâmetro	Factor	Mudança do factor	Efeito na resistência à deformação permanente
Agregado	Textura superficial	Lisa para rugosa	Aumenta
	Gradação	Descontínua ( <i>gap</i> ) para contínua	Aumenta
	Forma	Redonda para angular	Aumenta
	Tamanho	Aumento do tamanho máximo	Aumenta
Betume	Rigidez <sup>(i)</sup>	Aumento	Aumenta
Mistura	Percentagem de betume	Aumento	Diminui
	Volume de vazios <sup>(ii)</sup>	Aumento	Diminui
	VMA	Aumento	Diminui <sup>(iii)</sup>
	Método de compactação	<sup>(iv)</sup>	<sup>(iv)</sup>
Condições locais	Temperatura	Aumento	Diminui
	Estado de tensão/extensão	Aumento da pressão de contacto	Diminui
	Repetição de cargas	Aumento	Diminui
	Água	Seco para molhado	Diminui se a mistura for sensível à água

Observações referentes ao Quadro 3.22:

- (i) Refere-se à rigidez na qual a deformação permanente está sendo determinada. Modificadores de ligante podem ser adicionados para aumentar a rigidez a temperaturas críticas, de modo a reduzir o potencial de deformação permanente;
- (ii) Quando o volume de vazios for inferior a 3%, o potencial de deformação permanente das misturas aumenta;
- (iii) É discutido que valores muito baixos de VMA (menos que 10%, por exemplo) devem ser evitados;
- (iv) O método de compactação, tanto no laboratório como *in situ*, pode influenciar a estrutura do sistema e consequentemente a deformação permanente.

## Agregados

Relativamente à granulometria dos agregados, a granulometria densa é desejável para mitigar os efeitos da deformação permanente. Quando bem compactadas, as misturas com gradações densas ou contínuas com poucos vazios possuem mais pontos de contacto entre as partículas do que as gradações abertas ou descontínuas. Como exemplo, Brown & Pell (1974) concluíram que as misturas do tipo *gap graded* apresentam maiores deformações do que as misturas de gradação contínua, devido ao facto que nas misturas descontínuas os agregados não estão totalmente interligados. A interligação é um factor importante no comportamento da mistura a temperaturas elevadas.

A textura dos agregados representa um papel extremamente importante no comportamento à deformação permanente e a forma da partícula é também essencial. Uge & van de Loo (1974) investigaram a resistência à deformação permanente em misturas betuminosas utilizando agregados angulares (britados) e arredondados (seixos rolados) e concluíram que para um dado volume de vazios, os agregados angulares produziram misturas com maior rigidez. No entanto, neste estudo, não foi possível avaliar o efeito da textura dos agregados angulares, tendo em conta a dificuldade em determinar separadamente os dois efeitos (forma e textura).

Quanto ao tamanho dos agregados, considerando o aumento da pressão de insuflagem dos pneus, a carga por eixo e a repetição de cargas, o uso de agregados maiores (diâmetro máximo superiores a 25,0 mm) em misturas contribuem para a melhoria da resistência à deformação permanente das misturas betuminosas.

Davis (1988) produziu misturas betuminosas com agregados de tamanho máximo de 38,0 mm, com alta concentração de agregados e baixo volume de vazios que apresentaram excelente desempenho em relação à deformação permanente. O autor concluiu que o uso de agregados com diâmetro máximo equivalente a 2/3 da espessura da camada é benéfico para redução da deformação permanente.

## **Betume**

Com base no ensaio de compressão simples com a aplicação de cargas estáticas (*creep*), Mahboub & Little (1988) concluíram que betumes menos viscosos tornam as misturas menos rígidas e mais susceptíveis às deformações.

Diversos estudos têm sido realizados com modificadores de betumes tendo em conta a melhoria da resistência à deformação permanente, como por exemplo as misturas betuminosas com betume-borracha.

Leite *et al.* (2000) avaliaram a resistência às deformações permanentes em misturas betuminosas com betume-borracha, com os polímeros SBS (estireno-butadieno) e EVA (etil vinil acetato) e com betume convencional através de ensaios de *creep* e com o simulador de tráfego LPC (*L'orniéreur type LPC*). Os resultados indicaram uma melhoria na resistência às deformações permanentes com os betumes modificados em relação ao convencional.

## **Composição da mistura**

A percentagem de betume afecta a capacidade de uma mistura na resistência à deformação permanente. Mahboub & Little (1988) mostraram que uma elevada percentagem de betume produz um baixo volume de vazios e aumenta o potencial de deformação permanente. A redução dos vazios como resultado de uma elevada percentagem de betume indica que os vazios estão preenchidos com betume. Como resultado, o aumento da percentagem de betume é equivalente a introdução de lubrificantes entre as partículas de agregados, separados por uma pequena rede de vazios. Este tipo de mistura é susceptível à deformação permanente.

Quando o volume de vazios se situa abaixo dos 2 a 3%, o ligante actua como um lubrificante entre os agregados. Sem o esqueleto formado pelos agregados a resistir as tensões de corte, que aparecem junto aos flancos dos pneus, a mistura desenvolve rapidamente elevadas deformações permanentes, resultando no aparecimento de rodeiras (Sousa *et al.*, 1994).

Tendo em conta o acima exposto, as misturas devem ser produzidas com um volume de vazios superior a 3%. No entanto, o volume de vazios não pode ser elevado, considerando que

quanto maior for o volume de vazios da mistura, maior será o efeito da pós-compacção causada pelo tráfego, que aumenta o fenómeno das deformações permanentes.

A compactação é um factor crítico no comportamento da mistura em relação à deformação permanente. Factores como a orientação e interligação das partículas de agregados devem ser observados em misturas compactadas em laboratório.

### **Condições locais**

A temperatura produz um efeito significativo no comportamento de materiais betuminosos quanto à deformação permanente.

Diversos investigadores têm observado o aumento de deformações permanentes nos pavimentos no verão (Hofstra & Klomp, 1972; Linden & Van der Heide, 1987; Bonnot, 1986).

As pesquisas em laboratório para avaliar a deformação permanente devem reproduzir às condições de temperatura encontradas em campo. Bonnot (1986) seleccionou, para condução de ensaios em laboratório, as temperaturas de 60 °C e 50 °C para camadas de desgaste e de base, respectivamente. Estas temperaturas são relativas às condições mais desfavoráveis esperadas no verão em França.

### **3.7.2. Ensaios para avaliação da deformação permanente**

Os ensaios normalmente utilizados para caracterizar a resistência à deformação permanente das misturas betuminosas são os seguintes:

- ensaios de compressão simples, com a aplicação de cargas estáticas ou repetidas;
- ensaios de compressão triaxial, com aplicação de cargas estáticas ou repetidas;
- ensaios de corte, com aplicação de cargas estáticas ou repetidas;
- ensaios com cargas rolantes, em laboratório ou à escala real.

## **Ensaio de Compressão Simples**

Os ensaios de compressão simples estáticos, ou ensaios de fluência, consistem na aplicação de uma carga sobre um provete cilíndrico, medindo-se os deslocamentos ao longo do tempo e com o controlo da temperatura. No entanto, os ensaios realizados com carregamento repetido têm demonstrado ser mais adequados do que os estáticos para a avaliação da deformação permanente em misturas betuminosas (Whiteoak, 2003).

Nos ensaios estáticos utiliza-se uma temperatura e um nível de tensão fixos. Nos ensaios de cargas repetidas, embora a temperatura seja mantida constante, a carga é variável ao longo do tempo, havendo que fixar o tempo de carga e o tempo de repouso entre as aplicações de carga, bem como o modo como a tensão varia ao longo do tempo (Capitão, 2003).

O procedimento de ensaio utilizado na Universidade de Nottingham com o equipamento NAT (*Nottingham Asphalt Tester*) consiste na aplicação de uma tensão de 100 kPa, com tempos de carga e descarga iguais com duração de 1 s. Em uma nova versão do ensaio, podem ser aplicados ciclos de carga com 0,2 s de tempo e de 1,8 s de descarga. Em geral são aplicados 3600 ciclos de carga e o ensaio tem a duração aproximada de 2 horas. Os provetes são submetidos a um pré-condicionamento de carga com 10 minutos de duração, em que se aplica uma carga de 10 kPa.

## **Ensaio de Compressão Triaxial**

O ensaio de compressão triaxial com aplicação de cargas repetidas é realizado com tensão de confinamento constante, em que a carga vertical (tensão deviatória) tem uma variação sinusoidal e a carga horizontal (tensão de confinamento) é constante ao longo do ensaio. O ensaio pode ser realizado com tensão de confinamento variável, em que se faz variar ciclicamente, tanto a tensão de confinamento quanto a tensão desviatória. Tendo em conta a dificuldade da execução deste ensaio considerando a dificuldade em fazer variar a amplitude e a direcção das tensões principais, em geral, as tensões principais são fixadas em uma só direcção (Whiteoak, 2003).

## Ensaio com Cargas Rolantes em laboratório

### *L'orniéreur type LPC*

Os ensaios que utilizam cargas rolantes são conhecidos como ensaios “*wheel tracking*” e foram desenvolvidos para simular a sucessiva passagem dos rodados dos veículos para avaliação do comportamento das misturas betuminosas em relação à deformação permanente.

O equipamento desenvolvido pelo LPC, na França, denominado *l'orniéreur type LPC* (simulador de tráfego na literatura portuguesa), possibilita avaliar o comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas. A Figura 3.30 apresenta o equipamento *LPC* da Universidade de São Paulo (USP).



Figura 3.30 – Simulador de tráfego LPC da USP

O ensaio é realizado submetendo-se provetes a um número elevado de ciclos à ação da roda do simulador de tráfego, à frequência de 1 Hz e à temperatura de 60 °C. As medidas da deformação são realizadas para os ciclos 100; 1000; 3000; 10000; 30000. O afundamento é determinado pela média de 15 pontos de leitura. A carga adoptada é a de uma pressão equivalente a 0,56 MPa. O limite da deformação, medido no ciclo 30000, é de no máximo 10% da altura do provete.

Outro exemplo deste tipo de ensaio é o desenvolvido pelo Departamento de Transportes da Georgia (USA) denominado APA (*Asphalt Pavement Analyzer*). Neste ensaio, após um

condicionamento térmico do provete, este é colocado no interior de uma manga de borracha dura, a qual é pressurizada com ar a 690 kPa. Posteriormente faz-se passar uma roda num movimento de vaivém sobre o topo da manga cerca de 8000 vezes.

As temperaturas utilizadas no ensaio variam de 40 °C a 60 °C. Enquanto o ensaio decorre, o provete encontra-se confinado por placas metálicas. O critério de aceitação da mistura considera a média dos cavados de rodeira e esta deve ser inferior a 7,6 mm.

### ***Wheel Tracking***

O ensaio através do equipamento *Wheel Tracking* ou simulador de tráfego é realizado de acordo com a norma espanhola NLT 173, 1984 (*Resistencia a la Deformación Plástica de las Mezclas Betuminosas Mediante la Pista de Ensayo de Laboratorio*). O equipamento utilizado, neste trabalho, é constituído por uma mesa que comporta uma laje com as dimensões máximas de 30,5×30,5×8 cm, por uma roda fixa, à qual é transmitida uma força através de um peso colocado na extremidade de um braço, ambos no interior de uma câmara, por um sistema de aquisição de deslocamentos ligado a um computador. A Figura 3.31 apresenta o equipamento *Wheel Tracking* da Universidade de Coimbra.



Figura 3.31 – Simulador de tráfego da Universidade de Coimbra

O rolamento da roda é produzido pelo movimento, para trás e para diante, da mesa com uma frequência média de 43 passagens por minuto. A roda tem a dimensão de 200 mm de diâmetro e 50 mm de largura, sendo revestida a borracha. A temperatura no interior da câmara pode atingir 75 °C. O peso a colocar no braço é variável e depende da pressão de contacto que se pretende obter entre a roda e a amostra. Os dados registados são a temperatura do ar no interior da câmara, a temperatura da superfície do provete, a deformação vertical no centro do provete e o número de aplicações de carga ao longo dum intervalo de tempo, definido pelo utilizador (Freitas, 2004).

Os critérios de interrupção de ensaio têm em consideração as limitações do equipamento e o tempo, que se reflecte em número de passagens. Assim, considera-se o ensaio terminado quando o curso do LVDT (*Linear Variable Transducer*) atinge o limite máximo de 1,5 cm ou o tempo de aplicação da carga atinge o máximo de 8 horas (20500 passagens) (Freitas, 2004).

### **Ensaio de Corte (cisalhamento)**

O ensaio de corte tem sido largamente utilizado no estudo da resistência às deformações permanentes de misturas betuminosas. O Programa SHRP estabeleceu um procedimento para avaliação das deformações permanentes através das deformações de corte plásticas que ocorrem nas misturas betuminosas. Este procedimento é o padronizado pela AASHTO TP7-01.

Sousa *et al.* (1994) referem que as deformações permanentes se devem essencialmente a dois factores: (i) densificação da mistura devido à aplicação repetida das cargas dos veículos pesados; (ii) acção das tensões de corte que ocorrem junto da superfície dos pavimentos, por baixo dos flancos dos pneus.

Da investigação conduzida por Sousa *et al.* (1994) pode-se concluir que a deformação permanente que ocorre nas camadas se deve essencialmente ao fenómeno de deformação plástica por corte sem variação de volume, causada por tensões de corte existentes junto ao limite da área de contacto entre os pneus dos veículos pesados e o pavimento. O fenómeno de deformação plástica por corte sem variação de volume é bem representado pelo ensaio de ensaio de corte a altura constante RSST-CH (*Repeated Simple Shear Test at Constant Height*).

No ensaio RSST-CH, os provetes são colados aos pratos do equipamento, de modo a evitar movimentos laterais e as conseqüentes variações de volume. A colagem dos provetes é realizada em uma prensa desenvolvida para este fim, de modo que os pratos estejam alinhados paralelamente, em que se aplica uma pressão de 35 kPa durante a colagem.

Os provetes cilíndricos possuem o diâmetro e a altura de acordo com o diâmetro máximo do agregado. Os provetes podem ser extraídos em forma de tarolos (carotes), tanto do pavimento quanto de lajes produzidas em laboratório. A norma recomenda que a razão entre o diâmetro e a altura do provete deve ser 1:3 ou mais. O Quadro 3.23 apresenta as dimensões dos provetes especificadas de acordo com a norma AASHTO TP7-01.

Quadro 3.23 – Dimensões dos provetes (AASHTO TP7-01)

Dimensão máxima do agregado (mm)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)
19,00	150	50
12,70; 9,50; 4,75	150	38

Nos pratos com os provetes são montados transdutores de deslocamentos (LVDT) na direcção horizontal, que permitem medir o seu deslocamento relativo e obter a deformação de corte das misturas. Aos pratos são ligados dois actuadores hidráulicos que impõem um estado de tensão uniforme.

Durante o ensaio, um actuador é mantido estático enquanto que o outro efectua movimentos horizontais pulsatórios. O actuador horizontal controla a magnitude das tensões de corte, enquanto que o actuador vertical garante que o provete, ensaiado sob uma condição de tensão controlada, mantenha a altura constante durante o ensaio. O conjunto, provete e pratos montados no equipamento, é mostrado na Figura 3.32.

O carregamento repetido imposto ao provete é caracterizado por um período de carga de 0,1 s e por um período de repouso de 0,6 s, em controlo de carga. Uma tensão de corte de 70 kPa é o valor recomendado a ser utilizado no ensaio de corte a altura constante, uma vez que para este nível de tensão as misturas betuminosas com boas propriedades apresentariam alguma deformação e as misturas pobres não atingiriam a rotura muito rapidamente (Sousa *et al.*, 1994).

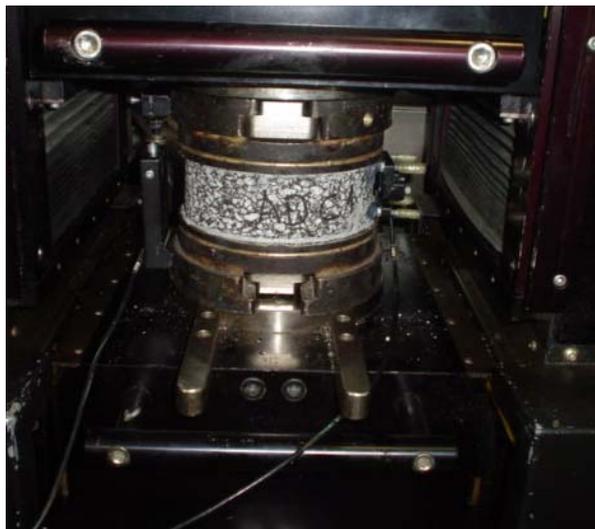


Figura 3.32 – Equipamento utilizado no ensaio de corte simples a altura constante da Universidade do Minho

De acordo com Sousa *et al.* (1994), para simular a situação mais gravosa para a ocorrência de deformações permanentes no pavimento, os ensaios devem ser realizados a uma temperatura igual à temperatura média verificada nos sete dias mais quentes do ano, medida a aproximadamente 2 cm de profundidade.

Os provetes são ensaiados a vários níveis de extensão. De acordo com a norma AASHTO TP7-01, o ensaio RSST-CH deve ser conduzido até o provete atingir a deformação de corte de 0,04545 que equivale a um valor limite para a rodeira de 12,7 mm.

A evolução da deformação de corte ( $\gamma_p$ ) com o número de ciclos de carga aplicados no ensaio RSST-CH é expressa pela Equação 3.44 (Sousa *et al.*, 1994):

$$\gamma_p = K_1 \times N^{K_2} \quad (3.44)$$

onde:

$\gamma_p$  = deformação de corte, medida no ensaio RSST-CH (mm);

$K_1, K_2$  = constantes experimentais;

$N$  = número de ciclos de carga aplicados ao provete no ensaio RSST-CH.

Considerando as deformações de corte medidas no ensaio RSST-CH, pode-se estimar a rodeira produzida. De acordo com Sousa *et al.* (1994), a relação entre a máxima deformação de corte produzida no provete e as rodeiras é expressada através da Equação 3.45:

$$\delta_{\text{rodeiras}} = 279,40 \times \gamma_p \quad (3.45)$$

onde:

$\delta_{\text{rodeiras}}$  = espessura das rodeiras (mm);

$\gamma_p$  = deformação de corte, medida no ensaio RSST-CH (mm).

O ensaio RSST-CH permite estabelecer uma lei de deformação permanente das misturas betuminosas em função da temperatura à qual a mistura estará submetida no pavimento. A relação entre o número máximo de ciclos do eixo padrão de 80 kN ( $ESAL_{\text{mrd}}$ ) em função do número de ciclos de carga aplicados no ensaio ( $N_{\text{mpss}}$ ), de modo que o provete atinja a deformação de corte limite de 0,4545, é representada pela Equação 3.46:

$$ESAL_{\text{mrd}} = 10^{\frac{4,36 + \log N_{\text{mpss}}}{1,24}} \quad (3.46)$$

onde:

$ESAL_{\text{mrd}}$  = número de ciclos do eixo padrão de 80 kN para atingir a máxima rodeira de 12,7 mm;

$N_{\text{mpss}}$  = número de ciclos do ensaio RSST-CH para atingir a deformação máxima de 0,4545.

Zhang *et al.* (2002) investigaram três tipos de ensaios de deformações permanentes: (i) APA; (ii) RSST-CH; (iii) ensaios de compressão simples com a aplicação de cargas repetidas (*Creep*) e concluíram o seguinte:

- existe uma boa correlação entre os três tipos de ensaios avaliados;
- a profundidade da rodeira correlaciona-se bem com a deformação inicial. Misturas com altas deformações apresentam elevadas profundidades de rodeiras;
- nos ensaios RSST-CH, as misturas com alta deformação inicial de corte apresentaram valores elevados de deformação permanente de corte;
- as misturas apresentaram comportamento semelhantes nos ensaios com o RSST-CH e com o APA.

## 3.8. RESISTÊNCIA À PROPAGAÇÃO DE FENDAS

### 3.8.1. Introdução

A utilização de betumes viscosos e de uma granulometria que propicie o forte contacto grão-a-grão entre os agregados melhoram a resistência à deformação permanente, mas podem também reduzir a flexibilidade das misturas betuminosas, reduzindo assim a resistência ao fendilhamento. As fendas aparecem em pavimentos flexíveis através de mecanismos de fadiga ou de propagação (Zhou & Scullion, 2004).

O fendilhamento da camada de desgaste (mistura betuminosa) deve-se ao dano acumulado produzido pela repetição do carregamento em ciclos de carga-descarga e que leva o material a rotura. A fenda é uma degradação na superfície do pavimento que tende a enfraquecer a camada de desgaste, permitindo também a entrada da água, provocando um enfraquecimento adicional da estrutura (redução do módulo de rigidez das camadas granulares e fundação).

A reabilitação de pavimentos rodoviários fendilhados através do reforço do pavimento com materiais betuminosos tem sido uma solução adoptada pelos organismos rodoviários. No entanto, esta prática tem demonstrado que nem sempre se atingem os objectivos esperados, verificando-se na maioria das vezes, que o reforço raramente atinge a vida prevista por causa do aparecimento prematuro de fendilhamento por propagação das fendas existentes no pavimento antigo (de Bondt, 1999; Minhoto, 2007).

As camadas de reforço de misturas betuminosas podem exibir padrões de juntas ou fendas, similares àquelas que existiam no pavimento antigo. A propagação de fendas do pavimento existente através da nova camada betuminosa é o fenómeno conhecido como propagação de fendas. Quando as fendas propagam-se através da camada betuminosa reabilitada, a infiltração de água pode causar uma rápida deterioração das camadas subjacentes e do solo de fundação (Zhou & Scullion, 2004).

O reforço de um pavimento é uma medida que não somente melhora a qualidade da superfície do pavimento reabilitado, mas também restaura a capacidade estrutural do pavimento; os níveis de tensão e de deformação nas camadas do pavimento são diminuídos. No entanto, se a

superfície antiga apresenta descontinuidades (fendas), o insucesso de reforço nestes locais surgirá em poucos anos (de Bondt, 1999).

A existência de camadas betuminosas fendilhadas, sobre as quais são colocadas as camadas de reforço do pavimento, provoca um funcionamento estrutural do pavimento diferente daquele verificado para o caso dos pavimentos novos. Os reforços de pavimentos continuam a estar sujeitos aos mecanismos de ruína dos pavimentos novos, fendilhamento por fadiga e deformações permanentes. No entanto, além destes mecanismos de ruína, verificam-se outros fenómenos estruturais, associados ao desempenho dos materiais existentes, que condicionam o comportamento do pavimento (Pais, 1999).

No dimensionamento de reforços de pavimentos deve-se ter em conta a ocorrência de pavimentos existentes com elevada densidade e severidade de fendilhamento. A existência de fendas activas não tratadas no pavimento existente terá como resultado a propagação destas para as camadas do reforço.

Embora o estudo em laboratório da propagação do fendilhamento de camadas betuminosas possa ser feito experimentalmente através de ensaios com cargas repetidas, a modelação do pavimento ainda necessita de estudos mais aprofundados. Os métodos actuais de dimensionamento de reforços de pavimentos, em geral, não dispõem de recursos de cálculo de forma a considerar o estado do pavimento existente em termos de fendilhamento e a consequente propagação deste fendilhamento no pavimento a ser reabilitado.

Mesmo com a utilização de metodologias mecanicistas, a não consideração do fenómeno propagação de fendas no dimensionamento de reforços de pavimentos é um dos factores que pode colocar em risco a fiabilidade do projecto.

### **3.8.2. Origem e mecanismos de propagação de fendas**

A propagação de fendas em camadas reabilitadas é iniciada por uma descontinuidade existente nas camadas subjacentes que se reflectem na superfície da camada de desgaste devido a movimentos da fenda. As descontinuidades são devidas ao seguinte (Trevino *et al.*, 2003):

- fendas ou juntas da camada subjacente;
- fendas com baixa temperatura na superfície da camada betuminosa antiga;
- fendas tipo bloco propagadas a partir da superfície da camada betuminosa antiga;
- fendas longitudinais da camada betuminosa antiga;
- fendas de fadiga da camada betuminosa antiga.

Ullidtz (1998) identificou o fendilhamento em três fases, sendo que na primeira ocorre a formação e difusão de micro-fendas; na segunda fase as micro-fendas se propagam para formar as macro-fendas e, finalmente na terceira fase o fendilhamento generalizado conduz à rotura do material. As três fases do fendilhamento por propagação podem ser assim descritas (Francken *et al.*, 1997):

- fase de iniciação – corresponde ao surgimento de uma fenda a partir de degradações pré-existentes no pavimento não fendilhado;
- fase de propagação lenta – corresponde à propagação da fenda na espessura da camada a partir do entalhe da fenda onde estão concentradas as tensões devidas às solicitações do tráfego e/ou solicitações térmicas;
- fase de rotura ou fase final – corresponde ao aparecimento da fenda à superfície do pavimento.

A ocorrência prematura de fendilhamento na superfície do pavimento reabilitado deve-se principalmente ao facto de qualquer fenda ou junta, existente no pavimento antigo, tender a evoluir ou a propagar-se através da camada de reforço (Figura 3.33).

De acordo com a Figura 3.33, as fendas iniciam-se e propagam-se em zonas de concentração de tensões, causadas pela existência de fendas no pavimento existente ou por defeitos de produção da camada de reabilitação (Vanelstraete & de Bondt, 1997).

Os bordos das fendas existentes nas camadas fendilhadas de pavimentos, sob o efeito das cargas do tráfego e das variações de temperatura, estão sujeitos a movimentos diferenciais. A propagação das fendas deve-se à progressão das fendas existentes nas camadas fendilhadas dos pavimentos, para as camadas de reforços. Os movimentos diferenciais entre os bordos das fendas produzem concentração de tensões na frente das fendas, responsáveis pela propagação das fendas (Pais, 1999).

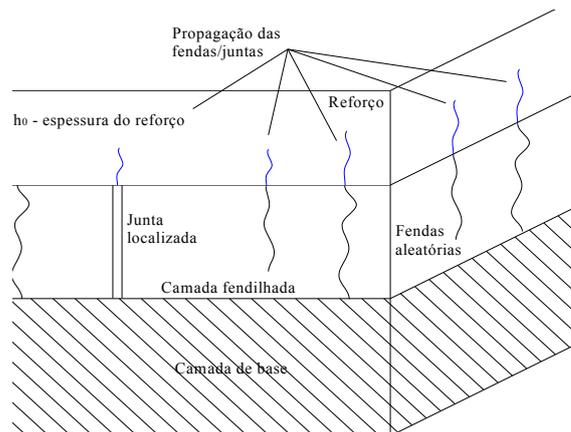


Figura 3.33 – Pavimento fendilhado reabilitado com uma mistura betuminosa (adaptado de Vanelstraete & de Bondt, 1997)

Para a compreensão do fenómeno da propagação das fendas é preciso identificar as solicitações susceptíveis de provocar os movimentos dos seus bordos, bem como proceder à quantificação desses movimentos.

Os tipos de solicitações susceptíveis de provocar movimentos nos bordos das fendas, produzindo abertura e fecho das fendas e, conseqüentemente, um potencial de propagação de fendas (Colombier, 1997; de Bondt, 1999) são os seguintes:

- acção do tráfego;
- acção das variações de temperatura;
- acção resultante dos movimentos de expansão/retracção das camadas cimentadas;
- acção resultante dos movimentos de expansão/retracção do solo de fundação.

A acção do tráfego, considerada a mais danosa para a propagação de fendas, é considerada um incremento de tensões, localizado imediatamente acima da fenda, como resultado da passagem de uma carga na sua vizinhança (Molenaar & Potter, 1997).

As variações de temperatura diárias e sazonais, sobretudo no inverno e no verão, provocam nas camadas de reforço, e nas subjacentes, movimentos de retracção e de expansão horizontais dos bordos das fendas, produzindo acções de abertura e fecho das fendas, ou seja, uma actividade horizontal das fendas. As variações de temperatura conduzem ainda à variação das propriedades mecânicas das misturas, principalmente da sua rigidez, reflectindo-se no estado de tensão na zona acima da fenda.

Os movimentos do solo de fundação estão muitas vezes associados às variações do seu estado hídrico, o qual provoca alterações volumétricas que conduzem à expansão e à retracção da fundação. Desta forma são induzidos indirectamente movimentos de abertura e fecho das fendas das camadas, os quais por sua vez, interferem nos estados de tensão nas zonas do reforço junto às fendas.

Os bordos das fendas estão sujeitos a movimentos cujas características (natureza, direcção, velocidade, amplitude e frequência) são função da natureza e da forma das fendas existentes, e do tipo de solicitações a que os bordos das fendas são submetidos. O principal factor responsável pelos movimentos dos bordos das fendas, para uma determinada solicitação, é a estrutura do pavimento onde a fenda se encontra, definida pela rigidez dos materiais e espessura das camadas.

Os movimentos dos bordos de uma fenda podem ser decompostos nos três movimentos elementares segundo o esquema clássico de Irwin (1957), apresentados na Figura 3.34, definidos pelos seguintes modos de abertura de fendas:

- modo 1 que corresponde a uma abertura/fecho da fenda;
- modo 2 que corresponde a uma deformação por corte normal à fenda;
- modo 3 que corresponde a uma deformação por corte paralelo à fenda.

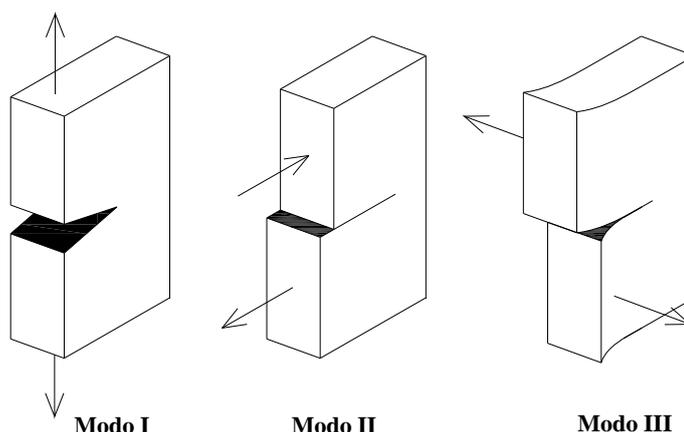


Figura 3.34 – Deslocamentos sofridos pelos bordos de uma fenda

O modo I consiste num movimento resultante de uma acção de abertura de fenda perpendicular ao seu plano (Molenaar, 2003). Em geral, o modo I é associado à ocorrência de tensões de tracção como resultado, por exemplo, de fenómenos de retracção térmica devido a

variações de temperatura ( $\Delta T$ ) (como mostra a Figura 3.35 a) ou ainda devido à retracção do solo de fundação resultante da secagem do mesmo. O modo I também pode ser associado ao fenómeno de flexão devido à passagem de um rodado na zona precisamente acima do topo de uma fenda já existente, provocando tensões de tracção na base da camada de reforço (como apresentado na Figura 3.35 b).

O modo II de abertura de fenda corresponde à ocorrência de fendilhamento resultante de um movimento de corte puro, sendo associado a tensões de corte que se desenvolvem na camada de reforço quando um rodado atravessa uma fenda transversal (mostrado na Figura 3.35 b) ou ainda quando a carga de um rodado é aplicada em um dos lados da fenda (representado na Figura 3.36).

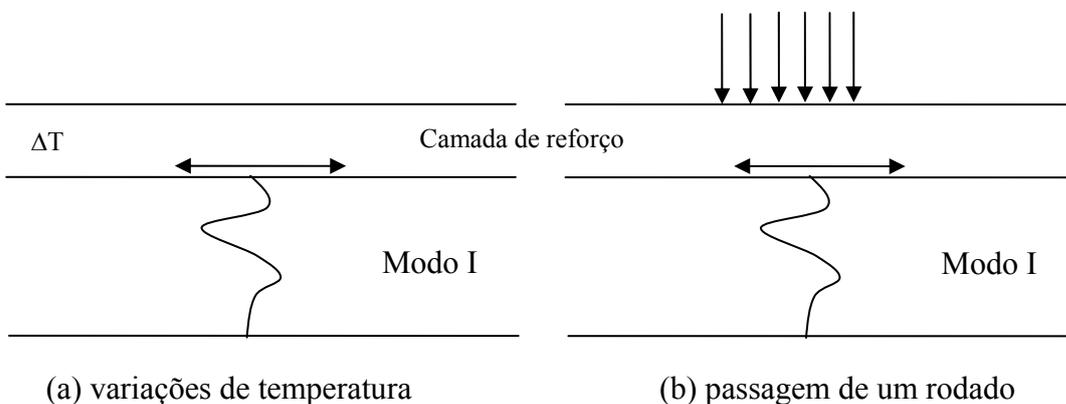


Figura 3.35 – Fendilhamento em modo I (adaptado de Molenaar, 2003)

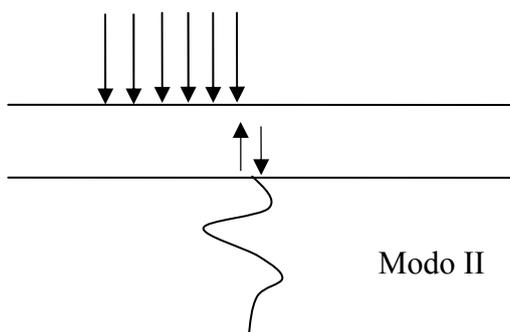


Figura 3.36 – Fendilhamento em modo II (adaptado de Molenaar, 2003)

O modo III é resultante do movimento de corte paralelo à fenda (acto de rasgar) sendo associado ao crescimento de uma fenda longitudinal. Este modo de fendilhamento ocorre

quando uma carga é aplicada junto à frente de fenda, desenvolvendo-se, assim, forças de corte na frente da fenda, provocando um efeito de “rasgar” (conforme apresentado na Figura 3.37).

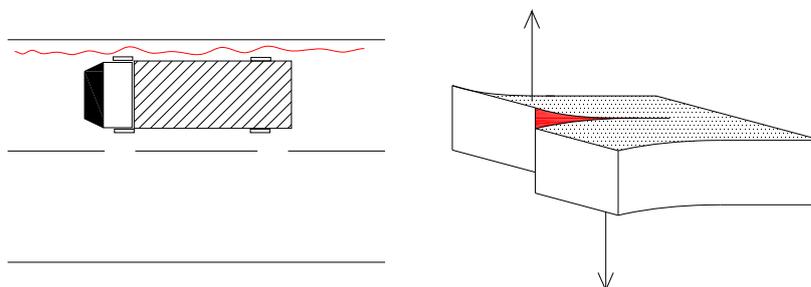


Figura 3.37 – Fendilhamento em modo III (adaptado de Minhoto, 2007)

Normalmente, o modo I e o modo II estão associados à propagação da fenda em profundidade (para cima ou para baixo), ao longo da espessura da camada betuminosa onde ocorre a propagação do fendilhamento. Por outro lado, o modo III é normalmente associado à propagação horizontal duma fenda, contribuindo principalmente para o aumento da área fendilhada do pavimento.

Os movimentos dos bordos das fendas apresentam durações diferentes consoante os tipos de solicitações que as provocam, podendo variar desde muito lentos a muito rápidos. Às solicitações com ocorrência muito rápida, como a do tráfego, correspondem movimentos de fendas igualmente muito rápidos, uma vez que perante este tipo de solicitação as misturas betuminosas exibem um comportamento mecânico quase elástico e, como tal, com resposta quase instantânea.

Na presença de solicitações de duração lenta, como as resultantes da retracção térmica provocada pelas variações de temperatura diárias, o movimento das fendas associado também é lento. A duração dos movimentos é classificada nas três seguintes categorias (Colombier, 1997):

- movimentos rápidos – induzidos pelo tráfego, mais particularmente pelos eixos dos veículos pesados, cuja duração depende da velocidade de circulação;
- movimentos lentos – induzidos, por exemplo, pelas variações diárias das temperaturas, cuja duração é definida pelos ciclos de temperatura, variando entre o dia e a noite. Estes movimentos são normalmente provocados pelo efeito da retracção térmica;

- movimentos muito lentos – induzidos pelas variações sazonais de temperatura, principalmente entre a estação de inverno e de verão ou ainda entre uma estação seca e uma estação húmida.

No caso das solicitações lentas a resposta nem sempre é linear relativamente à solicitação, uma vez que perante este tipo de solicitações as misturas betuminosas tendem a exibir um comportamento viscoelástico, com provável ocorrência de fluência ou relaxação. Quanto mais lenta for a solicitação, maior será o peso da componente viscosa no comportamento mecânico das misturas, uma vez que aquele depende do tempo de carregamento.

A amplitude dos movimentos dos bordos das fendas é função da intensidade da actuação das solicitações a que está sujeito o reforço, e depende dos seguintes factores (Colombier, 1997):

- intensidade da solicitação que provoca o movimento;
- características mecânicas das camadas do pavimento;
- características geométricas do pavimento e das fendas;
- capacidade de transferência de carga entre as faces da fenda, resultante do efeito de “aperto”, ou “inter-penetração”, entre os agregados de ambas as faces da fenda.

No caso da acção do tráfego, a amplitude dos movimentos das fendas depende da amplitude das deformações da estrutura do pavimento resultantes da passagem do tráfego, que por sua vez depende da intensidade das cargas dos eixos dos veículos. Assim, a deformação estrutural na vizinhança da fenda é muito dependente da capacidade resistente do pavimento e da capacidade, total ou parcial, de transferência de carga entre as faces da fenda.

Para a acção das variações de temperatura, às quais se associa o fenómeno da retracção térmica, a amplitude de abertura de fendas é função directa não só das variações de temperatura no interior do pavimento mas também da propriedades das camadas betuminosas do pavimento. A intensidade desta solicitação depende da amplitude das variações diárias de temperatura a que o reforço se encontra sujeito, dos valores absolutos das temperaturas, da taxa de variação das temperaturas, do coeficiente de retracção térmica das misturas, das propriedades termo-mecânicas (viscoelásticas) dos materiais betuminosos, do espaçamento entre fendas e do tipo de colagem entre o reforço e a camada subjacente.

Atendendo à duração dos movimentos dos bordos das fendas pode concluir-se que os movimentos resultantes do tráfego apresentam frequências e velocidade muito altas, podendo apresentar valores de centenas a milhares de vezes por dia. No caso dos movimentos causados pelas variações diárias das temperaturas, entre o dia e a noite, constata-se que apresentam frequências baixas, correspondentes a duas vezes por dia. No caso das variações de temperatura sazonais a sua frequência é muito baixa podendo verificar-se a sua ocorrência algumas vezes por ano (Colombier, 1997).

### **3.8.3. Medidas retardadoras do fendilhamento**

O desenvolvimento de técnicas que retardam a propagação de fendas tem sido aperfeiçoado para a redução da velocidade da sua evolução. Quando a origem do fendilhamento é conhecida podem ser aplicadas técnicas para reduzir a propagação ou limitar a actividade existente, procurando retardar a sua propagação.

As alternativas para reduzir a propagação das fendas até a camada de desgaste do reforço do pavimento podem ser: (i) aumento da espessura da camada betuminosa de reforço; (ii) utilização de misturas betuminosas de reforço com maior resistência à propagação de fendas; (iii) interposição de uma camada de interface entre o pavimento fendilhado e as camadas de reforço, (iv) descolagem entre o pavimento existente e as camadas de reforço (Pais *et al.*, 2002).

O aumento da espessura é a forma mais simples de controlar a propagação de fendas. O tempo que a fenda leva para aparecer na superfície aumenta com a espessura da camada de desgaste devido à tensão ser mais baixa e o caminho total a ser percorrido pela fenda ser maior. Porém trata-se de uma alternativa de reabilitação não eficaz, em termos económicos, principalmente quando o potencial para ocorrência de reflexão de fendas for elevado, situação em que haverá necessidade de utilizar uma elevada espessura adicional. No entanto, o aumento da espessura de reforço da camada betuminosa na reabilitação de pavimentos para minimizar a propagação do fendilhamento tem sido, antes de tudo, baseada em relações empíricas a partir das experiências locais (Finn & Monismith, 1984).

O *California Department of Transportation* (Caltrans) considera que o fenómeno da propagação das fendas é relevante, embora não considerado ainda nos métodos de dimensionamento de reforços de pavimentos pela ausência de processos de critérios de decisão para este factor. Mediante a falta de domínio e controlo do dimensionamento governado pela propagação de fendas o Caltrans (2003) recomenda o aumento da espessura da camada de reforço através da consideração dos seguintes factores:

- tipo, tamanho e gravidade de degradações;
- extensão e localização das degradações;
- pavimento existente e sua idade;
- espessura e desempenho da reabilitação anterior;
- factores climáticos;
- índice de tráfego.

#### **SAMI – *Stress Absorving Membrane Interlayer***

A camada de modificação de estado de tensão do tipo SAMI consiste em uma mistura betuminosa com betume modificado, por borracha como exemplo, que é aplicada entre camadas betuminosas (existente e de reforço) quando da execução de uma reabilitação, para retardar o desenvolvimento de fendas por propagação e diminuir a penetração de água em camadas subjacentes (Hicks *et al.*, 1995).

#### **SAM – *Stress Absorving Membrane***

A camada do tipo SAM pode ser comparada a um tratamento superficial com espessura média de 1,5 cm. Estas camadas consistem em uma camada de betume-borracha (com cerca de 20% de borracha) sobre a superfície do pavimento existente, seguida de uma camada de agregados uniformes, espalhados sobre o ligante (Hicks *et al.*, 1995).

Estas camadas são concebidas para reduzir a velocidade de propagação de fendas em pavimentos flexíveis, contudo são ineficientes quando o pavimento apresenta um grau de fendilhamento com alta severidade e a sua eficiência pode ser comparada a de um geotextil (DNIT, 2006<sub>B</sub>).

## **Geotexteis**

Os geotexteis são mantas sintéticas que podem ser tecidas ou não tecidas e são fabricadas com materiais, por exemplo, polipropileno; poliéster; fibra de vidro; nylon e suas combinações (geogrelhas). Estas mantas são aplicadas, geralmente, sobre o pavimento fendilhado antes da colocação da camada de reforço. O fenómeno de retardamento da propagação de fendas está ligado à estrutura geotextil-betume, que forma uma descontinuidade viscoelástica, entre as duas camadas.

A presença desta descontinuidade viscoelástica promove a separação entre a camada fendilhada e a camada reabilitada, permitindo o livre movimento dos bordos da fenda ou seu redireccionamento no sentido horizontal, o que retardaria a propagação da fenda.

## **Camadas granulares**

As camadas de interrupção de fendilhamento em geral são compostas por materiais granulares que devido ao elevado volume de vazios, geram uma descontinuidade estrutural, não favorecendo a propagação da fenda.

O tipo de camadas mais utilizadas é formado por materiais granulares convencionais, sem finos e com agregados grossos de mesmo tamanho as quais, geralmente mas não necessariamente, recebem adição de mistura betuminosa de granulometria aberta (fria ou quente).

No entanto, se a camada não for bem concebida poderá ocasionar degradações como por exemplo deformações localizadas (afundamentos) e ainda, torna-se necessária a elevação da espessura da berma (acostamento).

## **Camadas com betumes modificados**

As medidas retardadoras da propagação de fendas tendem a melhorar o desempenho global do pavimento através de uma combinação de efeitos tais como o retardamento da propagação do fendilhamento, atenuação da severidade destas fendas e manutenção da impermeabilidade da superfície da camada de desgaste, protegendo as camadas subjacentes da acção das águas

pluviais e, dessa forma, mantendo a resistência da estrutura às deformações plásticas sob cargas repetidas e evitando o bombeamento de finos da camada de base através das fendas (Montestruque, 2002).

Uma medida de retardamento do fendilhamento, que seja eficiente, não consiste simplesmente na interposição de uma camada entre o pavimento fendilhado e o pavimento reabilitado. O sucesso de soluções inovadoras de uma reabilitação depende da escolha correcta de todos os componentes, de sua combinação e de sua implantação em função das condições de carregamento que serão traduzidos em uma vida futura de projecto (Francken, 1993).

A optimização ou modificação de uma mistura betuminosa tem um propósito de aumentar a resistência da camada betuminosa de recapeamento ao fendilhamento. Isso pode ser conseguido com a inclusão de fibras dentro da mistura betuminosa ou pela adição de polímeros no ligante betuminoso, como por exemplo a borracha de pneus.

A execução de uma camada de modificação do estado de tensão actua como uma suave membrana, dissipando as tensões desenvolvidas pela actividade das fendas e é colocada directamente sobre o pavimento fendilhado. Estas soluções geralmente incluem o uso de betumes modificados com polímeros, que actuam como agente responsável pelo decréscimo da tensão na camada (DNIT, 2006<sub>B</sub>).

#### **3.8.4. Consideração do fendilhamento na reabilitação de pavimentos**

Para a consideração da propagação de fendas na reabilitação de um pavimento, a cada uma das fases de iniciação e desenvolvimento de uma fenda no interior da estrutura de um pavimento podem ser aplicadas leis de comportamento, conforme o tipo de estrutura e as condições de carregamento aplicadas. Para a descrição da propagação das fendas em reforços de pavimentos constituídos por materiais betuminosos, a lei de fadiga e a lei de propagação de fendas são as que melhor se adequam (Francken *et al.*, 1997).

Normalmente para a avaliação da fase de iniciação de uma fenda no reforço, o tempo de vida previsto do reforço é determinado por cálculo da extensão de tracção na base da camada de reforço e, subsequentemente, fazendo uso de uma lei de fadiga. A lei que permite realizar uma

estimativa do número de eixos, “N”, necessários para iniciar uma fenda, como resultado da aplicação repetitiva das cargas do tráfego, pode ser dada através da Equação 3.47 (Francken *et al.*, 1997):

$$N = \left( \frac{C}{\varepsilon} \right)^m \quad (3.47)$$

onde:

C, m = parâmetros determinados experimentalmente através de ensaios de flexão repetitivos;

$\varepsilon$  = nível de extensão aplicado.

Para a fase de propagação do fendilhamento através do reforço é realizada uma abordagem teórica, tradicional, que se baseia na utilização de conceitos da mecânica da fractura. É geralmente aceite que a progressão de uma fenda pode ser representada através do uso da expressão de Paris & Erdogan (1963), como apresenta a Equação 3.48:

$$\frac{dC}{dN} = A \times K^n \quad (3.48)$$

onde:

c = comprimento da fenda;

dC/dN = crescimento do comprimento da fenda (c) por ciclo de carga (N);

k = factor de intensidade de tensão, que representa as condições de tensão na frente da fenda;

A, n = constantes de regressão.

Para condições normais de carregamento do tráfego, os valores de “n” variam numa gama compreendida entre 4,0 e 5,5 (Molenaar & Potter, 1997). Para condições de fendilhamento por indução térmica, os valores de “n” variam numa gama compreendida entre 2 e 3. O parâmetro “A” pode ser determinado através da Equação 3.49 (Jacobs, 1995):

$$\text{Log}A = -2,36 - 1,14 \times n \quad (3.49)$$

Para se limitar a propagação de uma fenda os valores de “K”, “A” e “n” devem apresentar valores que sejam o mais baixo possível. O factor de intensidade de tensão, “K”, que comanda a progressão da fenda, não depende apenas da intensidade da solicitação, mas também do

comprimento da fenda, da transferência de carga entre faces da fenda e das características de rigidez do pavimento existente e da camada de reforço.

A influência destas características do pavimento no valor de “K” pode ser definida como “potencial de fendilhamento do pavimento”. Normalmente, para se avaliar o valor de “K” recorre-se à utilização da metodologia dos elementos finitos. O valor do factor de intensidade de tensão associado à acção do tráfego pode ser expresso pela Equação 3.50 (generalizada) seguinte:

$$K_{TR} = k_{tr} \times f(q, l, d, E_s, E_i, E) \quad (3.50)$$

onde:

$k_{tr}$  = factor de intensidade de tensão, adimensional, dependente da razão  $c/h$ , da capacidade de transferência de carga na fenda e do tipo de esforços que são gerados: flexão ou corte;

$c$  = comprimento da fenda no reforço;

$q$  = valor da carga representativa da acção do tráfego;

$l$  = definição geométrica da carga;

$h$  = espessura do reforço;

$E_s$  = módulo de rigidez da fundação;

$E_i$  = módulo de rigidez das camadas do pavimento existente;

$E$  = módulo de rigidez da camada de reforço do pavimento.

Conforme já anteriormente exposto, um reforço colocado sobre um pavimento fendilhado fica submetido à propagação de fendas devido à existência de um potencial de fendilhamento. Este potencial de fendilhamento é caracterizado através da avaliação da actividade de fendas resultante da acção das cargas do tráfego e da acção das variações de temperatura. A actividade de fendas (vertical e horizontal) é definida como a amplitude dos movimentos verticais e horizontais induzidos nos dois bordos de uma fenda, provocados pela acção do tráfego e das variações de temperatura e constitui o principal mecanismo de indução do estado de tensão no reforço de pavimento que conduz à propagação de fendas.

Uma das maiores insuficiências nas abordagens actuais à escolha de alternativas de reabilitação de pavimentos é a falta de representação realística das condições em serviço, tais

como o tamanho, a intensidade e a configuração das fendas existentes. A consideração das condições de serviço é importante para uma avaliação do dano acumulado, essencial para uma previsão realista do desempenho das estratégias de reabilitação (Martín-Pérez & Mohamed, 2000).

Nos anos mais recentes, o uso da metodologia dos elementos finitos para análise estrutural, com vista à concepção de pavimentos e reforços, tem sido uma alternativa popular por parte dos engenheiros e investigadores. O sucesso desta metodologia está fortemente relacionado com a grande capacidade de processamento e de memória que os computadores passaram a ter nos últimos anos, no sentido de resolverem sistemas de muitas equações e com muitas incógnitas, num período mínimo de tempo. A análise por elementos finitos tem sido usada para modelação quer do início quer da progressão de uma fenda (Minhoto, 2007).

Para o estudo da fase de iniciação da fenda em um reforço, o tempo de vida, deste reforço, é determinado calculando-se a extensão de tracção na base da camada de reforço e, posteriormente, fazendo-se uso de uma lei de fadiga. Para o estudo da fase de propagação da fenda através do reforço, a análise por elementos finitos é realizada utilizando-se os princípios da mecânica da fractura.

O conhecimento da actividade das fendas, resultante das cargas do tráfego, pode constituir a base para o desenvolvimento de modelos representativos do comportamento dos pavimentos fendilhados, tal como se pode constatar na metodologia proposta por Sousa *et al.* (2002).

Os procedimentos conducentes à aplicação do método consistem nos seguintes procedimentos:

- determinação dos módulos de rigidez e das espessuras das camadas do pavimento existente;
- determinação da temperatura representativa do ar;
- determinação da percentagem de fendilhamento;
- determinação de factores de correcção;
- selecção do material do reforço e suas propriedades mecânicas;
- determinação do valor de projecto da extensão de Von Mises,  $\epsilon_{VM}$ ;
- determinação da estimativa de vida útil do reforço de pavimento.

O modelo empírico-mecanicista de concepção de reforços de pavimentos proposto por Sousa *et al.* (2002), considerando a propagação de fendas, apresenta uma validade de aplicação restrita a dois tipos de misturas estudados e restringe-se a condições climáticas similares às observadas na região da Califórnia (Estados Unidos).

O modelo foi desenvolvido com a utilização de elementos finitos para a representação do fenómeno da propagação de fendas e do seu efeito no reforço imediatamente acima da fenda. O modelo proposto foi calibrado com medições efectuadas *in situ*, em pavimentos fendilhados, através de medidores de actividade de fendas e de deflectómetro de impacto, observações ocorridas em Portugal e nos Estados Unidos (Estados do Arizona e da Califórnia).

A influência das propriedades do pavimento no estado de tensão e de extensão no reforço foi estabelecida através da definição de uma extensão deviatória, do tipo tensão de Von Mises (Rees, 2000), e designada por “Extensão de Von Mises”, de acordo com a Equação 3.51:

$$\varepsilon_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2}((\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2)} \quad (3.51)$$

onde:

$\varepsilon_{VM}$  = extensão de Von Mises;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  = extensões principais.

Através da aplicação de um modelo com base na metodologia dos elementos finitos foi desenvolvido um modelo estatístico para a determinação da extensão de Von Mises média nos elementos do reforço localizados acima da fenda, como mostram as Equações de 3.52 a 3.54:

$$\varepsilon_{VM} (1 \times 10^{-6}) = a * [\text{espessura reforço(m)}]^b \quad (3.52)$$

$$a = \prod_{i=1}^6 [a_{1i} * \ln(X_i) + a_{2i}] \quad (3.53)$$

$$b = \prod_{i=1}^6 [b_{1i} * \ln(X_i) + b_{2i}] \quad (3.54)$$

onde a variável  $X_i$  representa as propriedades das camadas do pavimento (Quadro 3.24) e,  $a_{ij}$  e  $b_{ij}$  representam coeficientes estatísticos (Quadro 3.25).

Quadro 3.24 – Variáveis associadas às propriedades dos pavimentos

i	$X_i$
1	Espessura da camada fendilhada (m)
2	Espessura da camada granular (m)
3	Módulo de rigidez da camada de reforço (MPa)
4	Módulo de rigidez da camada fendilhada (MPa)
5	Módulo de rigidez da camada granular (MPa)
6	Módulo de rigidez da fundação (MPa)

Quadro 3.25 – Coeficientes estatísticos associados ao modelo de  $\varepsilon_{VM}$

i	$a_{1i}$	$a_{2i}$	$b_{1i}$	$b_{2i}$
1	-1,038E-04	-1,446E-01	7,169E-03	1,314E-01
2	2,777E-01	-4,022E+00	9,773E-05	-6,368E-01
3	-1,173E+00	1,212E+01	-4,946E-01	7,069E+00
4	1,281E+00	5,070E-01	3,923E-02	2,641E+00
5	-5,160E-01	6,964E+00	3,265E-02	-1,287E+00
6	-1,775E-01	2,385E+00	1,875E-03	-8,167E-01

Em termos de caracterização das propriedades das misturas betuminosas foram realizados ensaios de fadiga à flexão em controlo de deslocamento (extensão controlada) e a vida à fadiga é expressa em função da extensão de tracção. Para condições de ensaio à fadiga à flexão em quatro pontos esta extensão pode ser relacionada com a extensão de Von Mises,  $\varepsilon_{VM}$ , através da Equação 3.55:

$$\varepsilon_{VM} = \varepsilon_t (1 + \nu) \quad (3.55)$$

onde:

$\nu$  = coeficiente de Poisson;

$\varepsilon_t$  = extensão de tracção.

Finalmente é feita a determinação do número acumulado de eixos padrão (NAEP) que pode ser aplicado ao reforço antes de ocorrer a propagação de fendas, usando as expressões obtidas em ensaios de fadiga, ou leis de fadiga, estabelecidas em função da extensão de Von Mises.

Sousa *et al.* (2002) determinaram o NAEP (ESAL) para misturas com betume-borracha e misturas convencionais.

Para misturas granulometria descontínua com betume-borracha, o número acumulado de eixos padrão, NAEP, é obtido através da Equação 3.56:

$$\text{NAEP} = 4,1245 \times 10^{19} \times \left[ \varepsilon_{\text{VM}} (1 \times 10^{-6}) \right]^{4,9761} \quad (3.56)$$

Para misturas convencionais com granulometria densa, se obtém o número acumulado de eixos padrão através da Equação 3.57:

$$\text{NAEP} = 6,4467 \times 10^{19} \times \left[ \varepsilon_{\text{VM}} (1 \times 10^{-6}) \right]^{5,93} \quad (3.57)$$

O método proposto por Sousa *et al.* (2002) pode ser aplicado a qualquer tipo de mistura desde que sejam previamente determinadas, em ensaios de fadiga, as propriedades do material e as correspondentes curvas de fadiga.

A iniciação e a propagação de fendas em camadas reabilitadas de pavimento são o resultado da actuação de determinados mecanismos de degradação. A forma de actuação destes mecanismos depende de diversos factores associados aos pavimentos, dos quais se destacam: (i) acção do carregamento do tráfego e das variações de temperatura; (ii) geometria das camadas; (iii) propriedades dos materiais constituintes das camadas (iv) características da fundação; (v) características das fendas; (vi) ligação entre camadas. Tendo em conta estes factores, Minhoto (2007) desenvolveu um procedimento para consideração da propagação de fendas no dimensionamento de pavimentos flexíveis, com base em elementos finitos, considerando o abaixo descrito.

A análise numérica de uma estrutura por elementos finitos, seja de carácter mecânico, térmico, acústico ou outros, pode se processar de duas forma distintas, conforme a caracterização, em função do tempo, das propriedades dos materiais e de condições de carregamento, através de uma análise estática (*steady state*) ou através duma análise transiente.

Considera-se que uma análise numérica é do tipo estática (*steady state*), ou em estado estacionário, quando a determinação da distribuição de tensões e de extensões em todo o domínio se processa em condições estáticas, ou seja, sem variação no tempo das propriedades dos materiais e sem variação no tempo das solicitações aplicadas. A condição de carregamento em estado estacionário é aplicável a situações em que a acumulação dos efeitos das cargas com o tempo é desprezável (Minhoto, 2007).

Neste tipo de análises a obtenção dos estados de tensão e de extensão no domínio mecânico é obtido como resultado de um único processamento. Como exemplo deste tipo de análise apontam-se os casos de processamento em que se consideram materiais com comportamento elástico linear e sujeitos à aplicação de uma carga, instantânea, de um rodado duplo.

Considera-se que uma análise numérica é do tipo transiente quando a determinação da distribuição de tensões e de extensões em todo o domínio do pavimento se processa em condições variáveis no tempo, ou seja, em que se considera a ocorrência de variação no tempo das propriedades dos materiais e/ou a variação no tempo das condições de carregamento da estrutura. A condição de carregamento em estado transiente é uma situação em que é considerada a acumulação dos efeitos das cargas com o tempo.

Minhoto (2007) aplicou o software de elementos finitos ANSYS 10.0 (Multiphysics) porque este suporta ambos tipos de análise. Assim, é corrente se utilizar as temperaturas obtidas de análises térmicas transientes como dados de entrada em análises estruturais do tipo estacionário, para a realização de avaliações de estados de tensão de origem térmica.

Uma análise transiente (seja térmica ou mecânica) segue os mesmos procedimentos que uma análise em estado estacionário. A principal diferença consiste no facto da maioria das cargas em estado estacionário serem estabelecidas em função do tempo. A especificação do carregamento transiente pode ser estabelecido de duas formas: (i) através do uso de ferramentas numéricas que estabelecem equações ou funções, descrevem curvas de carregamento que são aplicadas como condições fronteira; (ii) dividindo o carregamento pelo tempo através da definições de passos de carregamento (*load steps*).

A metodologia utilizada na solução de análises transientes depende dos graus de liberdade envolvidos na análise. Os sistemas de segunda ordem, no tempo, como podem ser os

problemas estruturais transientes, são resolvidos através da metodologia de integração no tempo de Newmark, que é usado para análises transientes com procedimentos considerados implícitos do código de elementos finitos.

Na metodologia desenvolvida por Minhoto (2007), a simulação do comportamento do reforço de pavimento se baseou na avaliação dos estados de tensão e de extensão associados à ocorrência das solicitações (tráfego e temperatura), a partir dos quais foi avaliada a resistência do reforço de pavimento, através da obtenção da vida previsível à propagação de fendas, para as diversas condições de carregamento.

A realização da simulação numérica desenvolvida por Minhoto (2007) baseia-se no princípio de funcionamento do pavimento, esquematizado na Figura 3.38, no qual se admite o seguinte:

- considerando um determinado intervalo de tempo (mais ou menos curto), a ocorrência de variações de temperatura ao longo do mesmo induz no reforço de pavimento (concretamente na zona acima da fenda) um contínuo e variável estado de tensão de longa duração, ao qual se vão sobrepondo, ciclicamente, repetidos estados de tensão, de muito curta duração, representativos da passagem do rodado duplo de um determinado eixo;
- em cada instante de passagem de um rodado o estado de tensão existente, de origem térmica, é incrementado, por adição, de um estado de tensão provocado pela passagem de um rodado;
- considera-se que esta adição de tensões se baseia numa sobreposição dos efeitos dos mecanismos envolvidos na aplicação destas duas acções.

A avaliação mecânica do efeito de cada solicitação foi realizada isoladamente, considerando apenas a acção do tráfego e posteriormente considerando apenas a acção das variações de temperatura. Numa perspectiva de avaliação dum situação possivelmente mais desfavorável que estas, interessa igualmente proceder a uma avaliação mecânica da ocorrência simultânea destas duas acções. Assim, procedeu-se à simulação de cada uma destas três possíveis situações de carregamento, para as condições de carregamento de estado de tensão máximo, correspondentes aos instantes referenciados com um círculo na Figura 3.39 como pontos de avaliação.

O comportamento do pavimento reabilitado, devido à propagação de fendas, foi avaliado considerando duas misturas que constituem a camada de reforço (convencional e com

betume-borracha). Para ambas situações foi adoptado um procedimento de análise numérica (MEF) devido à actuação conjugada das acções do tráfego e de variações de temperatura que resultou na geração de modelos para as quatro fases seguintes:

- determinação do estado de tensão/extensão resultante da acção do tráfego;
- determinação do estado de tensão/extensão devido à acção das variações de temperatura;
- determinação do estado de tensão/extensão resultante da combinação das duas acções;
- determinação da vida previsível do reforço de pavimento devido à propagação de fendas.

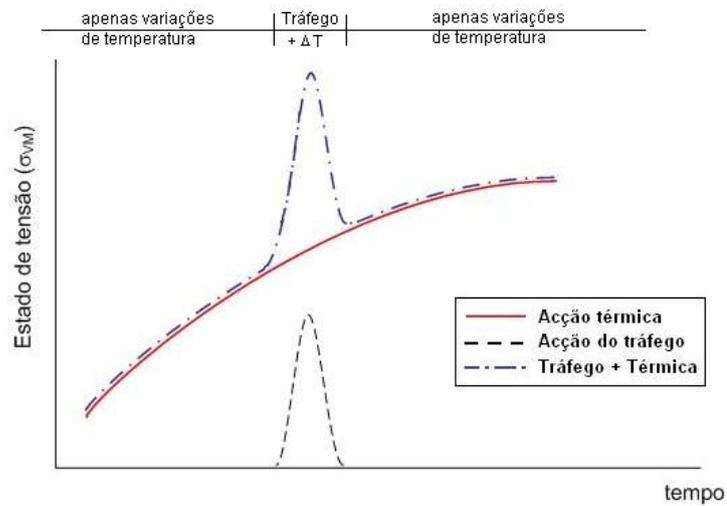


Figura 3.38 – Consideração da evolução do estado de tensão no reforço submetido às acções de temperatura e de tráfego (Minhoto, 2007)

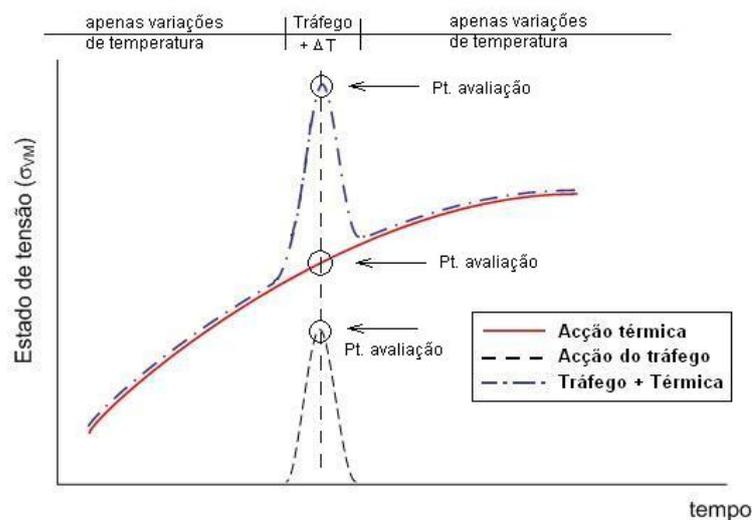


Figura 3.39 – Consideração da evolução do estado de tensão no reforço sujeito às acções em estudo (Minhoto, 2007)

Os procedimentos envolvidos nas três primeiras fases do estudo, conduziram à obtenção de estados de tensão, e de extensão, para os nós (MEF) localizados numa zona crítica do pavimento reabilitado localizada imediatamente acima da frente de uma fenda, pertencente a um pavimento degradado.

Inicialmente, foi gerado o modelo MDTP (Modelo de Distribuição de Temperatura no Pavimento), de base térmica, com o objectivo da produção de um ficheiro de temperaturas horárias para todos os nós, correspondentes a um período de 24 horas, a partir do conhecimento das temperaturas observadas *in situ*. Deste modelo foram extraídos os valores horários das temperaturas que são atribuídas a cada nó do modelo mecânico, com o objectivo de estabelecer as características mecânicas (módulo de deformabilidade) adequadas à temperatura observada.

Na primeira fase da simulação foi realizada a avaliação do estado de tensão/extensão resultante da consideração da acção do tráfego, através do modelo MMTRF (Modelo Mecânico de Elementos Finitos de Simulação do Efeito do Tráfego), na qual determinou-se as componentes de tensão/extensão para esta situação. A primeira fase envolveu ainda a avaliação dos estados de tensão nos nós do reforço para as situações de carregamento do rodado duplo de 130 kN.

O ficheiro MDTP foi utilizado no funcionamento do modelo de avaliação térmica da segunda fase denominado MMTER (Modelo Mecânico de Elementos Finitos de Simulação do Efeito da Variação de Temperatura), na qual se procede à avaliação do estado de tensão/extensão resultante da consideração apenas da acção das variações de temperatura.

Na terceira fase foi realizada a combinação baseada no princípio da sobreposição dos efeitos. A partir das componentes de tensão/extensão resultantes da combinação são determinadas as componentes principais de tensão e de extensão, seguindo-se a obtenção do valor da vida previsível do reforço com base no conhecimento dos estados de tensão e de extensão.

A avaliação da vida previsível do reforço foi realizada com base em leis de fadiga obtidas em laboratório através de ensaios de fadiga à flexão em 4 pontos. Estas leis são relacionadas com a extensão média de Von Mises na zona do reforço, obtida através da simulação numérica, para a obtenção da vida previsível à propagação de fendas. A vida previsível à propagação de

fendas é relacionada com o tráfego observado na secção de pavimento para a realização de uma estimativa do dano acumulado ao longo do período em análise adoptado no estudo.

Através da simulação numérica, Minhoto (2007) constatou que a variação horária do estado térmico do reforço, e de todo o pavimento, apresentou uma influência significativa na variação do seu estado de tensão na zona do reforço imediatamente acima da fenda. À medida que a temperatura média no reforço abaixa, o estado de tensão horário para qualquer um dos casos de carregamento aumentou, como resultado da retracção térmica e da variação das propriedades mecânicas das misturas betuminosas (seja convencional ou com betume-borracha).

O efeito das variações do estado térmico do pavimento reflectiram-se mais acentuadamente na situação de carregamento exclusivo das variações de temperatura do que na situação de carregamento exclusivo do tráfego.

Minhoto (2007) verificou que, em termos de estado de tensão, a situação em que o reforço do pavimento era constituído por mistura betuminosa com betume-borracha, conduziu, para qualquer situação de carregamento, a estados de tensão inferiores aos estados de tensão instalados no reforço constituído com mistura betuminosa convencional.

Outra constatação efectuada foi relativa à acção exclusiva do tráfego que conduziu a estados de tensão mais desfavoráveis para condições em meses de clima quentes do que nos meses de clima frio. Para qualquer tipo de eixo considerado, o estado de tensão obtido para o reforço com a mistura com betume-borracha foi sempre inferior ao obtido com mistura convencional.

Finalmente, o dano no reforço constituído pela mistura com betume-borracha foi inferior ao dano verificado no reforço constituído pela mistura convencional.

### **3.8.5. Análise da influência do tipo de interface entre camadas**

Além da propagação de fendas, outro factor que interfere na fiabilidade do projecto de reabilitação e dimensionamento de pavimentos é a consideração feita com relação à ligação que existe na interface entre a camada de desgaste do pavimento existente e a camada de

reforço. A verificação da aderência entre as camadas pode ser feita com ensaios não destrutivos, caso do FWD (*Falling Weight Deflectometer*), e ensaios destrutivos conduzidos em laboratório.

A condição da interface das camadas afecta significativamente a distribuição de tensões e extensões nas estruturas dos pavimentos flexíveis. As diferentes concentrações de tensões entre camadas coladas ou descoladas podem ser explicadas devido a condição da ligação na interface das duas camadas betuminosas. Além dos parâmetros de ruína (tensão/extensão) já introduzidos na análise mecanicista de dimensionamento, o parâmetro condição da interface deveria ser considerado na modelação.

A reabilitação estrutural de um pavimento deteriorado requer a colocação de uma nova camada sobre o pavimento existente. O reforço do pavimento consiste na aplicação de uma fina camada betuminosa na superfície do pavimento existente, sendo que a boa ligação entre a camada existente e a nova é necessária de modo a garantir a vida de projecto da reabilitação (Nishiyama *et al.*, 2005).

Os métodos de dimensionamento são baseados em algoritmos para calcular as tensões, deformações e deflexões nas camadas que constituem o pavimento. Na modelação da estrutura e no processo computacional utilizados, a maior parte dos métodos, considera que as camadas são “coladas” entre si. Alguns métodos permitem a modelação admitindo camadas “coladas” e “não coladas”, atribuindo coeficientes 1 e 0 respectivamente. Entretanto, a selecção e atribuição destes coeficientes é de difícil estabelecimento, pois não existe um procedimento de ensaio padronizado para determiná-los (Romanoschi & Metcalf, 2000<sub>B</sub>).

Relativamente a condição da ligação entre as camadas granulares, para a modelação da estrutura para o cálculo do dimensionamento do reforço, considera-se estas camadas como coladas. A importância da ligação entre duas camadas betuminosas, desde que a camada inferior não apresente degradações, pode ser explicada através das duas situações, como mostra a Figura 3.40.

A primeira situação (a) mostra duas camadas betuminosas que apresentam boa ligação entre elas, em que o pavimento actua como um sistema único (monolítico) e observa-se uma baixa tensão na base da camada inferior. Entretanto, a segunda situação (b) mostra que as duas

camadas betuminosas são independentes e actuam individualmente, e observa-se uma alta tensão na base das duas camadas.

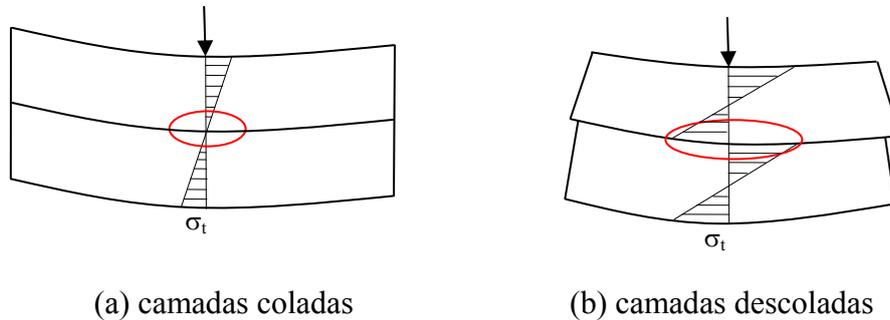


Figura 3.40 – Diferentes estados de tensão observados entre camadas coladas e descoladas

Tais diferentes concentrações de tensões entre camadas coladas ou descoladas podem ser explicadas devido a condição da ligação na interface das duas camadas betuminosas. Devido a falta de ligação, a camada superficial apresenta-se incapaz de resistir a tensão de corte aplicada devido a passagem do tráfego, enquanto que a camada inferior por ser independente pode deslizar sob a camada inferior.

Romanoschi & Metcalf (2000<sub>A</sub>) estudaram a condição da interface das camadas betuminosas através da modelação da estrutura de um pavimento utilizando o programa computacional de elementos finitos ABAQUS e concluiu o seguinte:

- quando há uma fraca ou pequena ligação entre as camadas, a extensão de tracção aumenta significativamente no face inferior da camada de desgaste;
- o fendilhamento com origem na superfície pode ter como uma das causas a condição de aderência entre as camadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO, 2000. Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Part II – Tests. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C., USA.
- AASHTO, 2001. AASHTO – Provisional Standards. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C., USA.
- AASHTO TP-01, 2001. Standard Test Method for Determining Permanent Shear Strain and Stiffness of Asphalt Mixtures Using the Superpave Shear Tests (SST). American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C., USA.
- AFNOR NF P 18-592, 1990. Association Française de Normalisation – AFNOR. Materiais Granulares – Ensaio de azul-de-metileno – Método da Mancha.
- AI, 1989. Asphalt Institute. The Asphalt Handbook. Manual Séries nº 4 (MS – 4). USA.
- AI, 1994. SUPERPAVE Level 1: Mix Design. Asphalt Institute. Series nº 2. Lexington, USA.
- AI, 1995. SUPERPAVE: Performance Graded Asphalt: Binder Specification and Testing. Asphalt Institute. Series nº1. Lexington, USA.
- AI, 1997. Mix Design Methods: For Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Typs. Manual Series nº 2 (MS-2). 6<sup>th</sup> Edition. Lexington, USA.
- Antunes, M.L.B.C., 2005. Modelação do Comportamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis. Programa de Investigação e Programa de Pós-Graduação Apresentados para a Obtenção do Título de “Habilitado para o Exercício de Funções de Coordenação de Investigação Científica”. Lisboa, Portugal.
- Aporbet, 1996. Contribuição para a Normalização do Fabrico e da Aplicação, Parte 1 – Materiais e tipos de Misturas Betuminosas. Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas. Portugal.

ASTM D 1664, 1980. Test Method for Coating and Stripping of Bitumen-Aggregate Mixtures. Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.02., USA.

ASTM C 131, 1987. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.02. USA.

ASTM D 546, 1993. Standard Test Method for Sieve Analysis of Mineral Filler for Road and Paving Materials. Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.02. USA.

ASTM E 303, 1993. Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester. Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.02. USA.

ASTM D 36, 1995. Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.02. USA.

ASTM D 242, 1995. Standard Specifications for Mineral Filler for Bituminous Paving for Mixtures. Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.02. USA.

ASTM, 1996. Annual Book of ASTM Standards. Section 4: Construction. Vol. 04.3. Road and Paving Materials, Vehicle-Pavement Systems. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, USA.

ASTM E 965, 1996. Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique. Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.02. USA.

ASTM D 5, 1997. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.02. USA.

ASTM E 1960, 1998. Standard Practice for calculating International Friction Index of a Pavement Surface. West Conshohocken: ASTM Standards, USA.

- Baaj, H., 2002. Comportement à la fatigue des Materiaux Granulaires traités aux Liants Hydrocarbonés. These soutenue devant L'Institut National des Sciences Appliquees de Lyon. Ecole Doctorale ds Sciences pour L'Ingenieur de Lyon. Lyon, France.
- Bahia, H.U. & Anderson, D.A., 1995. Strategic Highway Research Program Binder Rheological Parameters: Background and Comparison with Conventional Properties. Transportation Research Record 1488, TRB, Washington, D.C., USA.
- Bernucci, L.B.; Motta, L.M.G.; Ceratti, J.A.P.; Soares, J.B., 2007. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. PETROBRÁS Asfaltos e ABEDA (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos. Rio de Janeiro, RJ; Brasil.
- Bonnot, J., 1986. Asphalt Aggregate Mixtures, Transportation Research Record nº 1096, Transportation Research Board, USA.
- Branco, F.; Pereira, P.A.A.; Picado-Santos, L.G., 2005. Pavimentos Rodoviários. Editora Almedina, SA. Portugal.
- BS 812 Part 105, 1990. Testing Aggregates. General Requirements for Apparatus and Calibration. CD Rom. British Standard, London, United Kingdom.
- Brosseaud, Y., Delorme, J.L.; Hiernaux, R., 1993. Use of LPC Wheel-Tracking Rutting Tester to Select Asphalt Pavements Resistant to Rutting. Transportation Research Record nº1383. TRB, National Research Council, Washington, D.C., USA.
- Brown, S.F., & Pell, P.S., 1974. Repeated Loading of Bituminous Materials, CAPSA 74, National Institute for Road Research, Republic of South Africa, Durban.
- Caltrans, 2003. Maintenance Technical Advisory Guide (TAG), Caltrans. State of California Department of Transportation, Sacramento, California, USA.
- Capitão, S.D., 2003. Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade. Tese de Doutoramento. Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.

- Ceratti, J.A.P.; Wessling, D.H.; Specht, L.P., 2003. Estudo Laboratorial do Comportamento de Misturas em concreto Asfáltico com Diferentes Tipos de Filers. 34ª Reunião Anual de Pavimentação, Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv). Campinas, SP, Brasil.
- Chen, J.S.; Chang, M.K.; Lin, KY., 2005. Influence of Coarse Aggregate Shape on the Strength of Asphalt Concrete Mixtures. Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies. National Science Council (NSC92-2211-E-006-097). National Cheng Kung University, Taiwan.
- Chipperfield, E.H., Duthie, J.L.; Girdler, R.B., 1970. Asphalt Characteristics in Relation to Road Performance. Proceedings Association Asphalt Paving Technologists, vol. 39, pg. 575. Seattle, USA.
- Chomton, G. & Valayer, P.J., 1972. Applied Rheology of Asphalt Mixes, Practical Applications. Proceedings, Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, vol. I, September. London, U.K.
- Clyne, T.R.; Li, X.; Marasteanu, M.O.; Skok, E. L., 2003. Dynamic and Resilient Modulus of MN/DOT Asphalt Mixtures. Department of Civil Engineering. University of Minnesota. Sponsoring by Minnesota Department of Transportation. St. Paul, Minnesota, USA.
- Colombier, G., 1997. Cracking in Pavements: Nature and Origin of Cracks. RILEM Report 18, Prevention of Reflective Cracking in Pavements. E & SPON. London, U.K.
- Corté, J.F. & Serfass, J.P., 2000. The French Approach to Asphalt Mixtures Design: A Performance Related System of Specification. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. White Bear Lake, MN, USA.
- Davis, R., 1988. Large Stone Mixes: An Historical Right, IS-103, National Asphalt Paving Association.
- De La Roche, C., 1996. Module de Rigidité et Comportement en Fatigue des Enrobés Bitumineux, Expérimentations et Nouvelles Perspectives d'Analyse, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Paris. Paris, France.

Di Benedetto, 1990. Nouvelle Approche du Comportement des Enrobe Bitumineux: Resultants Expérimentaux et Formulation Rhéologique. RILEM 90. – Mechanical Tests for Bituminous Mixes. Budapest, Hungary.

Di Benedetto H.; De La Roche, C.; Francken, L., 1997. Fatigue of Bituminous Mixtures: Different Approaches and RILEM Interlaboratory Tests. Proceedings of the Fifth RILEM Symposium on Mechanical Tests for Bituminous Mixes. Rotterdam, Netherlands.

Di Benedetto, H. & De La Roche, C., 1998. State of the Art on Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixtures. RILEM Report 17. Bituminous Binders and Mixes. Brussels, Belgium.

Di Benedetto, H.; Partl, M.N.; Francken, L.; Saint André De La Roche, C., 2001. Stiffness Testing for Bituminous Mixtures. RILEM TC 182-PEB Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials. Dubendorf, Switzerland.

DNER, 1994. ME 078 (Agregados – Adesividade ao Ligante Betuminoso – Método de Ensaio). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, Brasil.

Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)

DNER, 1994. ME 079 (Agregados – Adesividade ao Ligante Betuminoso – Método de Ensaio). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, Brasil.

Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)

DNER, 1995. EM 204 (Cimentos Asfálticos de Petróleo – Especificação de Material). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, Brasil.

Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)

DNER, 1997. EM 313 (Pavimentação – Concreto Betuminoso – Especificação de Serviço). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, Brasil.

Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)

- DNER, 1997. EM 367 (Material de Enchimento para Misturas Betuminosas – Especificação de Material). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)
- DNER, 1994. ME 133 (Determinação do Módulo de Resiliência de Misturas Betuminosas – Método de Ensaio). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)
- DNIT, 2006<sub>A</sub>. Manual de Pavimentação, 3ª Edição. Ministério dos Transportes – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação IPR 719. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)
- DNIT, 2006<sub>B</sub>. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, 2ª Edição. Ministério dos Transportes – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação IPR 720. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)
- DNIT, 2006. EM 095 (Cimentos Asfálticos de Petróleo – Especificação de Material). Departamento Nacional de Infra-Estrutura Terrestre. Diretoria de Planejamento e Pesquisa/IPR. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)
- Eisenmann, J. & Hilmer, A., 1987. Influence of Wheel Load and Inflation Pressure on the Rutting Effect at Asphalt Pavements – Experiments and Theoretical Investigations, Proceedings, Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. I, Ann Arbor, 392-403.
- Epps, A.; Harvey, J.T.; Kim, Y.R.; Roque, R., 2003. Structural Requirements of Bituminous Paving Mixtures. TRB Transportation Research Board. Millennium Papers. A2D04 Committee on Characteristics of Bituminous Paving Mixtures to Meet Structural Requirements.
- Ferry, J.D., 1980. Viscoelastic Properties of Polymers, John Wiley, New York.

FHWA, 1994. Background of SUPERPAVE Asphalt Binder Test Methods. Federal Highway Administration, Publication FHWA-SA-94-069. Washington, D.C., USA.

FHWA, 1995. Background of SUPERPAVE Asphalt Mixture Design and Analysis. Federal Highway Administration, Publication FHWA-SA-95-003. Washington, D.C., USA.

Finn, F.N. & Monismith, C.L., 1984. NCHRP Synthesis of Highway Practice 116: Asphalt Overlay Design Procedures. TRB, National Research Council, Washington, D.C., USA.

Flintsch, G. W.; Al-Quadi, I. L.; Loulizi, A.; Mokarem, D., 2005. Laboratory Tests for Hot-Mix Asphalt Characterization in Virginia. Virginia Tech Transportation Institute, Project nº 70983. Blacksburg, Virginia, USA.

Francken, L., 1993. Laboratory Simulation and Modelling of Overlay Systems. Proceedings of the Second International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements.

Francken, L., 1997. RILEM Interlaboratory Test on Binder Rheology. Proceedings of the Fifth International Rilem Symposium MTBM – Mechanical Tests for Bituminous Materials. Lyon, France.

Francken, L.; Vanelstraete, A.; de Bondt, A.H., 1997. Modelling and Structural Design of Overlay Systems. RILEM Report 18, Prevention of Reflective Cracking in Pavements. E & SPON. London, U.K.

Francken, L., 1998. Rheology Test of Bituminous Binders. RILEM Report. Bituminous Binders and Mixtures. Technical Committee 152-PBM – Performance Bituminous Materials. Brussels, Belgium.

Freitas, E.F., 2004. Contribuição para o Desenvolvimento de Modelos de Comportamento dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis – Fendilhamento com Origem na Superfície. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal.

- Harris, B.L.M. & Stuart, K.D., 1995. Analysis of Mineral Fillers and Mastics Used in Stone Matrix Asphalt. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT. Portland, Oregon, USA.
- Hicks, R.P., 1991. Moisture Damage in Asphalt Concrete. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 175. Transportation Research Board Washington, D.C., USA.
- Hicks, R.G.; Lundy, J.R.; Leahy, R.B.; Hanson D.; Epps, J., 1995. Crumb Rubber Modifiers (CRM) in Asphalt Pavements: Summary of Practices in Arizona, California and Florida. Report FHWA-SA-95-056, FHWA. USA.
- Hofstra, A. & Klomp A.J.G., 1972. Permanent Deformation of Flexible Pavements Under Simulated Road Traffic Conditions. Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. London, U.K.
- Huang, Y.H., 1993. Pavement Analysis and Design. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., USA.
- IBP, 1999. Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos. Instituto Brasileiro do Petróleo 7ª Edição. IBP/Comissão do Asfalto. Rio de Janeiro, RJ, Brasil
- Irwin, G.R., 1957. Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate. Journal of Applied Mechanics 24, pp. 361–363.
- Jacobs, M.M., 1995. Crack Growth in Asphalt Mixes. PhD Thesis. Delft University of Technology. Delft, The Netherlands.
- Janoo, V.C. & Korhonen, C., 1999. Performance Testing of Hot-Mix Asphalt Aggregates. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Hanover, New Hampshire, USA.
- Kandhal P.S.; Parker F.J.; Mallick, R. B., 1997. Aggregate Tests for Hot Mix Asphalt: State of the Practice. NCAT Report n° 98-6. USA.

Kennedy, T.W. & Hudson, W.R., 1968. Application of the Indirect Tensile Test to Stabilized Materials. Highway Research Record 235, Highway Research Board, Washington, D.C.; USA.

LCPC, 2007. PCG 3: Presse de Compactage à Cisaillement Giratoire – Mesure d'aptitude au Compactage. Etude des Propriétés des Matériaux. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Leite, L.M.F.; Motta, L.M.G.; Bariani, L.B.; Soares, J.B., 2000. Mechanical Behaviour of Asphalt Rubber Mixes Prepared in Laboratory. Asphalt Rubber 2000 – Proceedings. Vilamoura, Portugal.

Linden, F. & Van der Heide, J., 1987. Some Aspects of the Compaction of Asphalt Mixes and its Influence on Mix Properties. Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 56.

Little, D.N. & Epps, J.A., 2001. The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt. National Lime Association. Arlington, VA, USA.

LNEC, 1962. Vocabulário de Estradas e Aeródromos. Especificação nº 1. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, Portugal.

LNEC, 1969. E-233 – Especificação 233. Agregados, Análise Granulométrica. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, Portugal.

LNEC, 1970. E-237 – Especificação 237. Agregados, Ensaio de Desgaste pela Máquina de Los Angeles. Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, 1970. Lisboa, Portugal.

LNEC, 1997. E-80 – Especificação 80. Betumes e Ligantes Betuminosos. Betumes de Pavimentação (classificação, propriedades e exigências de conformidade). Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, Portugal.

- Luminari, M. & Fidato, A., 1998. State of the Art Report on Mix Design. RILEM Report 17. Bituminous Binders and Mixes. State of the Art and Interlaboratory Tests on Mechanical Behaviour and Mix Design, pg. 69-101. London, England.
- Mahboub, K & Little, D.N., 1988. Improved Asphalt Concrete Design Procedure. Research Report 474-1F, Texas Transportation Institute, USA.
- Martín-Pérez, B. & Mohamed E.H.H., 2000. Determining the Potential for Reflection of Cracks. Proceedings of the Fourth International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements. Ottawa, Canada.
- Medina, J., 2005. Mecânica dos Pavimentos. Editora da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Minhoto, M.J.C., 2007. Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal.
- Molenaar, A.A.A. & Potter, J., 1997. Assessment and Evaluation of the Reflective Crack Potential. RILEM Report 18, Prevention of Reflective Cracking in Pavements. E & SPON. London, U.K.
- Molenaar, A.A.A., 2003. Pavement Performance Evaluation and Rehabilitation Design. MAIREPAV'03, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Interbational Symposium. Guimarães, Portugal
- Momm, L., 1998. Estudo dos Efeitos da Granulometria sobre a Macrotextura Superficial do Concreto Asfáltico e seu Comportamento Mecânico. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, Brasil.
- Monismith, C.L.; Epps J.A.; Kasianchuk A.; McLean D.B., 1971. Asphalt Mixture Behaviour on Repeated Flexure. Report No. TE 70-5, University of California, Berkeley, USA.

- Monismith, C.L., 1981. Fatigue Characteristics of Asphalt Paving Mixtures and Their Use in Pavement Design. Proceedings, 18th Paving Conference, University of New Mexico, Albuquerque, USA.
- Monismith, C.L.; Epps, J.A.; Finn, F.N., 1985. Improved Asphalt Mix Design. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists.
- Montestruque, G.E., 2002. Contribuição para a Elaboração de Método de Projecto de Restauração de Pavimentos Asfálticos Usando Geossintéticos em Sistemas Anti-Reflexão de Trincas. Tese de Doutorado. Instituto Tecnológico da Aeronáutica – ITA. São José dos Campos, São Paulo, Brasil.
- Motta, L.M.G. & Leite, L.F.M., 2000. Efeito do Filer nas Características Mecânicas das Misturas Asfálticas. Anais do 11º Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte. Gramado, Rio Grande do Sul, Brasil.
- NCAT, 1998. National Center for Asphalt Technology. Report nº NCAT 99-2. Auburn, Alabama, USA.
- Nishiyama, T.; Lee, D. H.; Batí, M. A., 2005. Investigation of Bonding Condition in Concrete Overlay by Laboratory Testing, Finite Element Modeling and Field Evaluation. 84<sup>th</sup> Transportation Research Boarding (TRB) Annual Meeting. Paper number 05-2009. Washington, D.C., USA.
- NLA, 2001. National Lime Association. Using New Pavement Design Procedures for Hot Mix Asphalt Mixtures Modified with Hydrated Lime. Technical Brief. Arlington, VA, USA.
- NLT 173, 1984. Resistencia a la Deformación Plástica de las Mezclas Bituminosas mediante la Pista de Ensayo de Laboratorio. Centro de Estudios de Carreteras. Espanha.
- NP EN 933-8, 2002. Norma Portuguesa Especificação Normativa 933-8. Ensaio das Propriedades Geométricas dos Agregados. Parte 8: Determinação do Teor de Finos. Ensaio do Equivalente de Areia. Instituto Português de Qualidade, 2005. Caparica, Portugal.

- NP 581, 1969. Determinação das Massas Volúmicas e da Absorção de Água de Britas e Godos. Instituto Português de Qualidade, 2005. Caparica, Portugal.
- NP 954, 1973. Determinação das Massas Volúmicas e da Absorção de Água das Areias. Instituto Português de Qualidade, 2005. Caparica, Portugal.
- Pais, J.C., 1999. Consideração da Propagação de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal.
- Pais, J.C.; Pereira, P.A.A.; Sousa, J.M.B.; Capitão, S., 2002. Evaluation of the Load Associated Cracking in Flexible Pavements. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields – Volume 1. Lisbon, Portugal.
- Paris P.C. & Erdogan F., 1963. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. Transactions. of the ASME. Journal of Basics Engineering, Series D, 85, nº3, p. 528.
- Partl, M.N. & Francken, L., 1998. Background of RILEM Interlaboratory Tests. Basic Elements of a Testing Methodology for Bituminous Pavement Materials and Significant Features for Testing. RILEM Report 17. Bituminous Binders and Mixes. Brussels, Belgium.
- Pell, P.S., 1973. Characterization of Fatigue Behavior. Structural Design of Asphalt Concrete Pavements to Prevent Fatigue Cracking, Special Report 140, Highway Research Board, pág. 49-64.
- Pell, P.S. & Cooper, K.E., 1975. The Effect of Testing and Mix Variables on the Fatigue Performance of Bituminous Materials. Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 44.
- Picado-Santos, L.G., 2005. Mestrado em Engenharia Rodoviária, Disciplina Pavimentos Rodoviários. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal.

- Preussler, E.S. & Pinto, S., 2001. Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis. Editora Copiarte. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Prowell, B.D.; Zhang, J.; Brown, E.R., 2005. Aggregate Properties and the Performance of Superpave- Designed Hot Mix Asphalt. National Cooperative Highway Research – Program NCHRP Report 539. Transportation Research Board – TRB. Washington, D.C., USA.
- Rao Tangella, S.C.S.; Craus, J.; Deacon, J.A.; Monismith, C.L., 1990. Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures. SHRP Report nº TM-UCB-A003-89-3. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C., USA.
- Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E., Ray, Lee, D., Kennedy, T.W., 1996. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, NAPA Research and Education Foundation, Lanham, MD, USA.
- Romanoschi<sub>A</sub>, S. A. & Metcalf, J. B., 2000. The Effects of Interface Layer Condition and Horizontal Wheel Loads on the Life of Flexible Pavement Structures. Transportation Research Board (TRB), 80<sup>th</sup> Annual Meeting. January, 2001, Washington, D.C., USA.
- Romanoschi<sub>B</sub>, S. A. & Metcalf, J. B., 2000. The Characterization of Asphalt Concrete Layer Interfaces. Transportation Research Board (TRB), 80<sup>th</sup> Annual Meeting. January, 2001, Washington, D.C., USA.
- Said, S.F., 1988. Fatigue Characteristics of Asphalt Concrete Mixtures. VT1 Meddelande 83A, Vag-6ch Traffic Institute, Swedish.
- Santana, H., 1992. Manual de Pré-Misturados a Frio. Instituto Brasileiro do Petróleo, Comissão de Betume. Rio de Janeiro, Brasil.
- Shaw, D.S., 1975. Introdução à Química dos Colóides e de Superfícies. Tradução: Juergen Heinrich Maar. Edgard Blucher, Editora da Universidade de São Paulo, SP, Brasil.

- Shell, 2003. The Shell Bitumen Handbook. Fifth Edition. Thomas Telford Publishing. London, United Kingdom.
- SHRP<sub>A</sub>, 1994. SHRP – A – 410. Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C., USA.
- SHRP<sub>B</sub>, 1994. SHRP – A – 403. Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C., USA.
- Silva, H.M.R.D., 2002. Estudo da Adesividade das Misturas Betuminosas. Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica. Escola de Engenharia. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- Sousa, J.B.; Craus, J.; Monismith, C.L., 1991. Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete. SHRP-A/IR-91-103. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C., USA.
- Sousa, J.B.; Solaimanian, M.; Weissman, S.L., 1994. Development and Use of the Repeated Shear Test (Constant Height): An Optional Superpave Mix Design Tool. SHRP-A-698. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C., USA.
- Sousa, J.B.; Pais, J.C.; Saim, R.; Way, G.; Stubstad, R.N., 2002. Development of a Mechanistic-Empirical Based Overlay Design Method for reflective Cracking. Journal of the Transportation Research Board. Washington, D.C., USA.
- Tonial, I.A., 2001. Influência do Envelhecimento do Revestimento Asfáltico na Vida de Fadiga de Pavimentos. Tese de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
- Trevino, M.; Dossey, T.; McCullough, F.B.; Yildirim Y., 2003. Applicability of Asphalt Concrete Overlays on Continuously Reinforced Concrete Pavements. FHWA/TX-05/0-4398 1. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Texas Department of Transportation. Austin, Texas, USA.

- Uge, P., & van de Loo. P.J., 1974. Permanent Deformation of Asphalt Mixes, Koninklijke/Shell- Laboratorium, Amsterdam, Netherlands.
- Ullidtz, P., 1998. Modelling Flexible Pavement Response and Performance. 1<sup>st</sup> Edition. Technical University of Denmark. Polyteknisk Forlog. Denmark.
- USACE, 1991. Guide Specifications for Military Construction. CEGS-02556, United States Army Corps of Engineers, Washington, D.C., USA.
- Vanelstraete, A. & de Bondt, A.H., 1997. Cracking Prevention and Use of Overlay Systems. RILEM Report 18, Prevention of Reflective Cracking in Pavements. E & SPON. London, U.K.
- Whiteoak, D., 2003. Shell Bitumen Handbook, Fifth Edition, 2003. Shell Bitumen. London, England.
- WSDOT, 2005. Washington Department of Transportation, Washington, D.C., USA.  
<http://www.wsdot.wa.gov> (Página Oficial da Internet consultada em Março de 2005).
- Zaniewski, J.P. & Pumphrey, M.E., 2003. Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol. Asphalt Technology Program. Department of Civil and Environmental Engineering. Morgantown, West Virginia, USA.
- Zhang, J.; Cooley Jr., L.A.; Kandhal, P.S., 2002. Comparison of Fundamental and Simulative Test Methods for Evaluating Permanent Deformation of Hot Mix Asphalt. NCAT Report 02-07 National Center for Asphalt Technology. Auburn University, Alabama, USA.
- Zhou, F. & Scullion, T., 2004. Overlay Tester: A Rapid Performance Related Crack Resistance Test. Texas Transportation Institute & Texas Department of Transportation. Technical Report nº FHWA/TX-05/0-4467-2. National Technical Information Service. Springfield, Virginia, USA.

## Capítulo 4

### MISTURAS BETUMINOSAS COM BETUME-BORRACHA

#### 4.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo trata inicialmente dos processos de obtenção da borracha granulada de pneus usados e a sua incorporação no betume, produzindo um “novo ligante”, o betume-borracha. Posteriormente, as características, o comportamento e o desempenho de misturas betuminosas produzidas com betume-borracha são avaliados em camadas de pavimentos rodoviários.

A geração de resíduos sólidos constitui um problema ambiental que, de forma determinante, afecta a qualidade de vida. O lixo não recolhido e depositado de forma inadequada em aterros ou a céu aberto gera problemas sanitários e de contaminação hídrica nos locais onde é armazenado. Alternativamente, a deposição dos resíduos sólidos deve ser realizada de forma adequada através da reciclagem; depósito em aterros sanitários ou incineração.

A industrialização e o desenvolvimento dos países promovem o aumento do número de veículos nas estradas, gerando milhões de pneus usados e o problema do destino final deste resíduo. Este projecto de investigação trata da utilização de borracha de pneus usados como modificador das características do betume para produção de misturas betuminosas, através da reciclagem da borracha.

Apesar do facto dos pneus usados representarem pouco mais de 1% dos resíduos sólidos produzido no mundo, requerem uma deposição especial no meio ambiente e a sua reutilização é considerada um desafio tendo em conta as suas características como: (i) tamanho; (ii) forma; (iii) natureza físico-química. Os pneus usados não são, em geral, recolhidos como lixo doméstico pelas autoridades municipais, sendo classificados como resíduo especial ou produto durável (Lund, 2001).

A quantidade de resíduos provenientes da indústria da borracha e do destino final dos pneumáticos do tráfego rodoviário impulsionou o desenvolvimento de estudos conducentes à reutilização dos pneus usados. O aproveitamento de pneus usados tem sido feito através da

produção de tapetes e artefactos de borracha, estabilização de taludes e encostas, controlo de erosão e como combustíveis. No entanto, a utilização de pneus usados na incorporação de betumes, como agente modificador, tem sido estudado há vários anos e constitui uma alternativa à reciclagem destes materiais.

A obtenção de borracha de pneus usados é feita através da trituração à temperatura ambiente ou com temperaturas criogénicas (do grego *kryos* que significa gelo em português), em que a redução da borracha em grãos é realizada em temperaturas negativas, inferiores a -120 °C, resultando a borracha com diversas granulometrias e diferentes características.

As características da borracha obtida para modificação do betume têm uma influência decisiva para o sucesso do desempenho das misturas betuminosas produzidas com betume-borracha. Os betumes-borracha resultantes de diferentes processos de obtenção (ambiente e criogénico) apresentam diferentes propriedades (Baker *et al.*, 2003).

Desde o início do século XX que tem vindo a ser utilizados betumes-borracha em camadas betuminosas. No final dos anos 30 utilizava-se uma mistura de betume com borracha para selagem de fendas. O grande avanço tecnológico deu-se, principalmente, no início nos anos 40 quando a empresa *United States Rubber Reclaiming Company* (Estado do Mississípi, Estados Unidos) comercializou partículas de borracha de pneus usados para utilização como agregado em misturas betuminosa. Posteriormente, nos anos 60, o engenheiro Charles McDonald desenvolveu o processo de modificação do betume com a incorporação de borracha de pneus usados (Heitzman, 1992).

As limitações da modificação do betume com borracha de pneus usados estão relacionadas com três factores principais: (i) composição química do betume; (ii) método de refinação; (iii) tipo do material adicionado para a modificação. A adição de agentes modificadores ao betume é realizada para melhorar propriedades do ligante original como susceptibilidade térmica e flexibilidade. A borracha de pneus é uma mistura de diversos materiais, incluindo polímeros, largamente utilizada para modificação das propriedades dos betumes (Holleram, 2000).

A incorporação de borracha de pneus usados no betume para produção de misturas betuminosas, além de melhorar o seu desempenho, contribui também para o destino final

adequado de um resíduo sólido, o pneu. De acordo com Amirkhanian (2001), cada tonelada de mistura betuminosa com betume-borracha permite a incorporação de 2 a 6 pneus usados.

A incorporação de borracha granulada em misturas betuminosas pode ser feita através de dois processos: (i) húmido (*wet process*); (ii) seco (*dry process*). No processo húmido, a borracha granulada é adicionada ao betume convencional produzindo um novo tipo de betume denominado betume-borracha. No processo seco, as partículas de borracha são utilizadas em substituição de parte dos agregados pétreos.

As misturas betuminosas com betume-borracha possuem as mesmas aplicações que as misturas convencionais e podem ser usadas como camadas de desgaste ou como camadas do tipo SAM (*Stress Absorving Membrane*) ou SAMI (*Stress Absorving Membrane Interlayer*).

A partir da década de 60, nos Estados Unidos, a utilização de misturas betuminosas com betume-borracha foi intensificada. Diversos organismos rodoviários norte-americanos, principalmente nos Estados da Califórnia e do Arizona, têm investigado e aplicado este tipo de misturas em camadas de pavimentos rodoviários. De acordo com Way (2003) somente no Estado do Arizona mais de 28000 km de pavimento foram construídos ou reabilitados utilizando betume-borracha.

Desde então e, principalmente, a partir da década de 80 outros organismos rodoviários norte-americanos, além do *California Department of Transportation* (Caltrans) e do *Arizona Department of Transportation* (ADOT), intensificaram o estudo e a aplicação de misturas betuminosas com betume-borracha utilizando granulometrias densas, abertas, contínuas e descontínuas. Além do excelente desempenho, a utilização de pneus usados passou a ser considerada também como uma alternativa para diminuir o problema da deposição deste resíduo.

No Brasil, a partir da década de 90, o Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES) e algumas universidades começaram a investigar o comportamento do betume-borracha. Actualmente, além das investigações conduzidas em universidades e centros de investigação, existem empresas de distribuição de betumes com avançada tecnologia de betume-borracha através do sistema *terminal blend* (incorporação da borracha ao betume em unidades industriais, no qual o produto pode ser armazenado por longos períodos de tempo).

Em 1999, a Administração Rodoviária Portuguesa aprovou o uso de misturas betuminosas utilizando betume-borracha para reabilitação das estradas nacionais EN 104 e EN 105, com uma extensão total de aproximadamente 30 km. O projecto de reabilitação constava de camadas de mistura betuminosa com betume-borracha através do processo húmido (*continuous blend*) e granulometria do tipo *gap graded* (descontínua densa) e foi aplicado com diversas espessuras (Antunes *et al.*, 2000).

Os benefícios da utilização de misturas betuminosas com betume-borracha no processo húmido são evidenciados por diversos autores, como sendo os seguintes (Roberts *et al.*, 1989; Hicks, 2002; Caltrans, 2003<sub>A</sub>; Baker *et al.*, 2003):

- maior resistência ao fendilhamento devido à elevada percentagem de betume;
- melhor resistência ao envelhecimento e oxidação devido à elevada percentagem de betume;
- melhoria da resistência à fadiga e propagação de fendas devido à elevada percentagem de betume;
- maior resistência à deformação permanente tendo em conta o aumento da viscosidade e do ponto de amolecimento;
- redução do ruído devido à maior película de betume (principalmente em texturas abertas);
- redução do efeitos de projecção de água (*splash* e *spray*) durante as chuvas (principalmente em texturas abertas);
- redução dos custos de conservação considerando o melhor desempenho do pavimento;
- maior resistência à desagregação devido à espessura da película de betume que recobre o agregado;
- menores custos de vida útil devido ao melhor desempenho da mistura;
- poupança de energia e de recursos naturais através da utilização de materiais reaproveitados.

## 4.2. BORRACHA DE PNEUS USADOS

### 4.2.1. Introdução

A borracha faz parte de um grupo de materiais industriais, que inclui também metais, fibras, betão, madeira, plásticos, vidros, dos quais depende parte da tecnologia moderna.

Os índios americanos foram os primeiros a descobrir e fazer uso das propriedades da borracha, tais como impermeabilizante de roupas, produção de uma espécie primitiva de botas e moldagem de vasilhames flexíveis. Posteriormente, na época da colonização da América, os europeus descobriram uma série de outras utilizações para a borracha. No entanto, este material apresentava duas dificuldades: (i) trabalhabilidade com a borracha sólida; (ii) trabalhabilidade em função da temperatura. Os produtos produzidos tornavam-se moles e pegajosos quando submetidos ao calor; duros e rígidos no inverno (Costa *et al.*, 2003).

O processo de vulcanização de borracha foi casualmente descoberto por Charles Goodyear, em 1839, ao deixar cair enxofre em uma amostra de borracha que estava sendo aquecida. Com isso foi descoberto um material mais resistente e elástico, cuja procura se multiplicou no mundo todo. Uma das principais aplicações da borracha vulcanizada é como matéria-prima dos pneus de veículos rodoviários.

A vulcanização, palavra derivada da mitologia romana (Vulcano, Deus do fogo e do trabalho com metais) é o termo utilizado para descrever o processo através do qual a borracha reage com enxofre para produzir uma rede de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas. Embora os materiais de borracha desenvolvidos a partir das formulações de Charles Goodyear fossem superiores em muitos aspectos, ainda estavam longe do ideal. Grandes quantidades de enxofre e tempos de cura relativamente longos eram necessários e os materiais vulcanizados apresentavam coloração intensa, indesejável afloramento de enxofre para a superfície e exibiam muito pouca resistência ao envelhecimento (Costa *et al.*, 2003).

O passo mais importante na evolução da vulcanização ocorreu com a descoberta dos aceleradores orgânicos, em 1900, que além do aumento da velocidade de vulcanização, permitiram o emprego de temperaturas mais baixas e tempos de cura menores. O negro de

fumo e outras cargas foram incorporados na mistura para melhorar as propriedades físicas do produto final, sem afectar a velocidade da reacção de cura (Costa *et al.*, 2003).

A humanidade, há mais de um século, tem usufruído dos pneumáticos de borracha que permitem a circulação dos veículos automotores. Ao longo do tempo os veículos foram produzidos em escalas cada vez maiores e como consequência também cresceu a indústria de pneus e o problema do destino final dos pneus usados.

Os pneus usados de veículos ligeiros (automóveis) e pesados (camiões) constituem um grande recurso como um material de uso secundário. Alguns pneus são utilizados novamente (processo de recauchutagem), no entanto os pneus, quando depositados adequadamente, podem ser transformados mecanicamente em fragmentos e posteriormente reduzidos a pó, podendo ser utilizados por diferentes indústrias.

O destino dos pneus usados ao ar livre é considerado o mais agressivo ao meio ambiente. Os pneus assim depositados apresentam três principais ameaças à saúde humana: (i) a forma em tubo aberto do pneu favorece a proliferação de insectos nocivos e transmissores de doenças; (ii) tendo em conta que os pneus contém substâncias tóxicas e que a biodegradação ocorre lentamente (não inferior a 150 anos) estas substâncias são libertadas na atmosfera e contaminam o solo, os rios e o lençol freático; (iii) considerando que um pneu comum contém o equivalente a 10 litros de óleo combustível, o risco de incêndios é sempre iminente (Adrietta, 2002).

A recolha e o destino final dos pneus usados variam de acordo com a economia local e as condições vigentes das instituições governamentais. No Brasil, tendo em conta a crescente acumulação de pneus usados e considerando os evidentes potenciais impactes ambientais decorrentes foram adoptadas diversas normas destinadas a prevenir a geração desnecessária de resíduos de pneus.

De facto, o Brasil está enquadrado em uma posição avançada na questão da deposição final dos pneus usados. A Resolução nº 258 (26/08/1999) do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) determinou que as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos são obrigadas a recolher e dar o destino, ambientalmente adequado, aos pneus

usados existentes no território nacional, proporcional ao volume de pneus fabricados ou importados introduzidos no mercado.

Em Portugal, o Decreto-lei n.º 111/2001 de 6 de Abril, com as alterações introduzidas pelo Decreto-lei n.º 43/2004, de 2 de Março, estabelece o regime jurídico a que fica submetida a gestão de pneus e pneus usados. A legislação estabelece os princípios e as normas aplicáveis à gestão de pneus e pneus usados, tendo como objectivos a prevenção da produção destes resíduos, a recauchutagem, a reciclagem e outras formas de valorização dos pneus, sendo aplicável a todos os pneus colocados no mercado nacional e a todos os pneus usados.

Constituem princípios fundamentais de gestão de pneus e de pneus usados a prevenção da produção destes resíduos, aliada ao aumento da vida útil dos pneus, a promoção da recauchutagem e a implementação e desenvolvimento de sistemas de reciclagem e de outras formas de valorização de pneus usados.

No Brasil, desde Janeiro de 2003 ficou proibida a deposição de pneus usados em aterros. Os seguintes objectivos de gestão para pneus usados são garantidos pelos produtores até Janeiro de 2007: (i) recolha de pneus usados numa proporção de, pelo menos, 95% dos pneus usados anualmente gerados; (ii) recauchutagem de pneus usados numa proporção de, pelo menos, 30% dos pneus usados anualmente gerados; (iii) valorização da totalidade dos pneus recolhidos e não recauchutados, dos quais pelo menos 65% deverão ser reciclados.

O reaproveitamento dos pneus usados pode ser feito ainda através de outras formas como as seguintes (Lund, 2001):

- protecção de construções à beira mar, em diques e cais;
- barragens e contenção de encostas(em geral depositados inteiros);
- recauchutagem com a adição de novas camadas de borracha;
- reaproveitamento energético em fornos de cimento e centrais termoeléctricas.

Entre 1999 e 2009, no Brasil, 200 milhões de pneus usados receberam destinação ambientalmente adequada através do Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis, de acordo com as seguintes aplicações: (i) 80% como combustível alternativo para a indústria de cimento; (ii) 15% na fabricação de borracha utilizada em artefactos e

betume-borracha; (iii) 5% em indústrias de sapato e de ductos fluviais (ANIP, 2009). Em 2006, nos Estados Unidos, o destino dos pneus usados reciclados foi o seguinte: (i) 60% para a produção de combustível alternativo; (ii) 20% em aplicações na área de Engenharia Civil (produção de artefatos de cimento, betume-borracha, pátios, muros); (iii) 14% em outras aplicações (laminação, exportação), (EPA, 2008).

#### 4.2.2. Processos de obtenção de borracha

O primeiro pneu foi produzido em 1845 por R.W. Thompson na Escócia e reinventado por J.B. Dunlop em 1888 (RAC, 2004). Os primeiros pneumáticos eram feitos de algodão e borracha vulcanizada mas tiveram que ser substituídos porque frequentemente eram furados por qualquer tipo de objectos afiados. Com o progresso da tecnologia foram incorporados outros materiais como fibras, aço, negro de fumo e borracha sintética que contribuíram para a segurança e longevidade dos pneus. Apesar destes avanços tecnológicos, o crescimento dos veículos conduziu ao desafio do destino final dos pneus usados.

A produção de pneus representa um terço do consumo mundial de borracha. De acordo com Andrietta (2002), a borracha é o principal material do pneu, representando cerca de 40% do sua massa. Essa borracha pode ser dividida em dois tipos: (i) natural, cuja extracção é proveniente de uma derivada da seringueira (*hevea brasiliensis*); (ii) sintética, que corresponde a um tipo de polímero com propriedades físicas semelhantes à borracha natural, sendo derivada do petróleo ou do gás natural.

Além das borrachas natural e sintética, existem, como matéria-prima do pneu, os seguintes materiais constituintes: (i) SBR (borracha de estireno-butadieno); (ii) fibras orgânicas (nylon e poliéster); (iii) arames de aço; (iv) polímeros; (v) elastómeros termoplásticos; (vi) carbono (negro de fumo). A adição de negro de fumo, essencial na construção do pneumático, deixa a borracha mais resistente e aumenta seu desempenho. A proporção destes materiais varia de acordo com o tipo de pneu e fabricante (Holleram & Reed, 2000).

As misturas betuminosas estão submetidas à acção do envelhecimento e endurecem devido à sua exposição ao calor, oxigénio e raios ultravioletas (UV). Januszke (1971) investigou as mudanças reológicas dos betumes em serviço através da incorporação de 24 tipos de

antioxidantes, como por exemplo o negro de fumo. Januszke (1971) concluiu que as propriedades anti-oxidantes do negro de fumo contidas na borracha dos pneus são transferidas ao betume-borracha.

Os pneus dos veículos, dos quais é obtida a borracha utilizada para a modificação dos betumes para aplicação em misturas betuminosas, são constituídos pelas seguintes partes principais: (i) carcaça; (ii) talões; (iii) flancos; (iv) cintas de aço; (v) banda de rodagem. A Figura 4.1 apresenta a constituição de um pneu de um veículo ligeiro (Fapemig, 2003; Brazil tires, 2005).

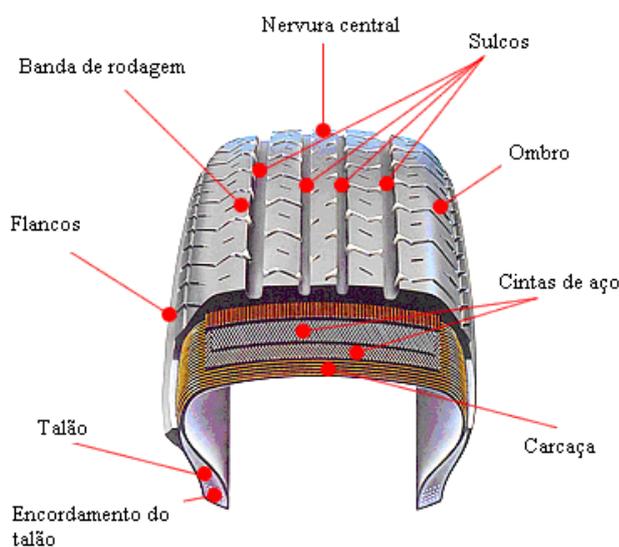


Figura 4.1 – Componentes de um pneu  
(adaptado de Brazil tires, 2005)

A carcaça constitui a parte resistente do pneu e tem a finalidade de resistir à pressão, sustentar o peso e suportar os choques. A carcaça é composta de lonas de poliéster, nylon ou aço e ainda retém o ar sob pressão que suporta o peso total do veículo.

Os talões constituem-se internamente de arames de aço de grande resistência, tendo por finalidade manter o pneu acoplado firmemente ao aro, impedindo-o de ter movimentos independentes.

Os flancos são constituídos por um composto de borracha de elevado grau de flexibilidade, com o objetivo de proteger a carcaça contra os agentes externos.

As cintas, também denominadas de cinturões, compreendem um feixe de cintas (lonas estabilizadoras) que são dimensionadas para suportar cargas em movimento e garantir a área de contacto necessária entre o pneu e o pavimento.

A banda de rodagem é a parte do pneu que fica directamente em contato com o pavimento, proporcionando resistência ao desgaste devido à composição da borracha e agentes químicos especiais. Os desenhos dos sulcos e nervuras visam proporcionar tracção, estabilidade e segurança ao veículo.

A massa de um pneu de um veículo ligeiro varia entre 5,5 e 7,0 kg e de um camião entre 55,0 e 80,0 kg. O Quadro 4.1 apresenta a composição química que, em geral, um pneu apresenta (Adrietta, 2002). O Quadro 4.2 apresenta os materiais contidos nos pneus de um veículo ligeiro e de um camião (RMA, 2005).

Quadro 4.1 – Composição química de um pneu (Adrietta, 2002)

Elemento/Composto	%
Carbono	70,0
Hidrogénio	7,0
Óxido de Zinco	1,2
Enxofre	1,3
Ferro	15,0
Outros	5,5

Quadro 4.2 – Comparação entre materiais contidos nos pneus (RMA, 2005)

Material	Ligeiro (%)	Camião (%)
Borracha natural	14	27
Borracha sintética	27	14
Negro de fumo	28	28
Aço	14 a 15	14 a 15
Tecido e outros	16 a 17	16 a 17

A proveniência dos pneus influencia o tipo de borracha e, conseqüentemente, as propriedades do betume-borracha com ela produzido. Os pneus de camião possuem uma quantidade de borracha natural superior em relação aos ligeiros. Um maior teor de borracha natural torna a borracha mais reactiva com o betume (TNZ, 2006).

Os dois principais processos para obtenção de borracha granulada de pneus utilizada na modificação de betumes são os seguintes: (i) ambiente; (ii) criogénico. Ambos os processos, ambiente e criogénico requerem inicialmente a limpeza dos pneus para posteriormente serem introduzidos no sistema de redução a pó de borracha.

O sistema de obtenção de borracha granulada do processo ambiente, corte e moagem, consiste na introdução do material (pneus usados) no granulador a temperatura ambiente. Durante o processo, a temperatura da borracha aumenta devido à fricção gerada (RRI, 2006).

De acordo com Reschner (2006) no sistema ambiente, apresentado na Figura 4.2, a primeira fase do processo é a redução preliminar dos pneus em tamanhos de aproximadamente 50 mm, denominados lascas, no Granulador Preliminar (A).

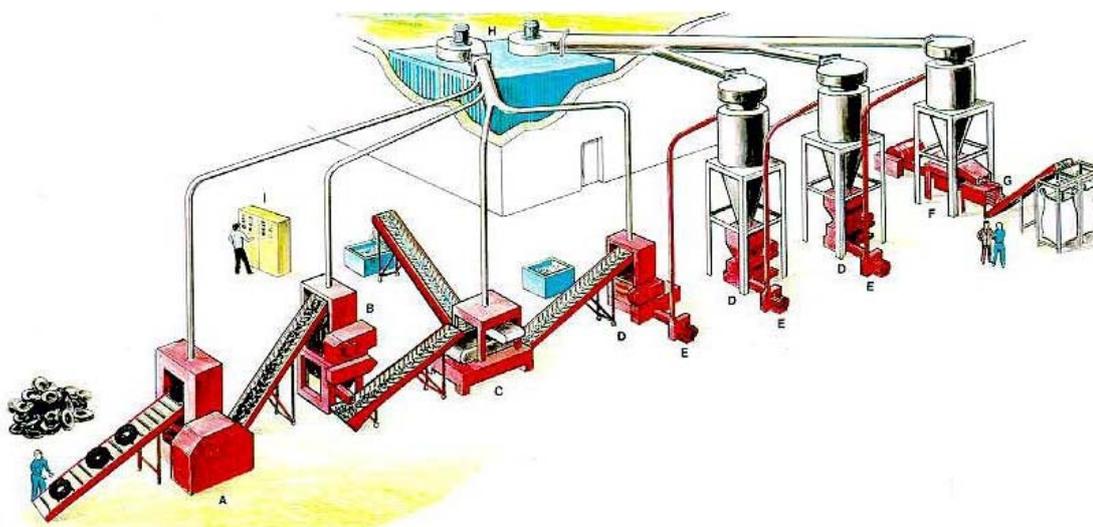


Figura 4.2 – Sistema do processo ambiente (Reschner, 2006)

As lascas de pneu passam então ao Granulador (B). Nesta fase do processo as lascas são reduzidas a tamanhos inferiores a 10 mm. Ainda nesta fase, grande parte do aço e das fibras ficam separadas dos grânulos de borracha.

Após a passagem pelo granulador, o aço é removido magneticamente enquanto que as fibras são removidas através da combinação de peneiros vibratórios e moinhos de vento (C). O pó gerado e as fibras são conduzidas ao Removedor de Fibras e Pó (H).

Tendo em conta a demanda por tamanhos granulares inferiores a 10 mm são necessárias fases sucessivas de trituração em Granuladores Secundários (D) para redução dos grânulos de borracha em tamanhos granulares finos. Os equipamentos, em geral, utilizados no sistema ambiente para esta redução são ainda: (i) Sistema Pneumático de Carregamento (E); (ii) Moinhos de Vento (F); (iii) Separador Magnético Secundário. No final do processo é realizada a ensacagem da borracha proveniente de pneus usados.

As partículas de borracha produzidas no processo ambiente, em geral, possuem elevada superfície específica, com aparência esponjosa, forma irregular, textura áspera. Este tipo de borracha possui reduzida distribuição granulométrica das partículas. (RRI, 2006; Reschner, 2006).

De acordo com Coulter (2003), as vantagens do processo ambiente são as seguintes: (i) a produção de borracha é realizado a um custo relativamente baixo; (ii) possui fácil manutenção e requer pessoal mínimo para operação dos equipamentos; (iii) no mercado existem diversas empresas que fabricam os equipamentos e os componentes do sistema. As principais desvantagens são os elevados custos e energia necessários para produzir os grânulos extremamente finos (inferiores a 0,25 mm) e o ambiente de trabalho insalubre.

A expressão criogenia é utilizada para descrever o uso de nitrogénio líquido ou dióxido de carbono sólido para resfriar materiais a uma temperatura inferior a 120 °C negativos. Sob baixas temperaturas, os materiais tornam-se frágeis e podem ser reduzidos por meio de prensas à granulometria desejada.

Da mesma maneira que no sistema ambiente, no sistema criogénico (Figura 4.3) a redução preliminar dos pneus em tamanhos de aproximadamente 50 mm, é realizada no Granulador Preliminar (A) (Reschner 2006).

Posteriormente, as lascas de 50 mm são esfriadas dentro de um Túnel de Resfriamento (B), que opera a temperaturas inferiores a 120 °C negativos e são trituradas por um Moinho de Martelo de alta rotação (C). No moinho de martelo, as lascas são quebradas em uma extensa gama de tamanhos de partícula, enquanto que, nesta mesma fase, são liberadas as fibras e o aço. As fibras e o aço são removidas através do Removedor de fibras e aço (D).

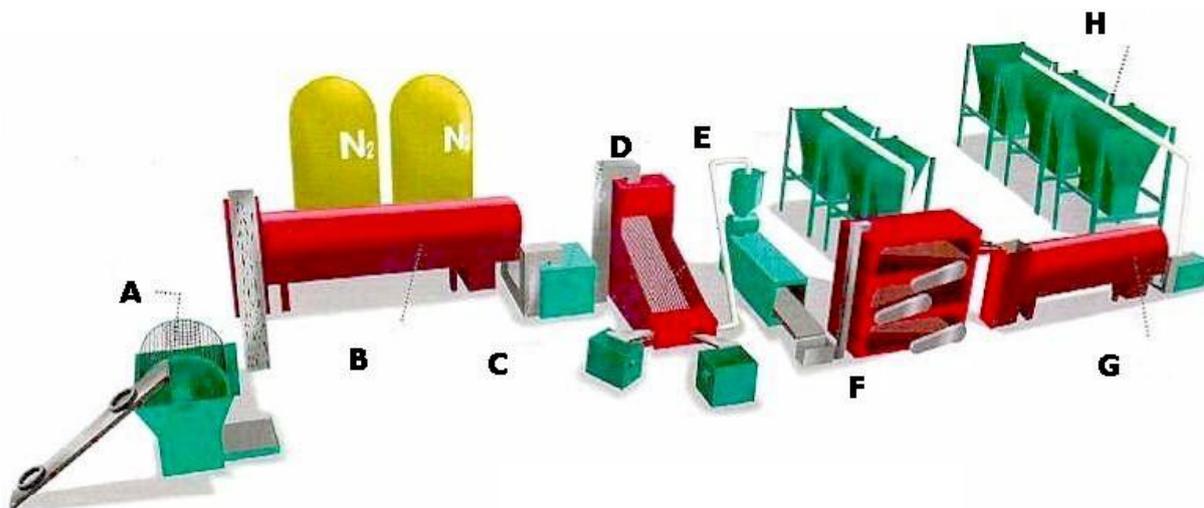


Figura 4.3 – Sistema do processo criogénico (Reschner, 2006)

Os grânulos de borracha ao saírem do moinho de martelo estão frios. Por esta razão o material é secado no Secador (E) antes da classificação em tamanhos de partícula no Classificador (F). O material passa ainda por um Triturador Secundário (G) para posteriormente ser armazenado nos Silos (H).

A forma da partícula de borracha obtida no sistema criogénico é regular com textura lisa e plana, com baixa superfície específica. Este tipo de borracha possui uma extensa distribuição granulométrica (RRI, 2006; Reschner, 2006).

De acordo com Roberts *et al.* (1989), a borracha proveniente do sistema criogénico produz uma recuperação elástica inferior quando comparada com a borracha produzida no sistema ambiente. Além disto, a superfície plana e lisa da borracha criogénica reage mais lentamente com o betume comparativamente à borracha do sistema ambiente.

A principal vantagem deste processo está na sua capacidade de controlar a uniformidade, o tamanho e o formato destas partículas. Outras vantagens do processo criogénico são: (i) limpeza; (ii) operação rápida; (iii) facilidade de produção de tamanhos granulares finos. A principal desvantagem é representada pelos custos de operação mais elevados que no processo ambiente devido ao custo adicional do nitrogénio líquido (Coulter, 2003).

Reschner, (2006) complementa que no sistema criogénico a redução dos pneus em tamanhos granulares finos requer menos energia em relação ao sistema ambiente. Outra vantagem do

sistema criogénico é relativa à remoção do aço e da fibra ser mais fácil, conduzindo a um produto de fim mais limpo.

#### **4.2.3. Características da borracha**

Além da quantidade de borracha adicionada, a principal característica da borracha de pneus usados que influenciam as propriedades do betume-borracha é sua granulometria. As características adicionais da borracha granulada que afectam o desempenho do betume-borracha são as seguintes (Hicks & Epps, 2000): (i) superfície específica; (ii) processo de obtenção; (iii) composição química; (iv) quantidade de contaminantes (água, fibras, minerais, aço).

A granulometria da borracha varia com o processo de produção, principalmente em função dos equipamentos e da temperatura de moagem (Heitzman, 1992). Além disto, a granulometria possui um efeito relevante nas propriedades do betume-borracha. As partículas grossas de borracha aumentam a viscosidade do produto final, betume-borracha. No entanto, partículas finas de borracha, principalmente a percentagem de partículas que passam no peneiro nº 50 (0,30 mm), resultam em um menor tempo de digestão (Caltrans, 2005).

O tempo de digestão ou de reacção é o termo, em geral, utilizado para descrever o tempo necessário para promover a interacção entre o betume e o agente modificador, a borracha, quando misturadas a elevadas temperaturas (Caltrans, 2003<sub>A</sub>).

O tamanho da partícula de borracha influencia a interacção entre o betume e a borracha. As partículas grossas de borracha, em geral, requerem maior tempo de digestão do que as partículas finas (Hicks, 2002).

De acordo com Hicks & Epps (2000), as partículas de borracha de tamanhos menores produzem mais rapidamente o inchamento devido à maior superfície específica e resultam em betume-borracha com viscosidade mais elevadas do que as partículas de borracha de tamanhos granulares maiores. Durante o armazenamento, o betume-borracha produzido com partículas de borracha de tamanhos menores têm, frequentemente, uma redução de

viscosidade devido ao rápido e completo processo de inchamento podendo ocorrer subsequentemente uma despolimerização.

A temperatura e o tempo de digestão da mistura betume-borracha dependem principalmente da granulometria da borracha. Por esta razão, quanto mais fina, maior a área superficial e menor será a temperatura e o tempo de digestão necessário para se obter um material homogéneo (Specht, 2004).

A reacção, definida como inchamento, não é uma reacção química e sim uma interacção física, na qual a borracha absorve óleos aromáticos e fracções leves do betume, e liberta óleos semelhantes utilizados na sua produção para o betume (Caltrans, 2003<sub>A</sub>).

A investigação desenvolvida por Dantas Neto (2004), com o uso de borracha de diferentes granulometrias e diferentes tempos de digestão, mostrou que ocorre uma diminuição da penetração com o aumento do tempo de mistura independentemente da granulometria da borracha usada. O uso de uma borracha com uma granulometria mais fina, com uma maior superfície específica, produz um aumento nos valores de resiliência e um aumento do ponto de amolecimento do betume-borracha produzido.

A borracha com uma maior superfície específica produz um aumento de viscosidade. A diminuição da viscosidade ocorrida com emprego de uma borracha com menor superfície específica pode ser atribuída à diminuição da área de contacto entre o betume e a borracha, tendo como consequência a diminuição das possíveis reacções entre estes dois materiais (Dantas Neto, 2004).

A quantidade de borracha acrescentada ao betume influencia as propriedades da mistura de modo que teores mais elevados de borracha produzem mudanças mais significativas das propriedades. Em geral, com o aumento do teor de borracha ocorrem as seguintes mudanças das propriedades (Hicks & Epps, 2000): (i) aumento da viscosidade a 175 °C; (ii) aumento da resiliência; (iii) aumento do ponto de amolecimento; (iv) diminuição da penetração a 25 °C.

Roberts *et al.* (1989) consideram a composição química da borracha um factor importante no produto final betume-borracha, de modo que quanto maiores os teores de borracha natural na composição da borracha granulada de pneus usados, melhores serão as características do

betume-borracha e, conseqüentemente, da mistura betuminosa. Relativamente à massa específica da borracha, quanto menor melhor serão as propriedades do betume-borracha tendo em conta a maior porosidade e a melhor interacção com o betume.

Diversos tipos de contaminantes podem estar presentes na borracha granulada como fibras, tecidos e metais. A água é também considerada um contaminante. A água presente nas borrachas podem causar espuma durante a mistura com o betume quente. O teor em água pode ser determinado por procedimentos padronizados de secagem das partículas de borracha a 110 °C até constância de massa. Têm-se verificado que teores em água superiores a 1% podem causar espumagem excessiva (Hicks & Epps, 2000).

A norma ASTM D 6114 (1997) fornece as especificações para a borracha granulada empregue na modificação dos betumes convencionais. De acordo com esta norma, a borracha de pneus utilizada para produção de betume-borracha, produzida em qualquer dos processos (ambiente e criogénico), dever estar seca, solta e não espumar quando misturada ao betume convencional a elevadas temperaturas.

A análise granulométrica da borracha é realizada de acordo com a norma ASTM C 136 (1996), adaptada com as recomendações constantes no *Greenbook* (2000), secção 203. O ensaio consiste na peneiração de aproximadamente 100 g de borracha, previamente seca em estufa entre 57 °C e 63 °C, com a adição de até 5g de talco ou carbonato de cálcio para evitar a formação de grumos durante o ensaio. Adicionalmente, em cada peneiro, são posicionadas bolas de borracha com  $8,5 \pm 0,5$  g de massa e  $24,5 \pm 0,5$  mm de diâmetro. Os teores de fibras têxteis e de partículas metálicas são determinados durante a peneiração em cada peneiro. Estes materiais são removidos manualmente ou se for o caso, com auxílio de ímanes.

Cada organismo rodoviário, em geral, possui especificações próprias para a granulometria das borrachas para aplicação em betumes-borracha.

### 4.3. BETUME-BORRACHA

#### 4.3.1. Introdução

A incorporação de polímeros em materiais betuminosos, com o objectivo de melhorar as características e propriedades dos betumes, não é recente. A primeira patente da combinação de um polímero (borracha natural) com betume, a ser utilizada como impermeabilizante, foi obtida por T. Hancock em 1823. No entanto, a primeira patente de uma mistura de material betuminoso com borracha natural para construção de estradas foi obtida por E.E. Castell em 1844 (Zanzotto & Kennepohl, 1996).

Os polímeros são grandes moléculas que são incorporadas ao betume visando melhorar suas características. Dependendo do tipo de polímero utilizado, uma elevada gama de propriedades pode ser obtida. Embora exista uma grande variedade de polímeros, apenas uma relativa quantidade é usualmente utilizada para modificação do betume, como os seguintes (Caltrans, 2003<sub>B</sub>): (i) SBS (*Styrene Butadiene Copolymer*); (ii) SBR (*Styrene Butadiene Rubber*); (iii) EVA (*Ethylene Vinyl Acetate*); (iv) resinas epoxis; (v) borracha de pneus usados.

O betume-borracha tem sido utilizado com sucesso por diversos organismos rodoviários internacionais, principalmente nos Estados Unidos. A adição de borracha ao betume altera a reologia do betume, melhorando suas características e conseqüentemente o desempenho da mistura betuminosa quando aplicada em camadas de pavimentos (Kuennen, 2005).

A adição da borracha ao betume resulta num betume modificado com propriedades e características diferentes do betume que lhe deu origem. Esta interacção é influenciada por diversas variáveis. A reacção é influenciada pela temperatura, pelo tempo de digestão, quantidade e tipo de borracha empregues na mistura (Baker *et al.*, 2003).

O betume-borracha é introduzido em uma mistura betuminosa através de dois processos, o húmido e o seco. No processo húmido, o betume e a borracha são misturados a elevadas temperaturas durante um determinado período de tempo denominado tempo de digestão antes de ser adicionado aos agregados; enquanto que no processo seco, a borracha desempenha a

função de agregado e é adicionada antes da incorporação do ligante aos agregados (Kuennen, 2005).

#### **4.3.2. Incorporação da borracha em misturas betuminosas**

As tecnologias existentes para adicionar a borracha em misturas betuminosas são o processo seco e o processo húmido.

As principais diferenças entre os dois processos incluem o tamanho da partícula da borracha (no processo seco, a partícula pode ser mais grossa); a quantidade de borracha (o processo seco utiliza mais borracha); a função da borracha (no processo húmido a borracha actua com o betume enquanto que no seco com o agregado); e a facilidade de incorporação na mistura betuminosa (o processo seco não requer equipamento específico e o processo húmido necessita da instalação de tanques misturadores e bombas especiais) (Roberts *et al.*, 1989).

##### **Processo seco**

No processo seco a borracha é utilizada como agregado fino em misturas betuminosas. Neste processo a borracha (normalmente 1% a 3% por massa do agregado total na mistura) é incorporada na mistura antes do betume de ser introduzido e pode ser aplicada em misturas do tipo *gap graded* (descontínua densa), *dense graded* (contínua densa) e *open graded* (descontínua aberta) (Heitzman, 1992).

Em 1975, o Caltrans começou a realizar experiências em laboratório com betume-borracha aplicados em selagem de fendas e reparos obtendo resultados geralmente favoráveis. Em 1978, a primeira aplicação do Caltrans utilizando o processo seco em camada de pavimento foi realizado na estrada SR 50 em *Meyers Flat*, Estados Unidos (Caltrans, 2003<sub>A</sub>).

De acordo com o Caltrans (2003<sub>A</sub>), o processo seco é utilizado somente para produção de misturas betuminosas a quente, não sendo recomendadas para outros tipos de camadas como por exemplo tratamentos superficiais. Esta restrição ao processo seco é corroborada por outros autores como Heitzman (1992) e Epps (1994).

Quando a borracha de pneus é utilizada como uma parte do agregado na mistura betuminosa (processo seco), o produto resultante possui a denominação de *Rubber-Modified Asphalt Concrete* (RUMAC). O processo seco foi originalmente desenvolvido nos anos 60 na Suécia sendo comercializado neste país com nome comercial de *PlusRide* através da empresa *EnviroTire*, sendo uma tecnologia patenteada. Neste processo 1% a 3% de borracha é adicionada como agregado por massa da mistura total, com uma granulometria que varia entre 4,2 mm e 2,0 mm. O volume de vazios da mistura betuminosa é de 2% a 4% e com uma percentagem de betume de 7,5% a 9,0% (TFHRC, 2005, Baker *et al.*, 2003).

Uma tecnologia genérica do processo seco foi desenvolvida entre os anos 80 e 90 nos Estados Unidos para produzir misturas do tipo *dense graded*, que consiste em incorporar a borracha como agregado (grosso ou fino) na mistura, tendo em conta melhorar o processo através de uma pré-reacção e um pré-tratamento utilizando um catalisador. Neste sistema, a quantidade de borracha não excede 2% por massa de mistura total e foi aplicado em trechos experimentais em Estados norte-americanos como Florida, Nova Iorque e Oregon (Epps, 1994).

Em ambos os casos, processo seco (*dry process*) e processo húmido (*wet process*), a borracha de pneus é denominada como um agente modificador porque seu uso modifica as propriedades do produto resultante que é a mistura betuminosa (TFHRC, 2005). No entanto, esta afirmação não é compartilhada por outros autores.

Visser & Verhaeghe (2000), por exemplo, referem que no processo seco, o agregado é aquecido a temperaturas de aproximadamente 200 °C, quando a borracha é adicionada, e procede-se à mistura durante 15 segundos ou mais, até a formação de uma mistura homogénea entre o agregado e a borracha. Posteriormente o betume é adicionado através de processos convencionais de uma central betuminosa.

O termo betume-borracha quando utilizado no processo seco não é apropriado. Esta afirmação é corroborada por alguns autores (Visser & Verhaeghe, 2000; Takallou & Takallou, 2003) considerando a ocorrência ou não de reacções entre a borracha e o betume, uma vez que a borracha é primeiro incorporada ao agregado a elevadas temperaturas para posteriormente ser adicionado o betume.

Visser & Verhaeghe (2000) afirmam que no processo seco não ocorre a fusão do betume com a borracha incorporada. Takallou & Takallou (2003) asseguram que não ocorre uma reacção entre os materiais (betume e borracha), de modo que a borracha tem função de aditivo e não de um agente modificador.

A investigação conduzida por Hunt (2002) no *Oregon Department of Transportation* (Estados Unidos) com o processo seco (RUMAC e *Plus Ride*) resultou em um fraco desempenho, no qual, a mistura betuminosa, precocemente, apresentou degradações. Além disso, o custo foi de 50% a 100% superior ao da aplicação de uma mistura convencional.

Os resultados de investigações conduzidas no Estado de Illinois (Estados Unidos) revelaram que os trechos experimentais com misturas betuminosas utilizando o processo seco apresentaram desempenho inferior aos trechos onde foram aplicadas misturas betuminosas convencionais (Volle, 2000).

As eventuais reacções entre as partículas de borracha granulada e o betume convencional que ocorrem no processo seco dependem da granulometria da borracha utilizada. A utilização de um granulado de borracha com elevada superfície específica aumenta a área de contacto betume-borracha, favorecendo as reacções entre estes materiais durante pequenos intervalos de tempo e a temperaturas relativamente baixas quando comparadas àquelas utilizadas no processo húmido (Dantas Neto, 2004).

### **Processo húmido**

O processo húmido consiste na incorporação da borracha de pneus moída com o betume antes da mistura do betume com o agregado. O resultado é um betume modificado que tem propriedades significativamente diferentes do betume original. A mistura do betume com a borracha reage e forma um composto chamado betume-borracha (*asphalt rubber*), diferente do betume original, podendo ser incorporados aditivos para ajustar a viscosidade da mistura (Oda, 2000).

De acordo com a norma ASTM D 8 (1997), o betume-borracha no processo húmido é uma mistura de betume, borracha de pneus usados e de determinados aditivos na qual a borracha

representa pelo menos 15% da massa total da mistura que reagiu com o betume a uma temperatura suficientemente elevada para causar o inchamento das partículas de borracha.

As características físicas dos betumes-borracha são especificadas pela norma ASTM D 6114 (1997) em função da região aonde será aplicado a material.

No processo húmido como a borracha de pneus é previamente adicionada ao betume convencional, ela modifica-o permanentemente. Neste processo ocorre a transferência efectiva dos polímeros e dos componentes químicos dos pneus para o betume que se traduzem em maior elasticidade e resistência ao envelhecimento (Morilha & Greca, 2003).

De acordo com Hicks & Epps (2000), as propriedades dos betumes-borracha são substancialmente diferentes dos betumes convencionais, dependendo das características do betume convencional e da borracha utilizados, as quais devem ser previamente avaliadas.

A produção de betume-borracha no processo húmido envolve a avaliação dos componentes principais (betume, borracha, aditivos) tendo em conta determinar (Hicks & Epps, 2000):

- as propriedades da mistura (betume-borracha) para uma gama de tempo de digestão e de temperatura de fabrico;
- a estabilidade da mistura ao longo do tempo;
- as proporções dos componentes visando obter as propriedades desejadas do novo ligante.

A modificação do betume com a introdução de borracha de pneus ocorre quando se obtém um betume-borracha compatível. A compatibilidade do sistema constitui um arranjo estrutural das partículas de borracha formando cadeias dentro da matriz que é o betume. No entanto, para que ocorra uma mudança das características do betume, como aumento de elasticidade, aumento da coesão e outras propriedades desejáveis, a borracha necessita ser totalmente ou parcialmente digerida, sendo esta a base do processo (Holleran, 2000).

A digestão (completa ou parcial) da borracha também explica porque há uma mudança significativa com o tempo de digestão nas propriedades do betume-borracha. O sistema não é termo-dinamicamente estável, ou seja, o aumento da viscosidade durante o período de digestão é devido à continuação do processo de inchamento (Holleran, 2000).

Airey *et al.* (2003) investigaram a absorção das fracções leves do betume pelas partículas de borracha utilizando diferentes betumes convencionais. A absorção das fracções leves existentes nos betumes convencionais aumentou com a percentagem de borracha e com o tempo de digestão. No entanto, a absorção das fracções leves pelas partículas de borracha ocorre até um determinado ponto, e a partir daí, a borracha não absorve nenhuma quantidade de voláteis, o que equivale a um estado de saturação.

A introdução do granulado de borracha no betume quente faz com que a borracha reaja, e, ao mesmo tempo, absorva e fixe os maltenos que constituem uma das fracções voláteis e aromáticas do betume convencional. A fixação deste constituinte ao betume-borracha, permite obter um significativo aumento na resistência ao envelhecimento nas misturas betuminosas (Recipav, 2004).

Quando borracha é adicionada ao betume ocorre o inchamento do betume. Esta reacção é influenciada pelos seguintes factores: (i) temperatura da mistura; (ii) tempo de digestão; (iii) quantidade de borracha incorporada; (iv) tipo do misturador mecânico; (v) tamanho e textura da borracha; (vi) componente aromática do betume (os principais constituintes do betume são os asfaltenos, os compostos saturados e os aromáticos polares e nafténicos). A reacção envolve a absorção de óleos aromáticos do betume nas cadeias de polímeros que incluem os principais componentes estruturais da borracha (TFHRC, 2005).

O processo de reacção entre as partículas de borracha e o betume é dependente da temperatura. As temperaturas mais elevadas promovem uma reacção mais rápida e podem resultar em um maior inchamento da borracha no betume. As temperaturas típicas para produção de betume-borracha variam entre 160 °C a 205 °C. Em geral, os betumes-borracha mantêm suas propriedades físicas durante pelo menos 24 horas após a produção a temperaturas de até 175 °C. Com temperaturas mais elevadas pode ocorrer, dentro de três a seis horas, a despolimerização da borracha (Hicks & Epps, 2000).

Martins (2001) realizou ensaios termogravimétricos com borracha triturada de pneus usados e constatou que a partir de 230 °C se inicia um processo de degradação dos constituintes da borracha, sendo esta então a temperatura máxima de processamento deste material.

Page *et al.* (1992) acrescentam que o tempo de reacção pode ser reduzido quando se utiliza uma borracha muito fina, betumes menos viscosos e temperaturas altas durante a mistura. No entanto, temperaturas elevadas podem reduzir a qualidade do betume-borracha tendo em conta a possível perda de voláteis e envelhecimento acelerado do betume.

De acordo com Specht (2004), o inchamento da borracha é uma difusão (migração) e não uma reacção química porque não há ligações livres nas borrachas vulcanizadas para interacção química com a borracha. Após a imersão das partículas de borracha no betume, a sua superfície fica com alta concentração de líquidos. Posteriormente estes líquidos movem-se para o interior da partícula, sendo este movimento controlado pelos seguintes factores: (i) compatibilidade molecular entre a borracha e o betume; (ii) tempo de digestão; (iii) viscosidade do betume.

Os componentes betume e borracha devem ser misturados sob constante agitação para que a borracha seja completamente incorporada ao betume, à temperatura e tempo de digestão previamente determinados (Zaman *et al.*, 1995).

A intensidade da agitação entre o betume e a borracha durante o tempo de digestão pode influenciar as propriedades do betume-borracha. Essa intensidade pode variar entre baixa velocidade de agitação, em que lentamente mantém as partículas de borracha em suspensão, e elevada velocidade de agitação, a qual pode levar à quebra (mecânica) das partículas de borracha. Com baixa velocidade de agitação, os componentes do betume são simplesmente absorvidos com inchamento das partículas de borracha, ocorrendo pouca dispersão do polímero (borracha) no betume. No entanto, com elevada velocidade de agitação, as partículas de borracha incham e amolecem devido a absorção do betume, podendo ocorrer uma dispersão da borracha no betume (Hicks & Epps, 2000).

Diversos óleos extensores ou aditivos podem ser acrescentados ao betume-borracha para modificar as propriedades da mistura. Em geral, são utilizados óleos aromáticos ou óleos nafténicos. Estes materiais tendem a tornar o betume menos rígido a baixas temperaturas (Hicks & Epps, 2000).

De acordo com Holleran & Reed (2000), os asfaltenos e as fracções leves (maltenos, resinas) dos betumes convencionais interagem com as partículas de borracha formando uma película

de gel sobre estas partículas (Figura 4.4), provocando a fixação das fracções leves que deixam de ser influenciadas pelos agentes climáticos, evitando assim a sua evaporação com o tempo.

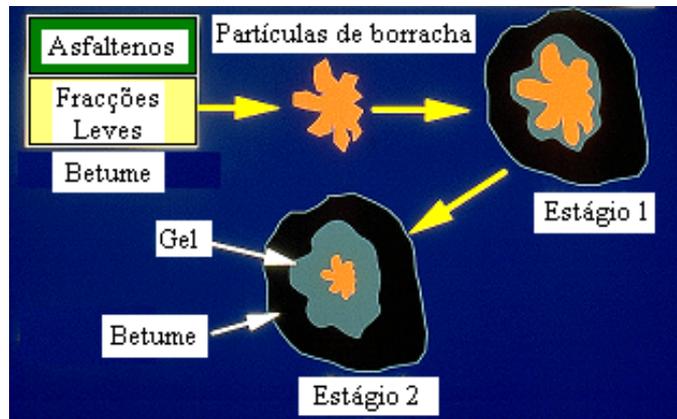


Figura 4.4 – Modelo hipotético de interação entre as partículas de borracha e o betume convencional (Holleran & Reed, 2000)

Takallou & Sainton (1992) concluíram que após um tempo de digestão muito prolongado, ocorre uma alteração na viscosidade do betume-borracha. Essa alteração, associada às altas temperaturas que material é aquecido, tende a se deteriorar, como apresentado na Figura 4.5.

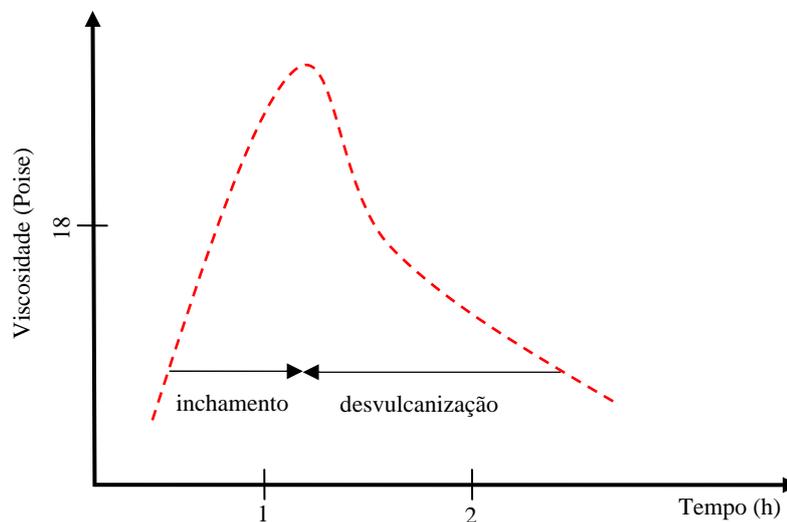


Figura 4.5 – Efeito do tempo de digestão na viscosidade do betume-borracha (adaptado de Takallou & Sainton 1992)

Abdeirahman (2006) descreveu esquematicamente o processo que ocorre com os grãos de borracha durante o fabrico do betume-borracha ao longo do tempo, apresentado na Figura 4.6.

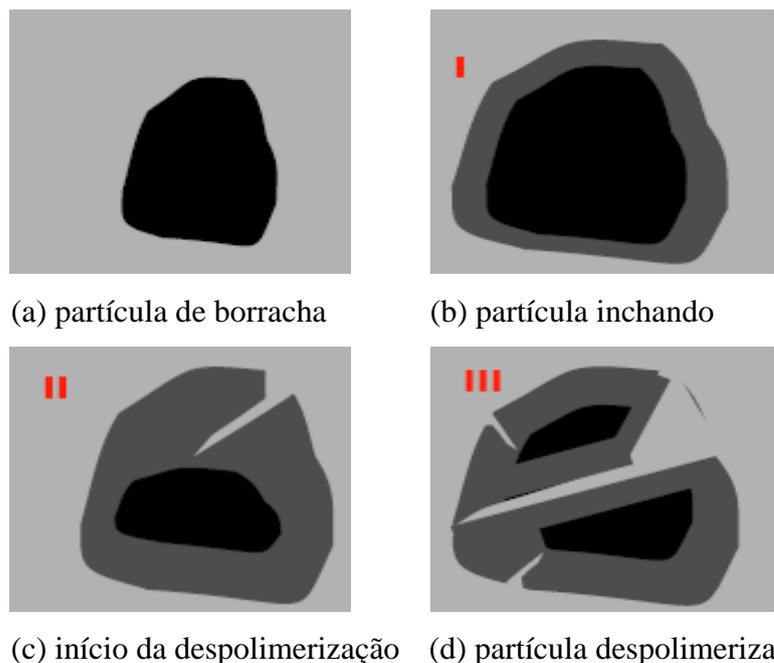


Figura 4.6 – Grão de borracha durante o fabrico do betume-borracha (Abdeirahman, 2006)

O processo da Figura 4.6 está representado graficamente na Figura 4.7 e é descrito de acordo em três fases: (i) fase I – inchamento da borracha durante o tempo de digestão e temperatura determinados, formando o betume-borracha; (ii) fase II – início da despolimerização e da redução da viscosidade; (iii) fase III – despolimerização com queda da viscosidade.

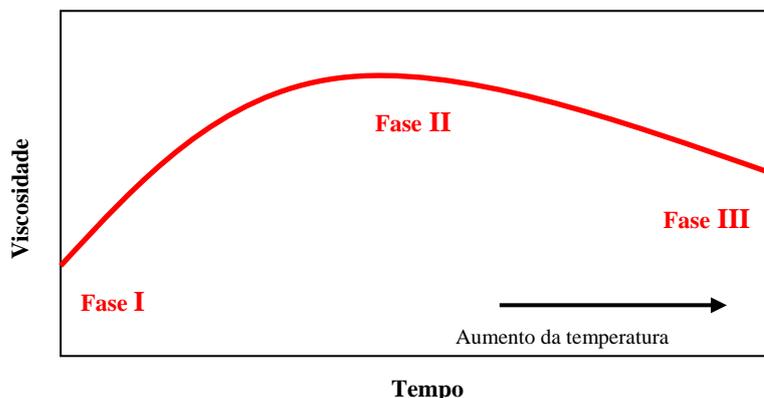
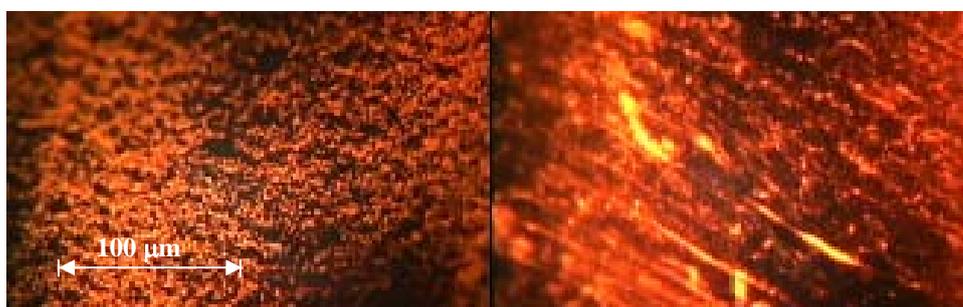


Figura 4.7 – Viscosidade do betume-borracha ao longo do tempo e do aumento da temperatura (adaptado de Abdeirahman, 2006)

A dispersão da borracha e a reacção entre o betume e a borracha são importantes factores na produção do betume-borracha, de modo que é essencial determinar a estrutura (morfologia) no produto final (betume-borracha) e suas propriedades. Um sistema compatível, em geral, apresenta um comportamento reológico e propriedades de estabilidade superiores em relação

a um sistema incompatível. A Figura 4.8 apresenta um exemplo de micrografia de sistemas: (a) compatíveis e (b) incompatíveis de betumes-borracha (Caltrans, 2003<sub>B</sub>).



(a) sistema compatível

(b) sistema incompatível

Figura 4.8 – Micrografia de betumes-borracha (Caltrans, 2003<sub>B</sub>)

As propriedades físicas do betume-borracha dependem das propriedades físicas e químicas dos materiais utilizados, da reacção entre estes materiais e das condições de interacção. Por esta razão, para obter-se as propriedades desejadas, devem ser identificados os materiais e condições de interacção apropriados (Hicks & Epps, 2000).

De acordo com estes autores, é fundamental a identificação dos seguintes elementos: (i) origem e classificação do betume convencional; (ii) origem e granulometria da borracha; (iii) percentagem de borracha; (iv) interacção da mistura considerando o tempo de digestão e a temperatura; (v) necessidade do uso de aditivos. Considerando que as características betume-borracha variam em função dos factores mencionados, é importante que as características da mistura sejam avaliadas para determinação de uma gama de tempos de digestão e de temperaturas.

As propriedades físicas dos betumes base influenciam as propriedades do betume-borracha. A rigidez, susceptibilidade térmica e características de envelhecimento do betume convencional influenciam o desempenho do betume-borracha tanto a elevadas quanto a baixas temperaturas. Betumes mais viscosos produzirão betumes-borracha com maior rigidez a elevadas temperaturas em comparação com aqueles produzidos com betumes menos rígidos. No entanto, betumes mais viscosos produzirão betumes-borracha mais rígidos a baixas temperaturas do que aqueles produzidos com betumes menos rígidos (Hicks & Epps, 2000; Baker *et al.*, 2003).

Outro factor importante está relacionado com as propriedades químicas do betume base que podem influenciar a reacção com a borracha. Betumes com poucos componentes (aromáticos) absorvidos pela borracha tendem a produzir betumes-borracha com baixas viscosidades e pouca modificação das propriedades (Hicks & Epps, 2000).

Hicks (2002) acrescenta que a compatibilidade entre o betume e a borracha é demonstrada através do aumento da viscosidade da mistura betume-borracha com o tempo de digestão.

Considerando que a borracha de pneus usados é uma mistura homogénea de polímeros e de borracha, resulta que a compatibilidade é principalmente mais dependente das propriedades do betume e menos dependente da composição da borracha. A composição química do betume varia dependendo da origem do petróleo bruto. Se o betume possui um nível baixo de aromáticos, desenvolvem-se problemas de compatibilidade porque há pouca quantidade de aromáticos que foram absorvidos pela borracha (Hicks 2002).

Hicks (2002) complementa que a classificação do betume (penetração ou viscosidade) é também importante, considerando que o comportamento do betume varia a elevadas e a baixas temperaturas. Um betume (convencional) menos viscoso terá melhores propriedades a baixas temperaturas. A borracha aumenta a viscosidade do betume a elevadas temperaturas. Os organismos rodoviários norte americanos usualmente especificam a utilização do betume convencional, para utilização em betumes-borracha, de acordo com o clima da região.

#### **4.3.3. Sistemas de obtenção do betume-borracha**

O processo húmido engloba dois sistemas de produção que são o *continuous blend* e *terminal blend*. A reacção pode ser feita em caminhões separados ou em tanques, no sistema *continuous blend*, ou em unidades industriais ou terminais (sistema *terminal blend*).

##### ***Continuous blend***

As primeiras aplicações do sistema *continuous blend* foram baseadas na tecnologia desenvolvida por Charles McDonald nos anos 60. No entanto, nos anos 80, na Flórida, foi desenvolvido o sistema *continuous blend* utilizando uma borracha com granulometria de

0,18 mm sendo denominado Flórida *continuous blend process*. A tecnologia de Flórida difere do processo de McDonald nos seguintes aspectos: (i) uso de percentagens inferiores de borracha (8% a 10%); (ii) borracha com partículas menores; (iii) menor temperatura; (iv) menor tempo de digestão (Epps, 1994). Baker *et al.* (2003) acrescenta que a diferença entre a tecnologia desenvolvida por McDonald e o processo *continuous blend* é o modo de mistura da borracha com o betume.

O betume-borracha do sistema *continuous blend* pode ser confeccionado na central betuminosa através da inclusão de equipamentos adicionais ou em camiões estacionários destinados para esta finalidade. A Figura 4.9 apresenta os passos para modificação do betume, no sistema *continuous blend*, em uma central betuminosa (Caltrans, 2003<sub>A</sub>).

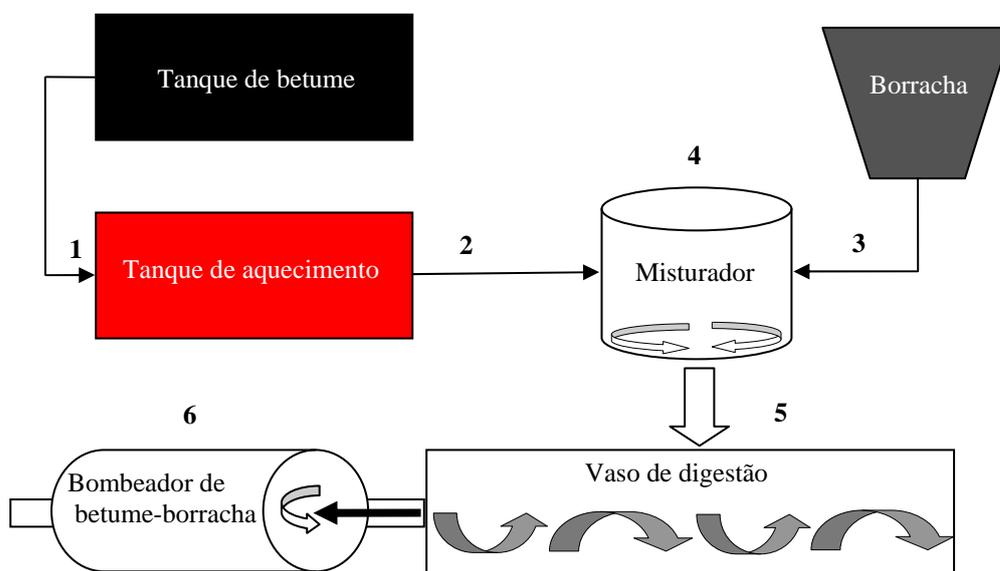


Figura 4.9 – Modificação do betume através do sistema *continuous blend* (adaptado de Caltrans, 2003<sub>A</sub>)

As fases para modificação do betume-borracha, de acordo com a Figura 4.9 são as seguintes:

- introdução do betume convencional no tanque de aquecimento até a temperatura desejada (1);
- inserção do betume convencional aquecido no misturador (2);
- introdução da borracha granulada no misturador (3);
- mistura do betume convencional com a borracha (4); agitação do betume misturado com a borracha durante o tempo de digestão previamente estabelecido (5). O vaso de digestão

pode ser substituído por um tanque dotado de uma palheta horizontal giratória para manter a agitação da mistura betume e borracha;

- bombeamento do betume-borracha à central para a produção da mistura betuminosa (6).

Os tanques utilizados para a produção de betume-borracha podem ser camiões de transporte ou tanques de armazenamento de betume portáteis, acoplados com dispositivos de aquecimento e tanque misturador.

No sistema *continuous blend*, a percentagem de borracha é em geral expressa pelas seguintes formas: (i) percentagem por massa do betume-borracha total; (ii) percentagem por massa de betume convencional. Como exemplo, 19,0% de borracha por massa do betume-borracha total corresponde a 23,5% por massa de betume convencional.

Roberts *et al.* (1989) recomendam como tempo máximo de armazenamento do betume-borracha (*continuous blend*), 16 horas após a sua produção. Kandhal (1992) indica que o betume-borracha não deve ser armazenado, mas utilizado em seguida após a sua produção.

### ***Terminal blend***

O *terminal blend* é o sistema que produz a digestão da borracha pelo betume a elevadas temperaturas em uma unidade industrial (terminal). Este processo tem sido utilizado desde 1989 no Estado do Texas (Estados Unidos), caracterizando-se por utilizar uma quantidade de borracha (inferior a 10%), menor àquela (15% a 22%) empregue no processo húmido sistema *continuous blend* (Takallou & Takallou, 2003).

De acordo com Baker *et al.* (2003), o sistema *terminal blend* representa um avanço de tecnologia através da possibilidade de incorporar menores quantidades de borracha ao betume do que o utilizado no tradicional sistema *continuous blend*. O sistema desenvolvido no Estado do Texas utiliza uma percentagem de borracha (em massa de betume-borracha) de 10% e com percentagem de betume óptima em misturas betuminosas entre 5,5% e 8,5%.

O betume-borracha produzido através do sistema *terminal blend*, da mesma forma que no sistema *continuous blend*, consiste na incorporação da borracha granulada de pneus em

equipamento apropriado. No entanto, a modificação física, reológica e química do betume convencional é realizada em central industrial (planta), através de um adequado processo de fusão por meio de agitação mecânica e digestão térmica devidamente controlada que resulta em um produto uniforme e estável (Morilha & Greca, 2003).

O Caltrans considera que no sistema *terminal blend* a percentagem de borracha de 10% não é suficiente para produzir uma modificação significativa nas propriedades do betume-borracha. No entanto, percentagens de 15% ou mais de borracha em misturas betuminosas tem apresentado bom desempenho (Caltrans, 2003<sub>A</sub>).

O conceito adoptado pelo Caltrans do sistema *terminal blend* é um processo húmido, no qual a borracha é adicionada ao betume a elevadas temperaturas, não requer constante agitação do betume-borracha, que é produzido em central industrial porque neste tipo sistema é possível manter as partículas de borracha uniformemente distribuídas no betume (Caltrans, 2005), com a vantagem de ser armazenado por longos períodos de tempo (TRHRC, 2005).

Takallou & Sinton (1992) afirmam que um dos problemas do uso do betume-borracha é a sua baixa estabilidade ao armazenamento. No entanto, actualmente, este não é uma dificuldade quando se utiliza o betume-borracha proveniente do sistema *terminal blend*.

O betume-borracha produzido no Brasil é através do sistema *terminal blend*. Na tecnologia brasileira, o betume-borracha possui estabilidade sem que ocorra a separação de fases durante o armazenamento, ou seja, as características deste betume permitem a sua utilização muito tempo após a sua produção. Entretanto, para a utilização do betume-borracha na central betuminosa, os tanques devem ser adaptados com agitadores (Morilha & Greca, 2003).

Considerando a elevada viscosidade dos betumes-borracha, superior à viscosidade dos betumes convencionais, o transporte do betume-borracha produzido no sistema *terminal blend* é realizado através de camiões -tanque dotados de equipamentos especiais para manter a estabilidade, como aquecedores, agitadores helicoidais e bomba de betume de alto desempenho (para bombeamento e mistura de líquidos altamente viscosos) com controlo de velocidade (Morilha & Greca, 2003).

Durante o transporte, a temperatura dos betumes-borracha mantém-se praticamente constante. Entretanto durante a sua descarga, normalmente ocorre uma perda importante de calor, sendo recomendável dispor de uma caldeira de aquecimento eficiente no armazenamento na obra para manter a temperatura necessária para a mistura. A caldeira de aquecimento da central deve obrigatoriamente ser de óleo térmico (Morilha & Greca, 2003).

Em função das peculiaridades do Brasil (clima e qualidade do betume produzido), foram desenvolvidos dois tipos de betume-borracha no sistema *terminal blend*, contendo 15% e 20% de borracha (em massa de betume-borracha). Os betumes do tipo *terminal blend* usados na Califórnia e na Florida são geralmente produzidas com menos de 10% de teor de borracha mais aditivos (Hicks, 2002).

O betume-borracha no sistema *terminal blend*, em função das suas características pode ser aplicado em diferentes técnicas e em misturas betuminosas com diferentes granulometrias (*open graded*, *gap graded* e *dense graded*). O betume-borracha *terminal blend* com 20% de borracha é recomendado na elaboração de misturas betuminosas descontínuas com qualquer teor de vazios (drenante ou densa) e também na execução de tratamentos superficiais. O betume com 15% de borracha é indicado para a fabricação de misturas betuminosas densas contínuas (Morilha & Greca, 2003).

Em resumo, o processo húmido abrange dois sistemas que são o *continuous blend* e o *terminal blend*. Através dos dois sistemas, o betume convencional é modificado com a introdução da borracha granulada de pneus. No sistema *continuous blend*, a modificação do betume é feita em tanques na própria central betuminosa ou camiões para este fim (ou em laboratório, no caso deste trabalho), através da variação da percentagem de borracha, do tempo de digestão a uma determinada temperatura. Neste sistema, o betume-borracha deve ser utilizado até quatro horas após a sua produção.

No sistema *terminal blend*, o betume-borracha é produzido em uma central industrial, cuja principal característica é a incorporação da borracha ao betume convencional através de potentes moinhos de corte, em tempo (em geral 6 horas) e temperatura controlados. Os betumes-borracha *terminal blend* possuem estabilidade durante a armazenagem, podendo ser transportados para a obra, sem perda das suas características, necessitando porém, a adaptação dos tanques.

#### 4.3.4. Características do betume-borracha

As propriedades dos betumes-borracha são identificadas, em geral, através dos mesmos ensaios utilizados para caracterizar os betumes convencionais. No entanto, propriedades não comuns em betumes convencionais como a recuperação elástica podem ser avaliadas nos betumes-borracha.

A adição de borracha ao betume aumenta intensamente a viscosidade do produto resultante, betume-borracha. Tendo em conta o ajuste da viscosidade, podem ser adicionados aditivos como querosene ou outros diluentes (TFHRC, 2005).

A consistência do betume-borracha a temperaturas típicas de fabrico (120 °C a 210 °C) pode ser controlada através de viscosímetros rotacionais, como exemplo o tipo Brookfield ou o tipo Haake portátil. Durante a execução deste ensaio é importante assegurar que o material esteja homogéneo devido à possibilidade de migração de partícula de borracha ao fundo e consequente redução da leitura da viscosidade. O valor da viscosidade em betumes-borracha pode variar de 100 a 20000 centipoise (cP) e é afectada principalmente pelos seguintes factores: (i) tipo de borracha; (ii) quantidade de borracha; (iii) tempo de digestão (Hicks & Epps, 2000).

Os betumes-borracha apresentam valores de viscosidade aparente (viscosímetro Brookfield) superiores aos encontrados nos betumes convencionais. Elevados valores de viscosidade são desejáveis e conduzem a um melhor desempenho à deformação permanente (Kaloush *et al.*, 2002). Além disto, os benefícios de uma elevada viscosidade do betume-borracha em misturas betuminosas são ainda: (i) redução da propagação de fendas; (ii) redução da desagregação; (iii) menor susceptibilidade térmica; (iv) maior durabilidade; (v) maior resistência aos raios Ultra-Violetas e Infra-Vermelhos, retardando o envelhecimento da mistura (TFHRC, 2005).

Além do aumento da viscosidade, os betumes-borracha possuem um ponto de amolecimento mais elevado do que os betumes convencionais. A modificação do betume com a borracha de pneu possui a característica de aumentar a elasticidade, proporcionando desta forma o fabrico de misturas betuminosas com maior resistência à deformação permanente e ao fendilhamento (TFHRC, 2005).

O ponto de amolecimento anel e bola (ASTM D 36, 1995) é uma propriedade que fornece uma indicação da rigidez relativa dos betumes, de modo que uma elevada temperatura deste ensaio indica um material mais resistente ao amolecimento a elevadas temperaturas. No caso de betume-borracha, os resultados são influenciados principalmente pelos seguintes factores: (i) consistência do betume convencional; (ii) tipo de borracha; (iii) percentagem de borracha; (iv) tempo de digestão (Hicks & Epps, 2000).

A consistência a temperaturas moderadas (25 °C) pode ser avaliada através do ensaio de penetração (ASTM D 5, 1997) ou através do cone de penetração<sup>1</sup> (ASTM D 5329, 1996). Em geral, para tamanhos granulares finos de borracha (inferiores a 0,9 mm) é indicado o uso do ensaio de penetração preconizado pela ASTM D 5, enquanto que para tamanhos de borracha grossos (superiores a 2,0 mm), o uso do cone é mais apropriado. A adição de borracha ao betume diminui o valor da penetração a 25 °C (Roberts *et al.*, 1989; Hicks & Epps, 2000).

As propriedades elásticas dos betumes-borracha podem ser avaliadas através do ensaio de resiliência (ASTM D 5329, 1996). O ensaio de resiliência indica a recuperação elástica do material, expressa em percentagem do material, a 25 °C. Os resultados observados para betumes convencionais variam entre 0% a 5%. Com a adição de borracha ao betume os valores da resiliência aumentam e variam entre 40% e 50% (Hicks & Epps, 2000).

Os valores dos módulos de rigidez das misturas contendo betume-borracha são, em geral, inferiores aos valores de misturas similares contendo betume convencional. Quanto mais elevada a temperatura, maior é a diferença entre o módulo de deformabilidade das misturas convencionais e das misturas com betume-borracha (Heitzman, 1992).

A utilização de betume-borracha reduz o fenómeno do envelhecimento do betume durante a produção da mistura betuminosa, considerando os seguintes aspectos (Morilha & Trichês, 2003):

- a espessura de película sobre o agregado em misturas com betume-borracha é superior àquela encontrada com betumes convencionais devido à sua elevada viscosidade, propiciando um envelhecimento menos acelerado durante a produção da mistura na central;

---

<sup>1</sup> ASTM D 5329, 1996. *Standard Test Methods for Sealants and Fillers, Hoy-Applied, for Joints and Cracks in Asphaltic and Portland Cement Concrete Pavements. Cone Penetration, Non-Immersed.*

- a recuperação elástica do betume após a simulação de envelhecimento no ensaio RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*), apontam uma melhoria desta característica ao invés de perda que ocorre com os demais ligantes convencionais e modificados por outros polímeros, devido à interacção entre as moléculas pela fusão propiciada pelo ensaio.

O betume-borracha melhora as características de adesividade do agregado ao betume em relação ao betume convencional devido a um aumento da espessura que recobre o agregado tendo em conta que possui uma viscosidade maior e também uma percentagem de betume mais elevada (RPA, 2006). O Quadro 4.3 apresenta uma comparação entre as espessuras médias de ligante que recobrem o agregado em função do tipo de mistura e tipo de agregado.

Quadro 4.3 – Espessura da película de betume (RPA, 2006)

Granulometria	Tipo de betume	Percentagem de betume (%)	Espessura do filme ( $\mu\text{m}$ )
<i>Dense graded</i>	Convencional	4,6	9
<i>Gap graded</i>	Com borracha	7,4	18
<i>Open graded</i>	Com borracha	9,2	36

Considerando o melhor desempenho dos betumes-borracha em relação aos betumes convencionais, a aplicação destes betumes modificados em misturas betuminosas é superior tendo em conta os seguintes aspectos: (i) crescente aumento das cargas transportadas, tanto em número de veículos quanto em peso; (ii) variações climáticas (principalmente em climas tropicais com elevadas temperaturas, como o Brasil); (iii) heterogeneidade dos betumes convencionais relativamente à sua procedência (Morilha & Greca, 2003).

De acordo com o Caltrans (2003<sub>A</sub>), somente a mistura arbitrária (sem controlo) de betume, borracha e óleos extensores, mesmo que dentro das especificações, não produzirá necessariamente um betume-borracha que possua as características físicas necessárias para atingir um bom desempenho. As propriedades do betume-borracha dependem directamente da compatibilidade e da composição dos componentes (betume, borracha e aditivos) e também da temperatura e do tempo de digestão.

O Quadro 4.4 apresenta um resumo das características do betume-borracha produzido no sistema húmido e a sua relação com o betume e a borracha, de acordo com o exposto anteriormente.

Quadro 4.4 – Resumo das características do betume-borracha

Característica	Ensaio	Factores influentes	Benefícios
Consistência	Viscosidade (ASTM D 2196)	Tipo de borracha;	Maior resistência à deformação permanente; Redução da propagação de fendas;
	Penetração (ASTM D 5)	Quantidade de borracha; Tempo de digestão.	Redução da desagregação; Melhor susceptibilidade térmica; Maior durabilidade.
Rigidez	Ponto de amolecimento (ASTM D 36)	Consistência do betume convencional; Tipo de borracha; Tempo de digestão.	Maior resistência à deformação permanente; Maior flexibilidade; Maior resistência ao fendilhamento.
Elasticidade	Resiliência (ASTM D 5329)	Tipo de borracha; Quantidade de borracha; Tempo de digestão.	Maior resistência à fadiga.

#### 4.4. MISTURAS BETUMINOSAS COM BETUME-BORRACHA

##### 4.4.1. Aplicação das misturas com betume-borracha em pavimentos

A aplicação de misturas com betume-borracha tem sido realizada, em geral, com sucesso em diversos países com diferentes condições de tráfego e climáticas.

As aplicações práticas de betumes modificados tiveram início em 1901 com o estabelecimento da *Société du Pavage en Asphalt Caoutchoute* em França. A primeira estrada construída com betume-borracha ocorreu em 1902, em Cannes. Este tipo de betume, produzido antes da Segunda Guerra Mundial, utilizava borracha natural, que era o material disponível na época (Zanzotto & Kennepohl, 1996).

O desenvolvimento dos materiais com betume-borracha prosseguiu e no final dos anos 30 eram aplicados como selagem de juntas, remendos e membranas nos Estados Unidos (Baker *et al.*, 2003).

A adição de borracha de pneus usados como material componente utilizada no fabrico de misturas betuminosas teve um grande impulso nos anos 40 quando a empresa *United States Rubber Reclaiming Company* de Vicksburg, Estado do Mississippi, comercializou partículas de borracha para utilização como agregado em misturas betuminosa (Baker *et al.*, 2003).

No início dos anos 50, Lewis e Welborn do *Bureau of Public Roads* (BPR) conduziram um extensivo estudo em laboratório para avaliar o efeito de diversos tipos de borrachas nas propriedades de betumes intitulado “*The Effects of Various Rubbers on the Properties of Petroleum Asphalts*” (Caltrans, 2003<sub>A</sub>).

Os resultados encontrados por Lewis e Welborn foram publicados em Outubro de 1954 edição da revista *Public Roads* juntamente com os resultados conduzidos por Rex e Pack, também do BPR, intitulado “*Laboratory Study of Rubber-Asphalt Paving Mixtures*” (Caltrans, 2003<sub>A</sub>). O interesse na área continuou a crescer e em Março de 1960, o *Asphalt Institute* em Chicago (USA) organizou o primeiro simpósio intitulado “*Symposium on Rubber in Asphalt*” que consistiu na apresentação e debate de cinco trabalhos de investigação.

Charles H. McDonald é considerado o pioneiro da incorporação da borracha nos betumes através do processo húmido, também denominado como processo McDonald. No início dos anos 60 nos Estados Unidos, Charles McDonald desenvolveu um trabalho experimental em conjunto com o *Arizona Department of Transportation* (ADOT) e com as empresas *Atlos Rubber* e *Sahuarro Petroleum and Asphalt Company* que resultou em um sistema betume-borracha utilizado em selagem de fendas (Hicks, 2002).

No início dos anos 70, a empresa *Arizona Refining Company* desenvolveu um sistema betume-borracha semelhante ao sistema de Charles McDonald. Estes dois primeiros sistemas representam a base dos produtos actualmente utilizados (Hicks, 2002).

Charles McDonald introduziu a técnica de selagem de fendas na década de 60, identificando-a como *band-aid*. A técnica consistia na aplicação do betume-borracha em pequenas áreas fendilhadas. A primeira aplicação em áreas maiores, camadas de impermeabilização, ocorreu em 1967 e não foi bem sucedida devido a elevada viscosidade do betume-borracha e a dificuldade do equipamento espalhador bombear o produto. O problema foi solucionado através da utilização de menores teores de borracha, da introdução de diluentes ao

betume-borracha e da modificação do equipamento com bombas de maior pressão (Hicks & Epps, 2001).

Em camadas de pavimentos, o betume-borracha através do processo húmido pode ser aplicado nas técnicas de pavimentação como camadas de impermeabilização (*chip seals*), SAM (*Stress-Absorving Membrane*), SAMI (*Stress-Absorving Membrane Interlayer*) e principalmente em misturas betuminosas.

O ADOT implantou a primeira SAMI em 1972 como parte de um projecto para retardar a propagação de fendas. Posteriormente, foram colocadas diversas SAMI na metade dos anos 80, sendo utilizada até hoje (Hicks & Epps, 2001).

As aplicações em camadas anti-propagação de fendas com betume-borracha tornaram-se conhecidas como SAM (Hicks & Epps, 2001). A técnica utilizada na SAM consiste em distribuir uma camada de betume-borracha (com cerca de 20% de borracha) sobre a superfície do pavimento existente, seguida de uma camada de agregados uniforme, espalhados sobre o betume-borracha.

As principais vantagens do uso de betume-borracha em SAM residem na redução da susceptibilidade térmica e maior elasticidade, que resultam em maior resistência aos esforços instalados nas misturas, particularmente aquelas que resultariam em fendas por propagação e variações climáticas (Heiztman, 1992).

A camada SAMI foi desenvolvida a partir da SAM. SAMI consiste em uma camada de betume-borracha aplicada entre a camada existente (desgaste) e a de reforço durante a reabilitação do pavimento para retardar a propagação de fendas e reduzir a penetração de água em camadas subjacentes (Hicks *et al.*, 1995).

Desde a década de 60 a utilização de betume-borracha em pavimentos é realizada nos organismos rodoviários dos Estados Unidos. Principalmente a partir da década de 80 o uso destas misturas tem aumentado significativamente (Hicks & Epps, 2001).

A partir da metade dos anos 70 e início dos anos 80 o ADOT desenvolveu programas com aplicação de betume-borracha. Este intenso programa de pesquisas indicou que as

propriedades de misturas betuminosas com betume-borracha variam em função de diversas variáveis como por exemplo o tipo, a granulometria e quantidade de borracha; o tipo de betume utilizado; a temperatura e o tempo de digestão (Hicks, 2002).

#### 4.4.2. Formulação das misturas com betume-borracha

A utilização de misturas betuminosas com betume-borracha em camadas do pavimento requer, da mesma forma, a escolha do betume-borracha e a selecção dos agregados tendo em conta o propósito da aplicação. Apesar de que a formulação de tipo misturas betuminosas com betume-borracha ainda seja realizado com os métodos tradicionais como o Hveem, principalmente no Caltrans, e a metodologia Marshall, os procedimentos adoptados para misturas com betume-borracha são diferentes no que se refere a temperaturas de produção e compactação e percentagens de betume (Hicks, 2002).

Os betumes-borracha, devido à elevada percentagem de borracha incorporada ao betume, possuem propriedades elásticas que devem ser consideradas na formulação das misturas. Por esta razão, devem ser feitas modificações nos procedimentos de formulação nos métodos Marshall e Hveem, considerando as diferentes propriedades dos betumes-borracha (RPA, 2000).

As misturas com betume-borracha apresentam percentagens de betume superiores às misturas com betumes convencionais tendo em conta a película mais espessa devido à viscosidade mais elevada dos betumes-borracha em relação aos betumes convencionais (Heiztman, 1992; Roberts *et al.*, 1989); Caltrans<sub>A</sub>, 2003).

Way (2003) utilizou a Equação 4.1 para formulação de misturas betume-borracha no Arizona para determinar a percentagem óptima de betume. A Equação 4.1 é utilizada também pelo ADOT para correcção da percentagem óptima de betume em misturas betume-borracha após a formulação através da metodologia Marshall.

$$\text{Percentagem óptima} = ((0,38 \times w) + 8,6) \times \left[ \frac{2,620}{C} \right] \quad (4.1)$$

onde:

w = absorção de água dos agregados (%);

C = massa volúmica dos agregados (valores entre 2,35 e 2,85).

O método SUPERPAVE representa uma tecnologia para formulação de misturas betuminosas em laboratório e utiliza o compactador giratório SUPERPAVE (*Superpave Gyratory Compactor* – SGC). O procedimento utilizado para misturas betuminosas com betume-borracha é o mesmo para as misturas convencionais (RPA, 2000).

O método SUPERPAVE para formulação de misturas betuminosas tem em conta factores como o tráfego e as condições climáticas. Os principais aspectos que diferenciam a formulação SUPERPAVE das outras metodologias são: (i) selecção dos agregados através de determinados requerimentos (propriedades de consenso); (ii) selecção do betume a partir da condição climática local; (iii) utilização do SGC para simular a compactação da mistura na estrada; (iv) consideração das condições climáticas e tráfego (WSDOT, 2006).

O método SUPERPAVE é utilizado por diversos organismos rodoviários norte-americanos. No entanto, da mesma forma que os métodos de formulação Hveem e Marshall, utilizados para misturas convencionais, é necessário desenvolver um procedimento para formulação de misturas com betume-borracha (RPA, 2000).

As misturas betuminosas fabricadas com betume-borracha requerem normalmente maiores percentagens de betume do que as misturas com betumes convencionais, tendo em conta os seguintes aspectos: (i) o betume-borracha é significativamente mais viscoso que os betumes convencionais, formando um filme mais espesso na superfície do agregado; (ii) as partículas de borracha que, caso não tenham reagido com o betume, actuarão como sólidos, aumentando o volume de betume, mas não necessariamente as suas características de adesividade (Specht, 2004).

De acordo com Epps (1994), pode-se considerar que se for adicionado 20% de borracha ao betume, a percentagem de betume óptima aumentará 20% em relação à mistura sem borracha. A percentagem de betume é o resultado da formulação das misturas (métodos Hveen ou Marshall) e varia de acordo com o tipo de agregado e granulometria (Caltrans, 2003<sub>A</sub>).

Roberts *et al.* (1989) relacionaram em sua investigação, dois trabalhos que relatam a aplicação da formulação Marshall para misturas betuminosas com betume-borracha, apresentados a seguir:

- Takallou *et al.* (1986) ensaiaram provetes Marshall com betume-borracha e utilizaram provetes de uma mistura convencional para controlo, em misturas aplicadas em camadas de pavimento. Os resultados mostraram que não houve relação entre o desempenho das misturas betuminosas com betume-borracha no pavimento e os parâmetros Marshall de estabilidade e deformação. A estabilidade Marshall nos provetes com betume-borracha apresentou valores entre 29% a 61% inferiores à estabilidade de controlo. A deformação foi 1,9 a 4,2 vezes maior nas misturas com betume-borracha;
- o mesmo facto foi observado na investigação conduzida por Piggott & Woodhans (1979);
- no entanto, ambos os investigadores, Takallou *et al.* (1986) e Piggott & Woodhans (1979), observaram um excelente desempenho das misturas com betume-borracha no pavimento, indicando que estas misturas não apresentam as expectativas com base nos parâmetros Marshall.

Harvey *et al.* (2000) referem a dificuldade do Caltrans em desenvolver um critério para prevenir a formação de rodeiras, tendo em conta que nas misturas *gap graded* com betume-borracha o critério de formulação Hveem não se aplica da mesma maneira para as misturas densas convencionais, apesar do sucesso da aplicação das misturas *gap graded* com betume-borracha.

No Estado da Louisiana foi realizada uma investigação comparando misturas betuminosas com betume-borracha na estrada e em laboratório. Para cada um dos 8 trechos avaliados foi construído um trecho em mistura convencional para controlo. A metodologia Marshall foi utilizada para determinar a percentagem óptima de betume. Apesar dos trechos com misturas betume-borracha terem apresentado melhor desempenho quando comparados a misturas convencionais, os resultados dos parâmetros Marshall (estabilidade e deformação) foram os seguintes (Huang *et al.*, 2002):

- os trechos com misturas betume-borracha com granulometria *gap graded* apresentaram menor estabilidade quando comparados aos trechos com misturas betume-borracha com granulometria *dense graded*;

- os trechos com misturas betume-borracha com granulometria *gap graded* apresentaram deformações superiores que as misturas de controlo;
- as misturas com betume-borracha com granulometria *gap graded* apresentaram deformações semelhantes às misturas betume-borracha com granulometria *dense graded*.

Madapati *et al.* (1996) utilizaram as metodologias Marshall e SUPERPAVE para determinar a percentagem de betume em misturas betuminosas com betume-borracha em Rode Island (Estados Unidos). As percentagens de betume para 4 agregados testados foram de 1% a 2 % maiores para as misturas com borracha em relação às misturas de referência (convencional). Comparativamente, a metodologia Marshall apresentou para todos os casos, percentagens de betume 0,1% a 0,5% superiores ao da metodologia SUPERPAVE.

Variações dos métodos de formulação Hveem e Marshall têm sido utilizados em misturas betuminosas betume-borracha. Em geral, em misturas com betume-borracha, são encontrados valores inferiores de estabilidade Hveem e Marshall e valores superiores de VMA (Vazios no Agregado Mineral) e volume de vazios em relação às misturas convencionais. A temperatura de compactação é superior nas misturas com betume-borracha. A granulometria e a porosidade dependem da quantidade de borracha incorporada ao betume. No entanto, baixas percentagens de borracha não representam uma grande diferença nos parâmetros de estabilidade para ambos os métodos (TFHRC, 2005).

Desta forma, os métodos de formulação de misturas betuminosas convencionais, amplamente utilizados, poderiam ser adaptados para as misturas com betume-borracha. No entanto, deve-se ter em conta as diferentes propriedades destas misturas na determinação da percentagem óptima de betume. Em comparação com misturas convencionais, devem ser considerados os factores:

- os valores de deformação apresentam-se mais elevados para misturas betume-borracha;
- a estabilidade apresenta valores inferiores para misturas betume-borracha;
- o VMA apresenta valores superiores devido ao maior espaço requerido pela borracha;
- as percentagens óptimas são superiores para misturas com betume-borracha.

Outra maneira de determinar a formulação das misturas betuminosas é através dos métodos relacionados com o seu comportamento, estudados por Luminari & Fidato (1998).

A formulação de misturas betuminosas relacionada com o seu comportamento visa a obtenção, através de ensaios mecânicos, da composição que garante determinado nível de comportamento desejado para uma mistura betuminosa. Como exemplo, se o comportamento que se espera de uma mistura betuminosa é uma boa resistência à fadiga, procura-se obter, através dos resultados dos ensaios, uma composição que garanta que as exigências relativas a esse comportamento da mistura betuminosa sejam alcançadas.

Nos métodos de formulação relacionados com o comportamento das misturas betuminosas produzem-se inicialmente as misturas betuminosas através dos métodos Marshall, Hveem ou SUPERPAVE, por exemplo. Em seguida, as misturas são ensaiadas através de ensaios fundamentais ou de simulação, que avaliam certas propriedades relacionadas com o comportamento da mistura betuminosa no pavimento. A partir dos resultados destes ensaios, será encontrada a composição óptima da mistura betuminosa, ou seja, aquela que garante que todas as propriedades de comportamento avaliadas serão superiores a um mínimo desejado ou especificado (Luminari & Fidato, 1998; Silva, 2005).

As vantagens destes métodos são as seguintes (Luminari & Fidato, 1998; Silva, 2005):

- permitem comparar as misturas explicitamente;
- podem simular o estado de tensão e deformação existente no pavimento;
- boa correlação entre os resultados medidos em laboratório e posteriormente, *in situ*;
- estimulam a inovação e o uso de novos materiais.

As desvantagens dos métodos relacionados com o comportamento das misturas são:

- a análise crítica e a validação dos resultados estão limitadas à reduzida experiência na sua aplicação;
- os custos e o tempo necessário para a realização dos ensaios são elevados;
- ensaios realizados em poucos laboratórios;
- utilização em um número reduzido de pavimentos.

Sousa *et al.* (2000) estudaram a resistência à fadiga de misturas betuminosas com granulometria *dense graded* produzidas com betume-borracha com a incorporação de 18% de borracha granulada, utilizando o betume de penetração 35/50 e borracha granulada obtida pelo processo de moagem a temperatura ambiente (diâmetro nominal de 1,15 mm). As misturas

produzidas com betume-borracha e com betume convencional apresentaram percentagem óptima de betume de 8% e 5% e volume de vazios de 11% e 4%, respectivamente.

Bennert *et al.* (2004) realizaram ensaios em misturas com betume-borracha e determinaram a percentagem óptima de betume através da formulação Marshall para avaliar o desempenho através de ensaios de fadiga e deformação permanente. Posteriormente acrescentaram 1% a mais de betume às misturas e avaliaram novamente o desempenho através dos mesmos ensaios. A vida à fadiga destas misturas foi superior, sem prejuízo da resistência à deformação permanente.

#### 4.4.3. Granulometria das misturas com betume-borracha

As misturas com betume-borracha, são, em geral, aplicadas em diferentes granulometrias, *dense graded*, *open graded* e *gap graded*. As diferenças entre a composição das misturas são baseadas no tamanho dos agregados, percentagem de betume e volume de vazios (Roberts *et al.*, 1989; Baker *et al.*, 2003; Caltrans, 2003<sub>B</sub>).

Os Estados norte-americanos que mais utilizam misturas betuminosas com betume-borracha são os seguintes: (i) Arizona; (ii) Califórnia; (iii) Texas; (iv) Florida (Hicks & Epps, 2001). O Caltrans e o ADOT utilizam principalmente as granulometrias do tipo *open graded* e *gap graded* para misturas betuminosas com betume-borracha. O Texas DOT (*Texas Department of Transportation*) tem utilizado a granulometria *gap graded* com agregados grossos e elevada percentagem de betume. O Florida DOT (*Florida Department of Transportation*) tem aplicado misturas betuminosas com as granulometrias *dense graded* e *open graded*. No entanto, o betume-borracha produzido no Florida DOT é feito com uma borracha fina e uma percentagem de 6% a 12% por massa de betume-borracha, diferente do especificado pela ASTM D 6114 (1997) (Baker *et al.*, 2003).

O Estado do Arizona têm aplicado misturas betume-borracha desde os anos 60, principalmente para redução da propagação de fendas. As misturas mais utilizadas são do tipo *open graded* e *gap graded* em espessuras de 12,7 a 25,4 mm e 25,4 a 50,8 mm, respectivamente. As misturas *open graded* possuem, em geral, 9% a 10% de betume,

enquanto que as misturas *gap graded* tem a percentagem óptima de betume entre 7,5% a 8,5% (Way, 1998).

A Figura 4.10 apresenta exemplos genéricos das curvas granulométricas do tipo *gap graded*, *dense graded* e *open graded*, utilizadas em misturas com betume-borracha.

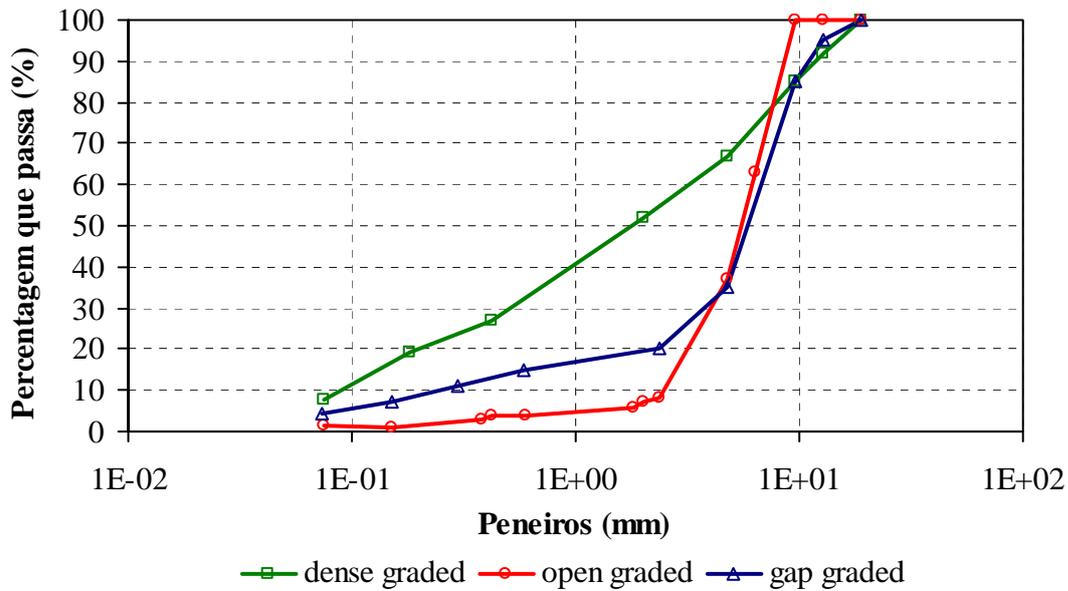


Figura 4.10 – Exemplos de curvas granulométricas utilizadas em misturas betuminosas com betume-borracha

A Figura 4.11 ilustra, em geral, a diferença da estrutura granulométrica (genérica) das misturas *dense graded*, *gap graded*, e *open graded*.

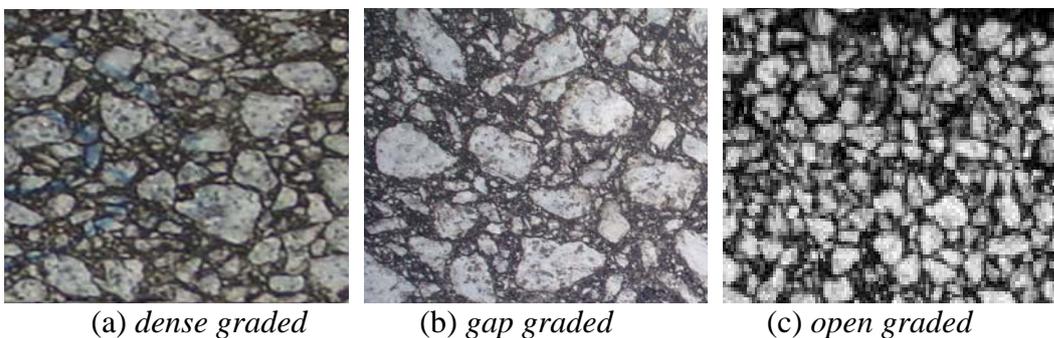


Figura 4.11 – Estrutura granulométrica das misturas betume-borracha

A mistura *dense graded* (densa contínua) apresenta uma granulometria contínua para todas as frações de agregados e é em geral utilizada em misturas com betumes convencionais (Hicks, 2002).

As misturas *dense graded* possuem um baixo volume de vazios, possuem uma considerável resistência à abrasão provocada pelo tráfego e fornecem impermeabilidade à camada. Historicamente, as misturas *dense graded* têm sido as mais utilizadas em reabilitação de pavimentos como camada de desgaste, tanto sobre pavimentos flexíveis como em pavimentos de betão (Caltrans, 2003<sub>B</sub>).

As misturas *dense graded* com betumes convencionais são largamente utilizadas na reabilitação de pavimentos flexíveis. No entanto, a superfície da camada antiga não deve possuir um grau de degradações muito elevado. Estas misturas apresentam uma pequena melhoria estrutural mas uma melhoria significativa em termos de qualidade funcional. Essas misturas são aplicadas para o melhoramento das seguintes degradações existentes nos pavimentos (Caltrans, 2003<sub>B</sub>): (i) oxidação; (ii) fendilhamento (pequeno grau); (iii) irregularidades (pequeno grau); (iv) problemas de deslizamento.

Quando as misturas convencionais *dense graded* são aplicadas em conjunto com camadas SAMI, tendem a melhorar a resistência à propagação de fendas. O Caltrans não aplica o betume-borracha nestas misturas (Caltrans, 2003<sub>A</sub>).

A granulometria tipo *open graded* é aplicada com o objectivo de promover a drenagem de águas da chuva e consiste principalmente em 2 ou 3 tamanhos nominais com poucos agregados finos (entre 0 e 4% que passam no peneiro nº 200). Este tipo de granulometria resulta em misturas betuminosas com boa textura superficial e redução de riscos de hidroplanagem (Hicks, 2002; Caltrans, 2003<sub>A</sub>).

As misturas *open graded*, também referenciadas como *Open Graded Friction Course* (OGFC) são utilizadas como camadas de desgaste e possuem um elevado volume de vazios (15% a 25%) quando comparadas com misturas convencionais. Este elevado volume de vazios resulta em uma elevada permeabilidade, reduzindo os efeitos de projecção de água, permitindo o escoamento rápido das águas sobre a via e reduzindo os riscos de hidroplanagem. Outros

benefícios são a redução do ruído e o aumento das características de aderência da camada de desgaste (Caltrans, 2003<sub>B</sub>).

A utilização de betume-borracha em misturas *open graded* tem como objectivo aumentar a durabilidade destas misturas relativamente aos efeitos do clima com o acréscimo do filme de betume que recobre os agregados, reduzindo os efeitos da água e de oxidação (Caltrans, 2006).

As misturas *open graded* são aplicadas em trabalhos de pavimentação tanto em pavimentos novos como manutenção e reabilitação. Em geral são utilizadas como camadas de “sacrifício” sobre camadas betuminosas com misturas *dense graded* em áreas com elevado volume de tráfego e com índices de chuva de moderados a elevados (Caltrans, 2006).

No tipo *gap graded*, a curva granulométrica não apresenta uma granulometria contínua para todos os tamanhos de agregados, normalmente faltando uma ou duas fracções de agregados finos. A granulometria *gap graded* é usada para promover o contacto de grão-a-grão na mistura betuminosa, promovendo estabilidade, flexibilidade e durabilidade (Hicks, 2002; Jorgenson, 2002; Caltrans, 2003<sub>A</sub>).

No Estado da Califórnia (Estados Unidos) a mistura *gap graded* é utilizada em misturas betuminosas com betume-borracha para acondicionar este tipo de betume, considerando a falta de determinadas fracções de agregados (*gap*), com este espaço ocupado pelo betume-borracha. Além de melhorar o desempenho à deformação permanente devido ao contacto grão-a-grão, este tipo de mistura também possui elevada vida à fadiga e resistência a propagação de fendas, considerando a elevada percentagem de betume (7% a 9%). Tendo em conta que a borracha aumenta a viscosidade do betume é possível uma elevada percentagem de betume sem produzir a exsudação ou escorrimento do ligante. A mistura *gap graded* com betume-borracha também possui um valor de VAM (Vazios no Agregado Mineral) superior ao das outras misturas (Caltrans, 2003<sub>B</sub>).

No início dos anos 80, o ADOT começou a utilizar misturas *gap graded* com betume-borracha em camadas de desgaste de pavimentos. A granulometria *gap graded* permite a presença de espaço para as partículas de borracha. Posteriormente o Caltrans desenvolveu uma especificação para a mistura *gap graded* denominada *Asphalt Rubber Hot*

*Mix Gap Graded Specification*. A mistura desenvolvida pelo Caltrans permite o dimensionamento com redução da espessura da camada de desgaste em até 50% da espessura comparativamente a uma mistura convencional, o que tem sido confirmado em mais de 750 projectos (Jorgenson, 2002).

As misturas *gap graded* são aplicadas para minimizar o aparecimento das seguintes degradações: (i) fendilhamento; (ii) oxidação; (iii) propagação de fendas; (iv) irregularidades (pequeno grau); (v) cabeça de gato; (vi) peladas; (vii) desagregação superficial. Embora as misturas *gap graded* não possuam uma granulometria que permite a livre drenagem como as misturas *open graded*, são evidenciadas melhorias nas qualidades funcionais como redução do deslizamento e hidroplanagem, além da redução do nível de ruído (Caltrans, 2003<sub>B</sub>).

As principais degradações evidenciadas nas camadas de desgaste onde foram aplicadas misturas tipo *gap graded* com betume-borracha são as seguintes: (i) deformação permanente (casos de tráfego elevado); (ii) roturas por corte em áreas de tensões elevadas; (iii) propagação de fendas em áreas com camada de desgaste antiga fendilhada; (iv) fadiga; (v) degradações devidas a problemas de compactação; (vi) desagregação pela incompatibilidade da mistura betume-borracha (Caltrans, 2003<sub>B</sub>).

#### **4.4.4. Comportamento mecânico das misturas com betume-borracha em laboratório**

A avaliação das características mecânicas através dos ensaios de fadiga, deformação permanente das misturas betuminosas com betume-borracha em laboratório, pode ser realizada da mesma maneira que para as misturas convencionais. O módulo dinâmico é também determinado para se avaliar as propriedades da rigidez da mistura. Os resultados destes ensaios podem conduzir à reavaliação das características desejáveis das misturas. Por esta razão, é possível por exemplo, modificar a percentagem óptima ou o teor de vazios.

Sousa *et al.* (1999) realizaram uma investigação, em laboratório, visando a caracterização de misturas betuminosas com betume convencional e betume-borracha com 20% de borracha para aplicação em camada de reabilitação nas estradas nacionais portuguesas EN 104 e EN 105. Foram realizados ensaios de fadiga em flexão alternada em 4 pontos, módulo dinâmico e dois tipos de ensaios para caracterizar a deformação permanente.

Os ensaios de fadiga e módulo foram realizados a partir de provetes com e sem envelhecimento (envelhecimento simulado em estufa a 85 °C durante 5 dias). A resistência à fadiga das misturas com borracha chegou a ser, para certas condições, 10 vezes superior, quando comparada à convencional, como mostra a Figura 4.12.

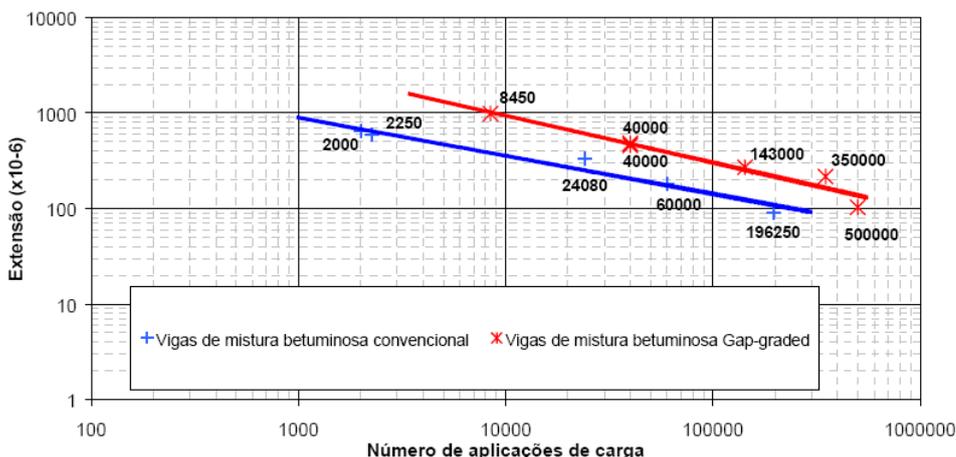


Figura 4.12 – Curvas de fadiga obtidas para as misturas estudadas por Sousa *et al.* (1999)

Os resultados dos ensaios à fadiga realizados em amostras submetidas a envelhecimento apresentam uma diferença bastante significativa, sendo as de betume-borracha pouco sensíveis a acção de envelhecimento. Relativamente aos ensaios de rigidez, observaram-se valores maiores para a mistura convencional, sendo que a mistura convencional se mostrou também mais sensível ao envelhecimento, como apresenta a Figura 4.13.

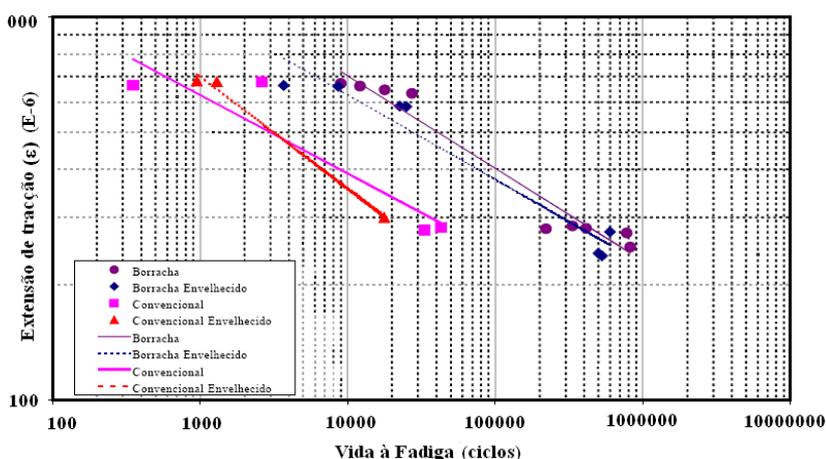


Figura 4.13 – Comparação do desempenho à fadiga (Sousa *et al.*, 1999)

Os resultados de deformação permanente realizados por Sousa *et al.* (1999) apresentaram uma inconsistência entre os ensaios com o simulador *Wheel Tracking* e o de corte simples à altura

constante (RSST-CH – *Repeated Simple Shear Test at Constant Height*). Os ensaios realizados com o simulador de tráfego indicaram como melhores as misturas convencionais (designadas por CLTP) em relação às misturas com betume-borracha (designadas por RLTP), apesar de ambas estarem dentro das especificações espanholas (medição entre 105/120 minutos, com taxa de deformação de  $15 \times 10^{-3}$  mm/min), como mostra a Figura 4.14.

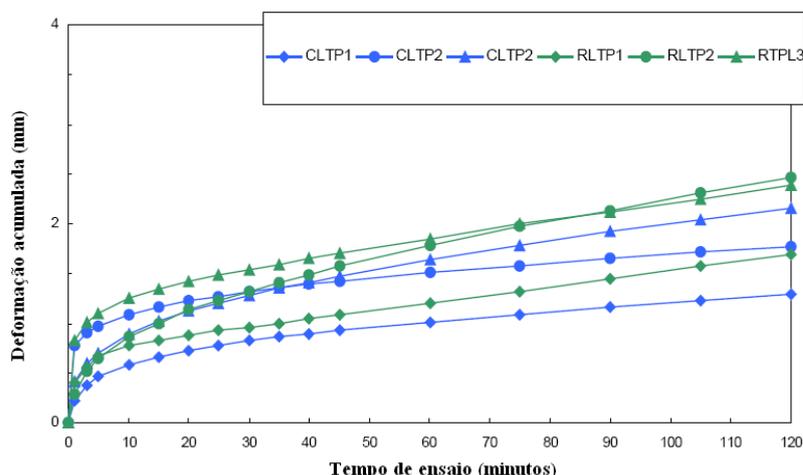


Figura 4.14 – Evolução da deformação com *Wheel Tracking* (Sousa *et al.*, 1999)

A Figura 4.15 ilustra os resultados do ensaio RSST-CH, no qual o valor médio dos ensaios, indicou que a mistura betuminosa com betume convencional (CUMC) apresentou uma vida à deformação permanente de  $1,1 \times 10^6$  eixo padrão de 80 kN, enquanto que a mistura betuminosa com betume-borracha (RUMC) obteve uma vida à deformação permanente de  $2,4 \times 10^6$  eixo padrão de 80 kN, ambas para rodeiras de 12,5 mm (Sousa *et al.*, 1999).

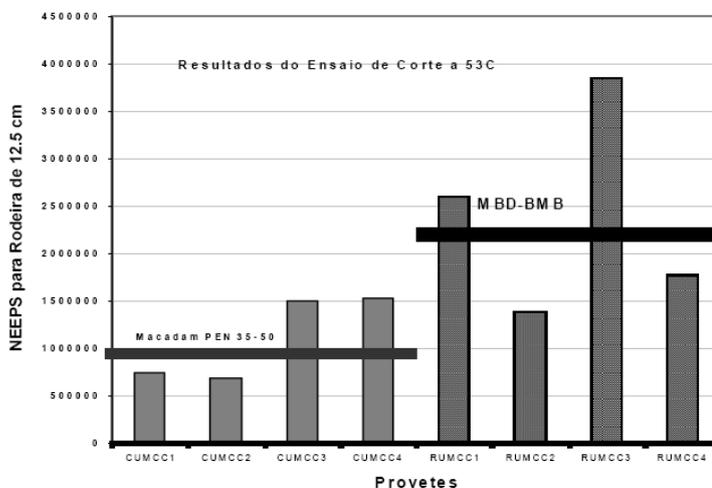


Figura 4.15 – Comparação da resistência ao corte da mistura convencional e com betume-borracha (Sousa *et al.*, 1999)

Na investigação conduzida por Mohammad *et al.* (2000), foi avaliada a resistência às deformações permanentes de misturas betuminosas produzidas com betume-borracha através de ensaios *creep* estático e avaliação de secções experimentais submetidas ao simulador de tráfego do Estado da Louisiana (Estados Unidos) ALF (*Accelerated Loading Facility*). As misturas ensaiadas, produzidas com betume-borracha e betume convencional apresentavam as mesmas propriedades volumétricas, como percentagem de volume de vazios, e mesma percentagem de betume.

Os ensaios de *creep*, realizados por Mohammad *et al.* (2000), em provetes sob compressão diametral, indicaram um aumento da resistência às deformações permanentes da mistura com betume-borracha em relação à mistura produzida com o betume convencional. Estes resultados laboratoriais foram comprovados com a medição de rodeiras nos trechos submetidos à actuação do simulador de tráfego ALF.

Além destes procedimentos, Mohammad *et al.* (2000) utilizaram o ensaio RSST-CH para a avaliação da resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas. Os resultados dos ensaios RSST-CH mostraram que a mistura betuminosa com betume-borracha (T8 WC) aplicada na camada de desgaste apresentou um desempenho inferior àquela produzida com o betume convencional (T8 WC-CRM), como mostra a Figura 4.16.

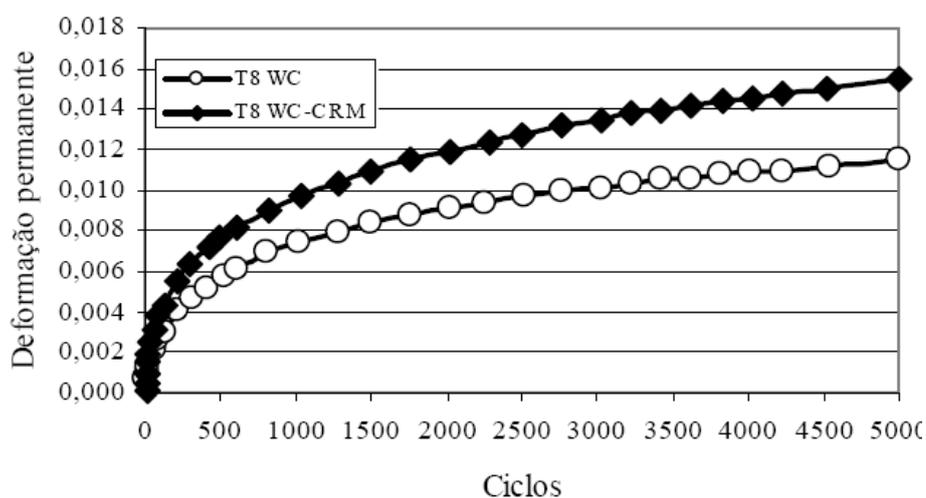


Figura 4.16 – Resistência à deformação permanente (Mohammad *et al.*, 2000)

Os provetes produzidos em laboratório por Nourelhuda *et al.* (2000), semelhantes ao estudo desenvolvido por Mohammad *et al.* (2000), foram constituídos por uma camada betuminosa

de 25,0 mm de espessura e uma camada de base de 280,0 mm constituída por agregados britados (diâmetro máximo dos grãos de 19,0 mm). Foram construídas duas secções diferentes de camadas betuminosas, sendo uma de mistura com betume-borracha (betume CAP-30 e 20% de borracha granulada) e outra mistura com betume convencional CAP-30.

O simulador de tráfego *Model Mobile Load Simulator* (MMLS) utilizado por Nouredhuda *et al.* (2000) foi desenvolvido na África do Sul em dimensões reduzidas (escala 1:10), com capacidade de aplicar às estruturas de pavimentos avaliadas cargas de eixo simples com roda dupla de 670 N (tráfego leve) e 890 N (tráfego pesado), simulando cargas de roda de 67 kN e 89 kN, respectivamente.

Para as duas secções estudadas, foram medidas as profundidades médias das rodeiras em função do número de repetições de eixo padrão, sendo os ensaios conduzidos na temperatura de 25 °C. Os resultados são mostrados na Figura 4.17.

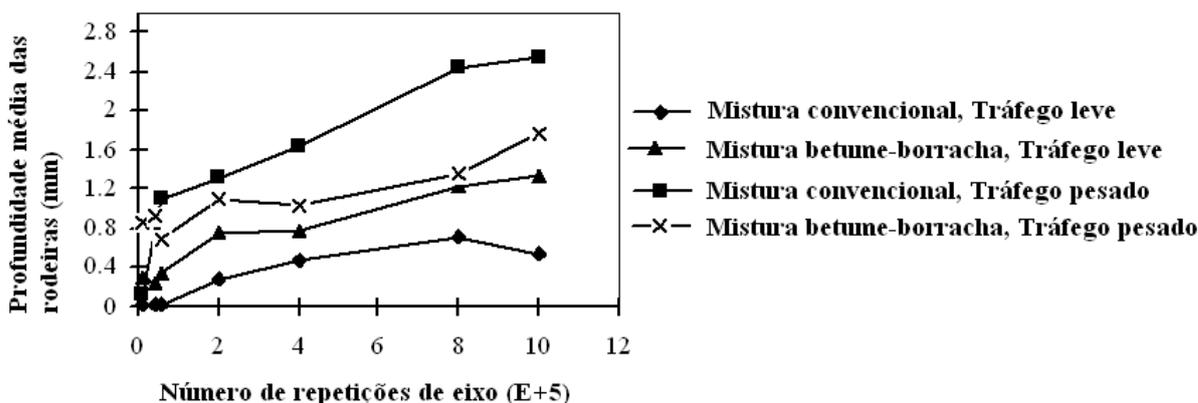


Figura 4.17 – Evolução das rodeiras (Nouredhuda *et al.*, 2000)

Os resultados obtidos nos trechos de pavimento submetidas ao simulador de tráfego do Estado da Louisiana, nos ensaios conduzidos por Mohammad *et al.* (2000) com o RSST-CH, mostraram que as rodeiras da camada de desgaste executada com betume-borracha foram ligeiramente superiores àqueles medidos na camada executada com a mistura convencional, confirmando, portanto, os resultados dos ensaios RSST-CH (Mohammad *et al.* 2000).

Os resultados dos estudos de Nouredhuda *et al.* (2000) como simulador de tráfego, mostraram que os trechos cujas camadas betuminosas foram executadas com betume-borracha apresentaram menores rodeiras do que aqueles executados com o betume convencional

quando submetidos a uma carga de eixo de 670 N. Esse comportamento inverteu-se para as trechos submetidos à carga de eixo de 890 N (Nourelhuda *et al.* 2000).

De acordo com os autores (Mohammad *et al.*, 2000 e Nourelhuda *et al.*, 2000), o principal mecanismo responsável pelas rodeiras em trechos submetidos a elevados níveis de carregamento foi o fluxo plástico (lateral) da mistura, enquanto que para baixos níveis de carregamento, as rodeiras foram formadas pela densificação das camadas.

Sousa *et al.* (2000) avaliaram a resistência à fadiga de misturas betuminosas com granulometria *dense graded* produzidas com betume-borracha (ARHM – *Asphalt Rubber Hot Mixture*) e com misturas convencionais (DGAC – *Dense Graded Asphalt Concrete*). Os resultados dos ensaios de fadiga realizados sob condições de tensão controlada e extensão controlada mostraram, para ambas as situações, que as misturas com betume-borracha apresentaram um comportamento à fadiga superior ao das misturas produzidas com o betume convencional.

O comportamento foi atribuído à maior flexibilidade proporcionada pela incorporação da borracha granulada ao betume empregado na produção das misturas betuminosas. As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam os resultados obtidos nos ensaios, relacionando a vida de fadiga (N, em ciclos) sob condições de tensão controlada e extensão controlada, respectivamente (Sousa *et al.*, 2000).

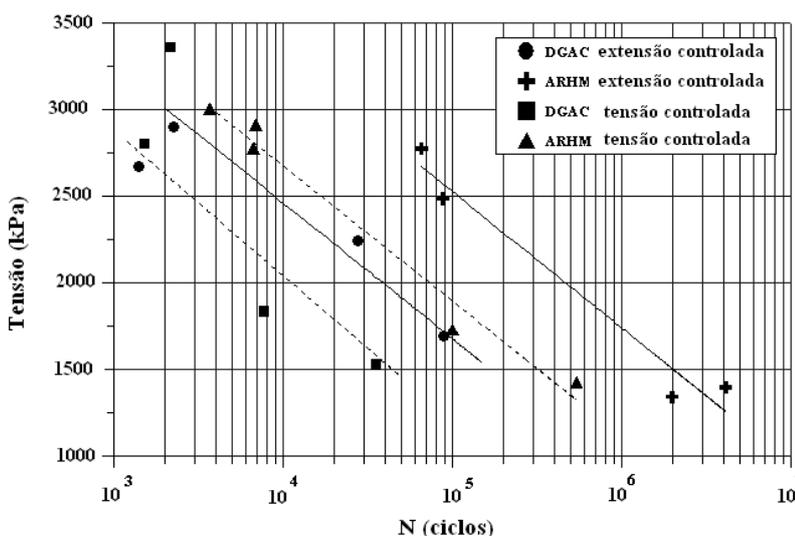


Figura 4.18 – Curvas de fadiga à tensão controlada (Sousa *et al.*, 2000)

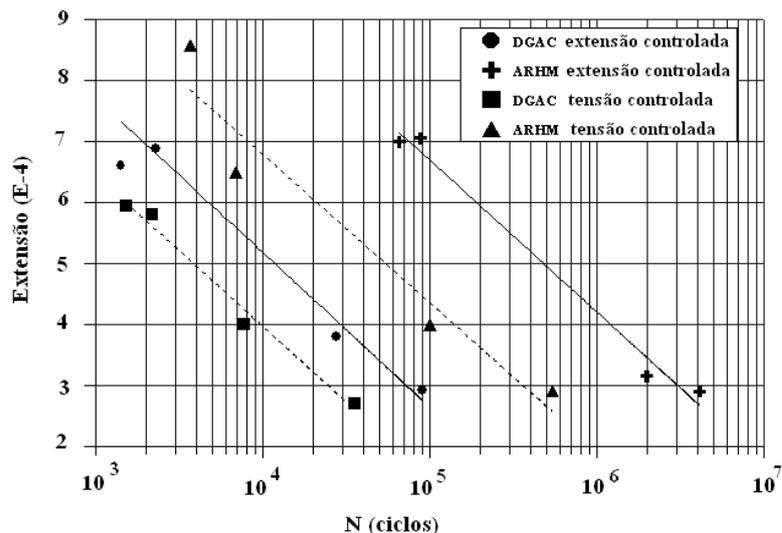


Figura 4.19 – Curvas de fadiga à extensão controlada (Sousa *et al.*, 2000)

Outros trabalhos de investigação, como exemplo, Visser & Verhaeghe, 2000; Gallego *et al.*, 2000; Shatnawi & Long, 2000, mostraram que, em todos os casos estudados, as misturas betuminosas produzidas com betume-borracha apresentaram uma resistência à fadiga significativamente superior à resistência à fadiga das misturas betuminosas convencionais.

Visser & Verhaeghe (2000) avaliaram a resistência à fadiga de duas misturas convencionais e uma com betume-borracha aplicadas na África do Sul, através do ensaio de flexão alternada em 3 pontos, extensão controlada, na temperatura de 5 °C e frequência de 10 Hz. As misturas foram produzidas com betume base PEN 60/70 e granulometria do tipo *dense graded*. Para a mistura com betume-borracha, a borracha utilizada foi proveniente do processo ambiente. Os resultados são apresentados na Figura 4.20, através dos quais é possível observar que a mistura com betume-borracha apresentou uma maior vida de fadiga.

Gallego *et al.* (2000) conduziram, em Espanha, ensaios de fadiga de misturas *dense graded*, sendo uma mistura convencional (betume PEN 60/70; percentagem de betume 4,9%) e outra, uma mistura com betume-borracha (betume PEN 60/70; borracha ambiente; percentagem de betume 4,9%). O módulo dinâmico, a 10 Hz, da mistura convencional foi de 6400 MPa, enquanto que da mistura com betume-borracha o valor obtido foi de 4160 MPa. Neste estudo, a mistura com betume-borracha obteve uma maior resistência à fadiga. As curvas de fadiga obtidas são apresentadas na Figura 4.21.

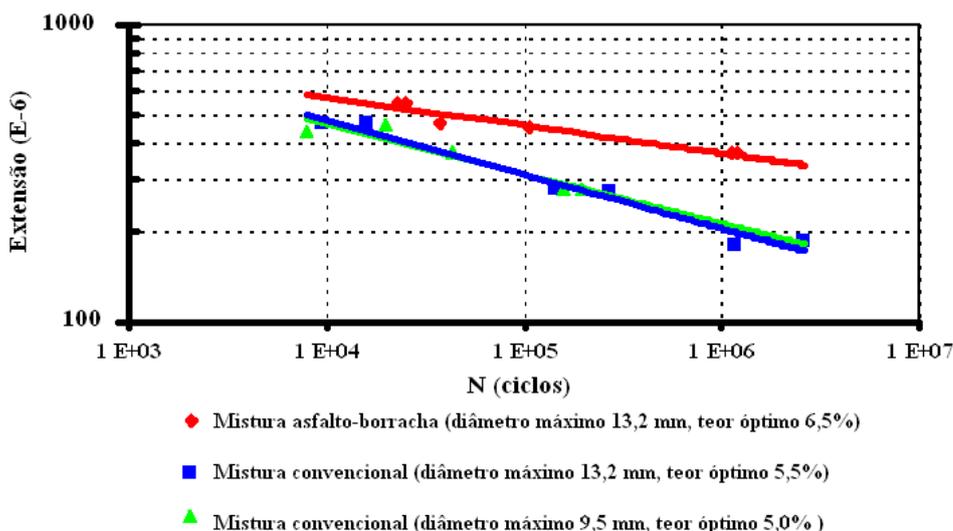


Figura 4.20 – Curvas de fadiga das misturas estudadas por Visser & Verhaeghe (2000)

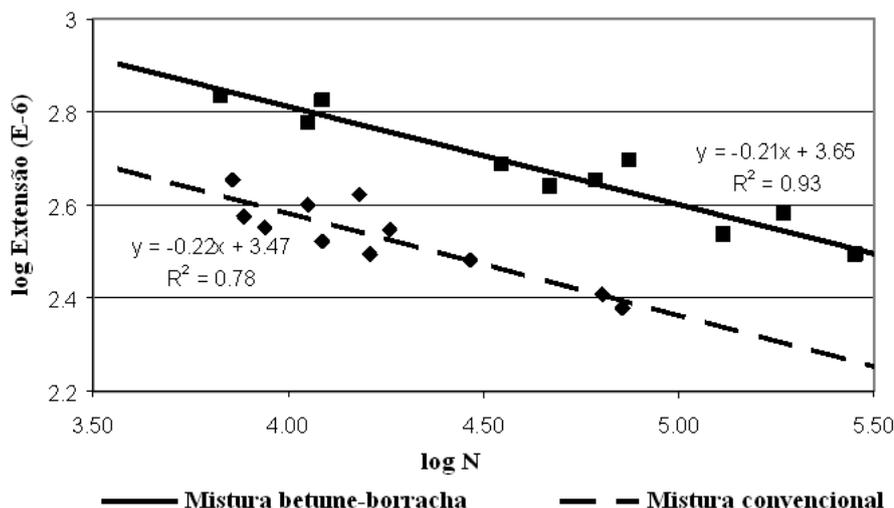


Figura 4.21 – Curvas de fadiga das misturas estudadas por Gallego *et al.* (2000)

Shatnawi & Long (2000) compararam a resistência à fadiga de uma mistura convencional *dense graded* (DGAC – *Dense Graded Asphalt Concrete*) e de uma mistura com betume-borracha *gap graded* (ARHM – GG – *Asphalt Rubber Hot Mix Gap Graded*). A percentagem de betume da mistura convencional foi de 4,5% e da mistura com betume-borracha, de 7,0%. A resistência à fadiga da mistura ARHM-GG com betume-borracha foi superior à mistura convencional (DGAC). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.22.

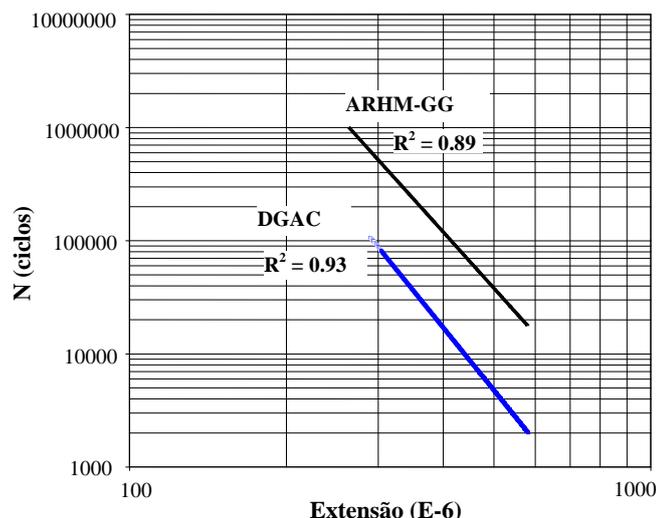


Figura 4.22 – Curvas de fadiga das misturas estudadas por Shatnawi & Long (2000)

Raad *et al.* (2001) avaliaram o desempenho à fadiga de misturas convencionais *dense graded* (betume convencional tipo AR-4000, percentagem de betume de 5,7%) e misturas betume-borracha *gap graded* (betume base tipo AR-4000, 20% de borracha incorporada e percentagem de betume de 7,3%) em provetes de 10 anos extraídos em uma estrada no sul da Califórnia. Os ensaios de fadiga foram realizados no equipamento MTS (MTS *Closed Loop Hydraulic Testing Equipment*), em temperaturas de 22 °C e -2 °C. Os provetes extraídos da estrada foram comparados a outros produzidos em laboratório. Os resultados mostraram que as misturas betume-borracha *gap graded* apresentaram menor módulo de rigidez em ambas as condições de temperatura e condições de idade do que as misturas convencionais *dense graded*.

A redução da vida à fadiga das misturas *gap graded* envelhecidas em comparação com as *gap graded* novas foi constatada, no entanto, menos significativa do que a redução que ocorreu nas misturas *dense graded* convencionais (novas e envelhecidas). No caso das misturas novas, as *gap graded* com betume-borracha apresentaram uma vida à fadiga muito superior às convencionais.

As Figuras 4.23 e 4.24 apresentam a comparação obtida por Raad *et al.* (2001), para as misturas *gap graded* novas e envelhecidas com betume-borracha e para as misturas *dense graded* convencionais novas e envelhecidas, respectivamente.

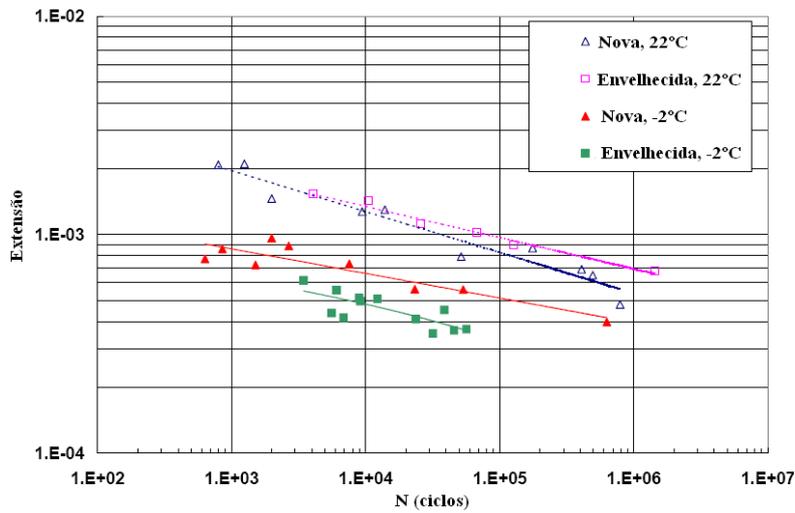


Figura 4.23 – Comparação entre as curvas de fadiga obtidas por Raad *et al.* (2001) das misturas com betume-borracha *gap graded*

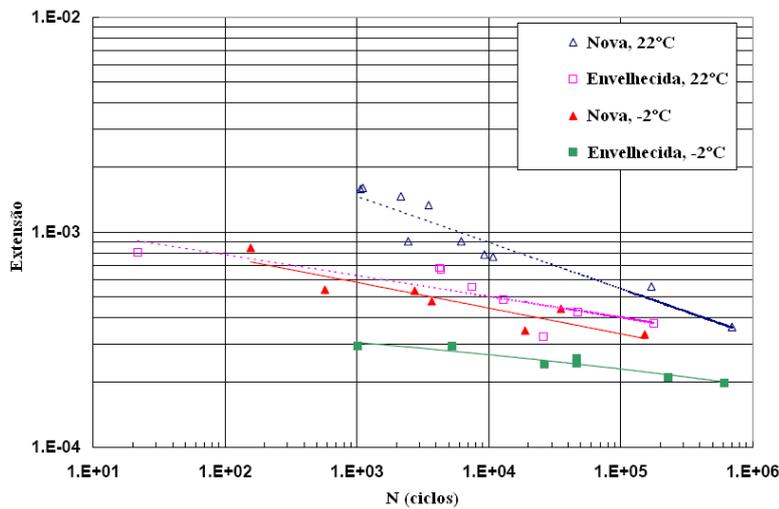


Figura 4.24 – Comparação entre as curvas de fadiga obtidas por Raad *et al.* (2001) das misturas convencionais *dense graded*

Raad *et al.* (2001) avaliaram também os módulos dinâmicos das misturas estudadas. As misturas com betume-borracha apresentaram um módulo dinâmico inferior para as duas temperaturas estudadas e nas duas condições, com ou sem envelhecimento. Para estas misturas, o aumento da rigidez para as amostras envelhecidas é mínimo (6%). No entanto, para as misturas convencionais, o aumento da rigidez a 22 °C foi em média de 30% para as amostras não envelhecidas e de 12% para as amostras envelhecidas, evidenciando que para estas misturas, o aumento da rigidez é menos significativo para a condição envelhecida do que não envelhecida. A Figura 4.25 apresenta os resultados obtidos.

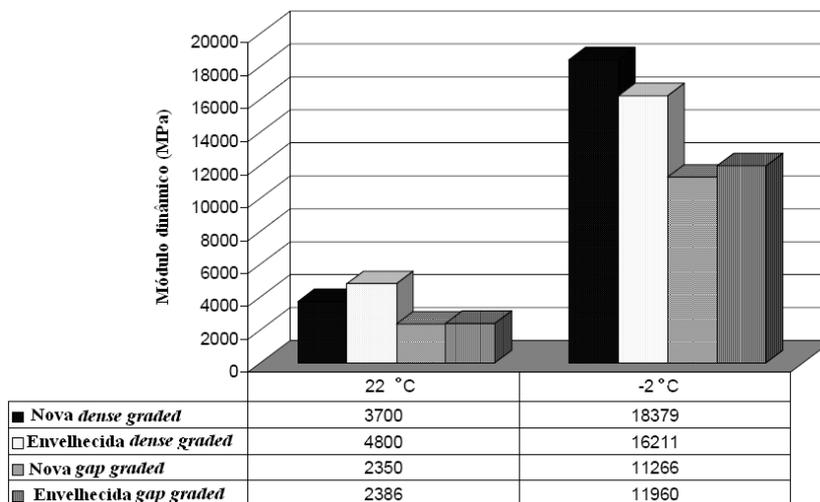


Figura 4.25 – Módulos dinâmicos das misturas estudadas por Raad *et al.* (2001)

Kaloush *et al.* (2003) avaliaram o desempenho à fadiga de misturas com betume-borracha em comparação com uma mistura convencional de controlo, produzida com betume convencional. Os ensaios de fadiga foram conduzidos em flexão alternada em 4 pontos, extensão controlada a 10 Hz na temperatura de 21,1 °C.

As misturas com betume-borracha foram designadas por: (i) Alberta AR (*Asphalt Rubber*, granulometria *gap graded*, betume base PG 64-16, percentagem de betume 8,0%, volume de vazios 9,7%); (ii) Arizona ARAC (*Asphalt Rubber Asphalt Concrete*, granulometria *gap graded*, betume base PG 58-22, percentagem de betume 7,5%, volume de vazios 8,0%); (iii) Arizona AR-ACFC (*Asphalt Rubber Asphalt Concrete Friction Course*, granulometria *open graded*, betume base PG 58-22, percentagem de betume 8,8%, volume de vazios 18%). A mistura convencional foi denominada por SBR PG 76-16 (betume convencional PG 76-16, granulometria *dense graded*, percentagem de betume 5,6%, volume de vazios 7,0%). As curvas de fadiga são apresentadas na Figura 4.26.

Através dos resultados obtidos por Kaloush *et al.* (2003), pode-se observar que as misturas com betume-borracha apresentaram um melhor desempenho à fadiga em relação à mistura convencional. As misturas Arizona AR-ACFC e Alberta AR apresentaram um comportamento similar, com uma vida à fadiga de aproximadamente 30 vezes maior que a mistura SRB PG76-16. A mistura Arizona ARAC obteve um desempenho inferior em relação às outras misturas com betume-borracha, mas ainda com uma vida à fadiga de superior à mistura convencional.

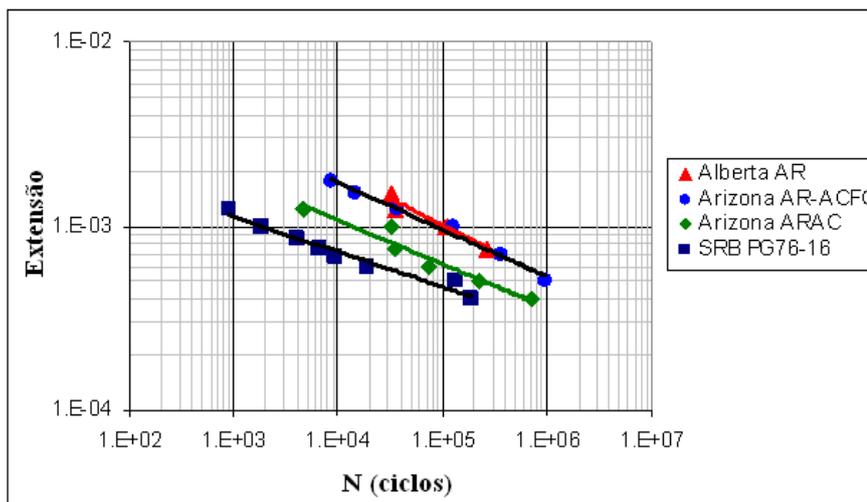


Figura 4.26 – Curvas de fadiga obtidas por Kaloush *et al.* (2003)

Dantas Neto (2004) avaliou o comportamento mecânico das misturas confeccionadas com betume-borracha e uma mistura convencional de referência, e concluiu que o aumento da percentagem de borracha incorporada ao betume convencional pelo processo húmido (*continuous blend*) produziu um aumento significativo no desempenho estrutural das misturas betuminosas, expressa pelo aumento da resistência ao fendilhamento por fadiga e da resistência ao desenvolvimento de deformações permanentes.

Os ensaios de fadiga foram realizados em flexão alternada em 4 pontos, na frequência de 10 Hz e temperatura de 20 °C. O ensaio de deformação permanente utilizado foi o de corte simples a altura constante (RSST-CH) nas temperaturas de 50 °C e 60 °C.

O autor investigou, ainda, a influência da temperatura de fabrico dos betumes-borracha em misturas de graduação contínua (Faixa “C” da especificação DNER-ES 313, 1997) e descontínua (granulometria *gap graded* do ADOT) com betume-borracha (170, 190 e 210 °C), neste estudo, todas com 21% de borracha incorporada e tempo de digestão de 60 minutos, e comparou o desempenho à fadiga com a mistura convencional.

As misturas descontínuas foram designadas por MC e as misturas contínuas por MD. O betume base utilizado para a produção de todas as misturas foi o CAP 50/70. A mistura convencional contínua foi denominada por MC CAP 50/70 (percentagem de betume 7,05% e volume de vazios 4,5%) e a convencional descontínua por MD CAP 50/70 (percentagem de betume 6,0% e volume de vazios 7,85%).

As misturas contínuas com betume-borracha (percentagem de betume 9,61% e volume de vazios 7,6%) foram denominadas por MC AB-1 (temperatura de fabrico de 170 °C); MC AB-2 (temperatura de fabrico de 190 °C) e MC AB-3 (temperatura de fabrico de 210 °C). As misturas descontínuas com betume-borracha (percentagem de betume 9,0% e volume de vazios 8,23%) foram denominadas por MD AB-1 (temperatura de fabrico de 170 °C); MD AB-2 (temperatura de fabrico de 190 °C) e MD AB-3 (temperatura de fabrico de 210 °C).

Os resultados, apresentados nas Figuras 4.27 e 4.28, mostraram que não houve grande influência da temperatura de fabrico dos betumes-borracha na resistência à fadiga das misturas confeccionadas com estes materiais.

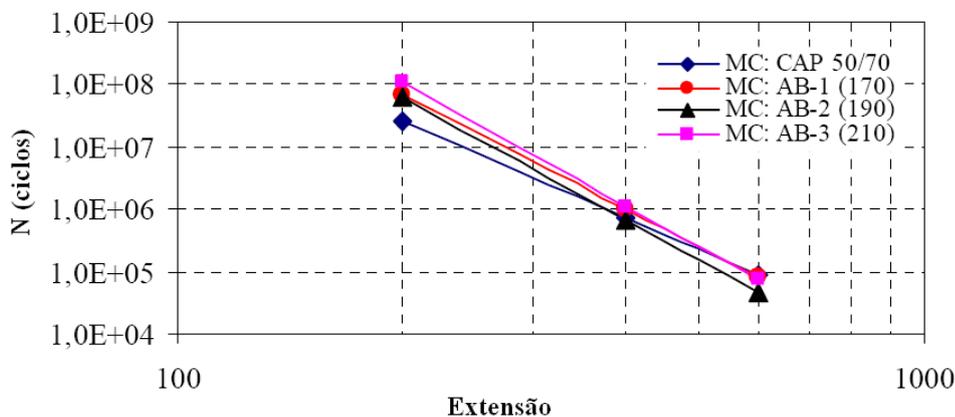


Figura 4.27 – Curvas de fadiga das misturas contínuas estudadas por Dantas Neto (2004)

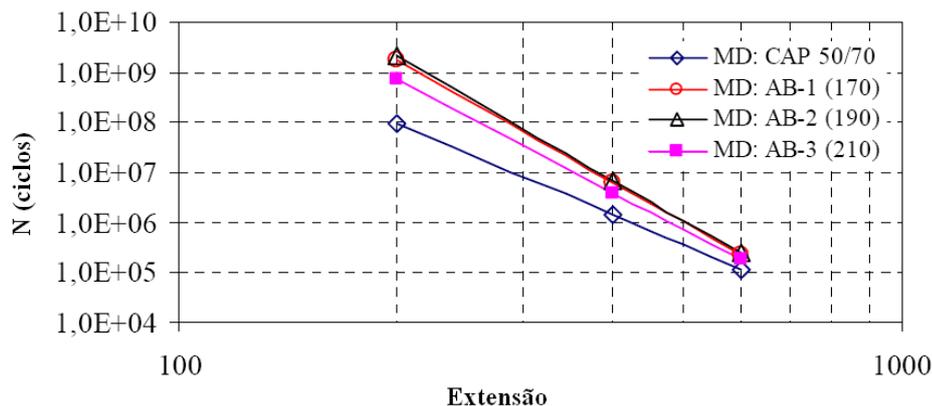


Figura 4.28 – Curvas de fadiga das misturas descontínuas estudadas por Dantas Neto (2004)

A Figura 4.29 apresenta os resultados da resistência à deformação permanente. O aumento da temperatura de fabrico dos betumes-borracha produziu um aumento na resistência à deformação permanente das misturas de graduação contínua e descontínua. Este aumento de

resistência está relacionado ao maior ponto de amolecimento dos betumes-borracha. As misturas de graduação descontínua, em geral, apresentam uma maior tendência ao desenvolvimento de rodeiras superior às misturas betuminosas de graduação contínua.

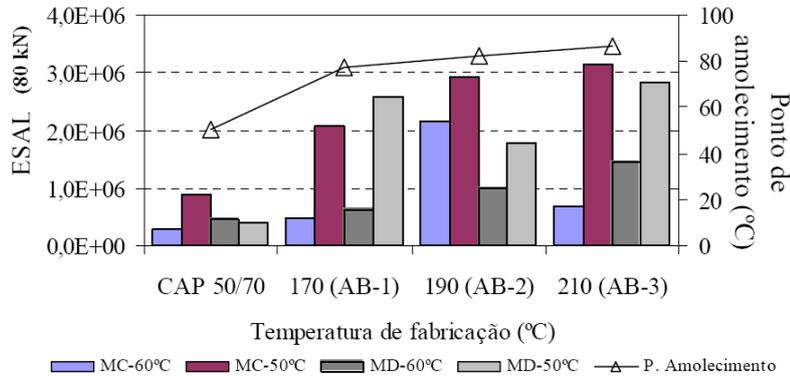


Figura 4.29 – Resistência à deformação permanente das misturas (Dantas Neto, 2004)

A investigação conduzida em laboratório por Bennert *et al.* (2004) avaliou o desempenho à deformação permanente através do ensaio de corte simples à altura constante (RSST-CH) de misturas convencionais (PG 76-22; PG 70-22; PG 64-22), todas com percentagem de betume de 5,1%; e de uma mistura com betume-borracha (AR-HMA – *Asphalt Rubber Hot Mix Asphalt*), com percentagem de betume de 6,1%, betume base PG 64-22 e 20% de borracha. A granulometria das misturas foi determinada como SUPERPAVE 12,5 mm.

A Figura 4.30 mostra os valores de módulo de corte para 3 temperaturas e a Figura 4.31 apresenta os resultados de deformação permanente.

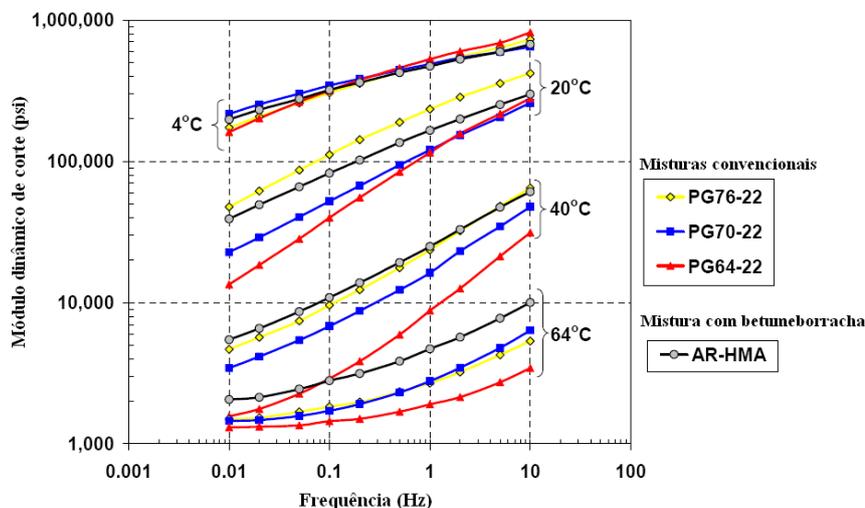


Figura 4.30 – Módulo de corte das misturas estudadas por Bennert *et al.* (2004)

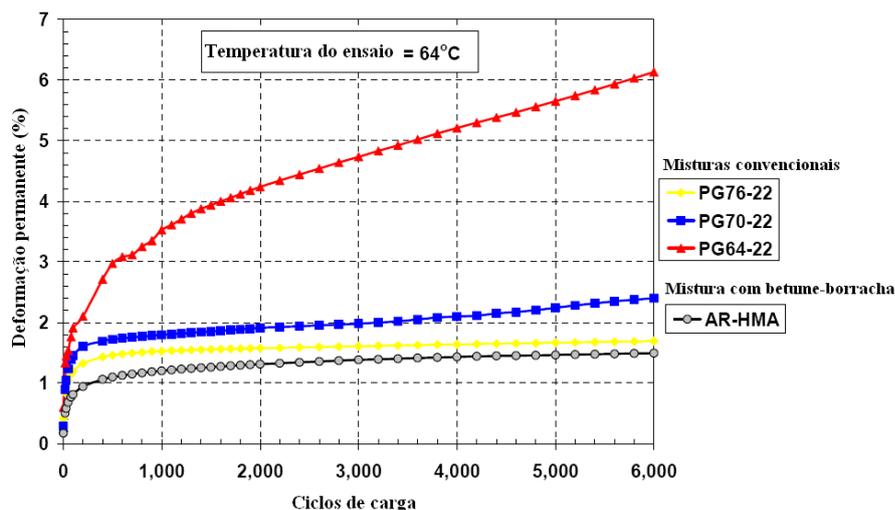


Figura 4.31 – Resistência à deformação permanente das misturas (Bennert *et al.*, 2004)

De acordo com os resultados obtidos, os autores efectuaram as seguintes observações:

- os ensaios de módulo de corte indicaram que a mistura com betume-borracha apresentou um módulo inferior ao das misturas convencionais. No entanto, um módulo baixo a baixas temperaturas indica uma maior resistência ao fendilhamento a baixas temperaturas (Figura 4.30);
- os ensaios de módulo de corte conduzidos a temperatura de 64 °C, indicaram que as misturas com betume-borracha apresentaram um módulo mais elevado (Figura 4.30). O módulo elevado a elevadas temperaturas indica um bom desempenho às deformações permanentes;
- a percentagem de deformação permanente (após 5000 ciclos) foi inferior para a mistura com betume-borracha, com valor de 1,46%, enquanto que nas misturas convencionais este valor foi de 1,66% para a mistura PG 76-22; 2,24% para a mistura PG 70-22; 5,65% para a mistura PG 64-22 (Figura 4.31);
- a resistência à deformação permanente da mistura convencional PG 76-22 é estatisticamente igual a mistura com betume-borracha AR-HMA.

As misturas com betume-borracha possuem, ainda, a capacidade de retardar a propagação de fendas quando aplicadas em reforços de pavimentos flexíveis. Assim, diversos investigadores têm estudado a propagação de fendas utilizando este tipo de misturas.

Sousa *et al.* (2000) realizaram uma avaliação da resistência à propagação de fendas utilizando o equipamento *Reflective Cracking Device* (RCD) apresentado na Figura 4.32. A simulação

da fenda é realizada numa abertura de 10,0 mm existente na parte inferior do equipamento. Sob condições de tensão controlada, o ensaio consiste em aplicar a um provete cilíndrico de 150,0 mm de diâmetro, uma força vertical de corte e outra força horizontal de tracção a uma frequência de 10 Hz. O resultado é expresso como o número de repetições de carga que leva à rotura do provete (atingida quando o módulo de rigidez alcança 50% da rigidez inicial).



Figura 4.32 – Equipamento *Reflective Cracking Device* (RCD)

Os ensaios foram conduzidos entre uma mistura convencional e outra com betume-borracha e os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.33, que mostra a vida prevista em termos de eixo padrão de 80 kN em função da espessura de reabilitação. Os resultados mostraram que a mistura produzida com betume-borracha apresentou uma resistência à propagação de fendas superior à mistura produzida com betume convencional.

Mamlouk & Barzin (2003) avaliaram a evolução da propagação de fendas em misturas betuminosas convencionais e misturas com betume-borracha através do equipamento *Closed-Loop Controlled Servohydraulic MTS Machine* que induz o fendilhamento em amostras prismáticas através de ciclos de carga com variação de temperatura. Os resultados mostraram que o fendilhamento por propagação ocorre de modo diferente nas duas misturas. De acordo com estes autores, as misturas convencionais possuem um módulo de rigidez mais elevado do que as misturas com betume-borracha. Com o aumento da temperatura, em ambos os casos, o módulo de rigidez diminui. No entanto, as misturas betume-borracha são menos sensíveis à variação da temperatura do que as misturas convencionais.

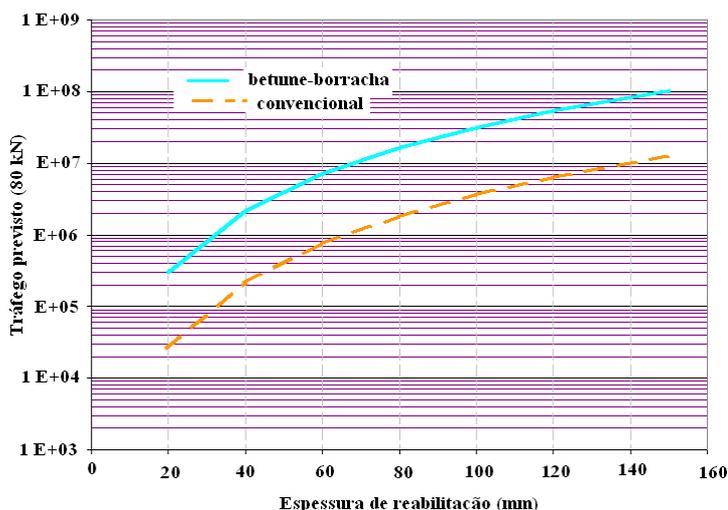


Figura 4.33 – Resistência à propagação de fendas entre a mistura convencional e com betume-borracha (Sousa *et al.*, 2000)

#### 4.4.5. Desempenho das misturas com betume-borracha em campo e aspectos construtivos

A primeira experiência do Caltrans de aplicação do betume-borracha no processo húmido ocorreu em 1980 com a construção de uma camada de reabilitação utilizando uma mistura betuminosa com granulometria *dense graded* com betume-borracha nas estradas SR 50 e I-80 (Estados Unidos). Posteriormente diversos projectos de reabilitação de pavimentos utilizando misturas com betumes-borracha foram sendo executados (Caltrans, 2003<sub>A</sub>).

Em 1983, no projecto *Ravendale* do Caltrans a aplicação do betume-borracha para reabilitação apresentava-se como uma alternativa com o custo extremamente elevado. O Caltrans decidiu utilizar camadas menos espessas de misturas com betume-borracha e controlar o aparecimento de degradações.

O resultado do projecto *Ravendale* apresentou-se extremamente satisfatório. O trecho da estrada onde foi aplicada a mistura betuminosa através de processo seco durou mais de 19 anos antes que fosse reabilitada em 2002. No caso dos trechos com aplicação do processo húmido, as camadas com misturas betuminosas com betume-borracha apresentaram melhor desempenho quando comparadas com os trechos onde foram utilizadas misturas convencionais (Caltrans, 2003<sub>A</sub>).

Larsen (1989) avaliou o desempenho de um trecho experimental de betume-borracha no Estado do Connecticut (Estados Unidos), o qual foi observado durante oito anos. O trecho experimental foi realizado para reabilitação da camada de desgaste sobre uma superfície fendilhada. O parâmetro de controlo de qualidade foi a propagação de fendas na camada de desgaste (densidade e gravidade de fendas), a qual foi observada um melhor desempenho da camada executada com borracha.

Na África do Sul, as misturas com betume-borracha foram introduzidas na metade dos anos 80 para reabilitação de estradas. Diversos trechos de rodovias foram reabilitados e submetidos ao mesmo carregamento (tráfego) e às mesmas condições climáticas. As observações de Potgieter *et al.* (1998) nos trechos reabilitados em 1986 com misturas betume-borracha e com misturas convencionais conduziram aos seguintes resultados:

- as misturas convencionais apresentavam-se mais frágeis que as misturas betume-borracha, exibindo fendas de fadiga e fendas propagadas;
- as misturas com betume-borracha apresentavam-se flexíveis com pouca ou nenhuma oxidação;
- a propagação de fendas não foi evidenciada nos trechos com betume-borracha;
- ao contrário dos trechos convencionais, os trechos com betume-borracha não apresentaram covas (buracos) nem desagregação.

A primeira experiência com misturas de betume-borracha em estradas nacionais portuguesas ocorreu em 1999. O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) acompanhou os trabalhos de reabilitação e estudou o comportamento do betume-borracha e da mistura betuminosa. O objectivo foi reunir a informação desta experiência e promover as recomendações para o uso deste tipo de técnica inovadora em Portugal (Antunes *et al.*, 2000).

Em 1999, trechos das estradas nacionais EN 104 e EN 105 em Portugal, foram reabilitados com mistura betuminosa com betume-borracha. O LNEC realizou um estudo (módulo dinâmico, fadiga e deformação permanente), através de provetes extraídos em campo. A mistura com granulometria *gap graded* apresentava uma percentagem de betume de 7,0%, e o betume-borracha foi produzido com 18% de borracha incorporada, na temperatura de 180 °C e num tempo de digestão de 45 minutos.

Para os ensaios de módulo e fadiga, seis provetes foram extraídos, sendo que quatro deles, designados por FB-1, FB-2, FB-3 e FB-4 (originais) foram ensaiados após a extracção, enquanto que os designados por FB-4 e FB-5 (envelhecidos) foram previamente submetidos ao envelhecimento em estufa a 85°C durante 5 dias.

O equipamento do LNEC utilizado nos ensaios de fadiga foi o ensaio de flexão alternada em 4 pontos. Neste estudo, os ensaios de fadiga foram executados a extensão controlada, com aplicação de uma carga sinusoidal com uma frequência de 10 Hz na temperatura de 21 °C, de acordo com o procedimento descrito em AASHTO TP 8 (1994). Antes dos ensaios de fadiga, foram realizados ensaios de módulo dinâmico, nas frequências de 5 Hz e 10 Hz. As Figuras 4.34 e 4.35 apresentam os resultados de módulo e de fadiga, respectivamente. O desempenho ao envelhecimento das misturas, através do ensaio de fadiga, mostrou que a mistura de betume-borracha apresentou pouca sensibilidade ao envelhecimento (Figura 4.35).

Antes da execução da reabilitação das estradas nacionais EN 104 e EN 105, foram realizados ensaios em laboratório (fadiga e módulo), comparando o desempenho da mistura com betume-borracha e com uma mistura convencional (estudos realizados por Sousa *et al.*, 1999). O módulo da mistura convencional foi superior ao da mistura com betume-borracha. Os resultados dos ensaios de fadiga com o uso de misturas betuminosas do tipo *gap graded* com betume-borracha para reabilitação, mostraram que o desempenho de fadiga destas misturas apresentou significativa melhoria relativamente aos resultados de misturas betuminosas fabricadas com betume convencional.

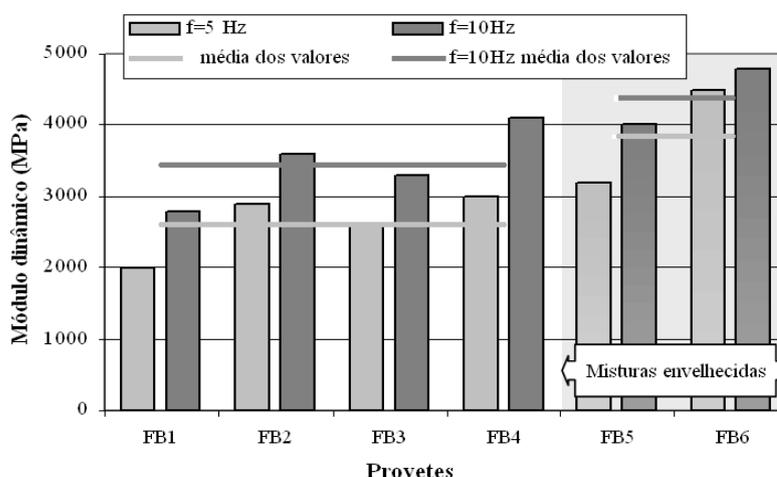


Figura 4.34 – Módulo dinâmico das misturas com betume-borracha envelhecidas e originais, nas frequências de 5 e 10 Hz (Antunes *et al.*, 2000)

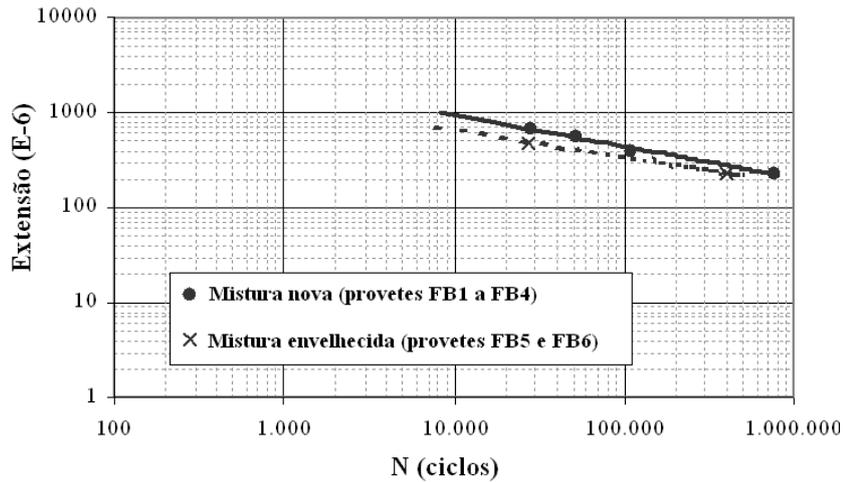


Figura 4.35 – Curvas de fadiga das misturas com betume-borracha envelhecidas e originais (Antunes *et al.*, 2000)

Adicionalmente, foram executados os ensaios para a avaliação da resistência à deformação permanente das misturas, utilizando o equipamento *Weel Tracking*, na temperatura de 60 °C, de acordo com a norma espanhola NLT 173 (1984). Os provetes foram extraídos de dois locais diferentes sendo denominados, na secção A, por FS1A e FS2A e na secção B, por FS3B, FS4B e FS5B.

Para tráfego pesado, a norma NLT 173 (1984) limita a velocidade de deformação entre 105 e 120 minutos em  $15 \times 10^{-3}$  mm/min. A Figura 4.36 mostra a relação entre a deformação em função do tempo das misturas extraídas em campo e o Quadro 4.5 apresenta os resultados obtidos.

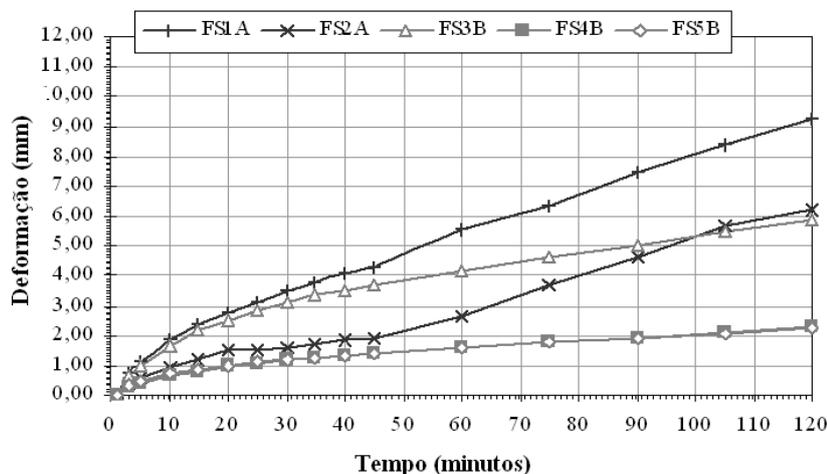


Figura 4.36 – Resultados da deformação permanente das misturas com betume-borracha (extraídas em campo) estudadas por Antunes *et al.* (2000)

Quadro 4.5 – Velocidades de deformação (adaptado de Antunes *et al.*, 2000)

Provetes	Velocidades de deformação ( $10^{-3}$ mm/min.)		
	V <sub>30/45min.</sub>	V <sub>75/90min.</sub>	V <sub>105/120min.</sub>
FS1A	55	75	59
FS2A	25	63	38
FS3B	39	26	29
FS4B	15	12	13
FS5B	13	9	9

Os resultados apresentados na Figura 4.36, em que as misturas betuminosas com betume-borracha com provetes extraídos da estrada, em geral, não obtiveram resultados satisfatórios, principalmente FS1A e FS2A. No entanto, observou-se que provetes extraídos de locais centrais (FS4B FS5B) obtiveram um bom desempenho, enquanto que o provete FS3B, extraído do acostamento, obteve um resultado insatisfatório pela compactação ineficiente do local.

Considerando os resultados obtidos em campo, foram produzidos misturas em laboratório para avaliar o desempenho das misturas com betume-borracha à deformação permanente, nas mesmas condições de ensaio anteriores. Para tanto foram produzidas diversas misturas, com variados tempos de digestão (Quadro 4.6). O Quadro 4.6 apresenta as velocidades de deformação obtidas (em laboratório) e ilustradas na Figura 4.37.

Quadro 4.6 – Velocidades de deformação (adaptado de Antunes *et al.*, 2000)

Misturas	Tempo de digestão	Velocidades de deformação ( $10^{-3}$ mm/min.)		
		V <sub>30-45min.</sub>	V <sub>75-90min.</sub>	V <sub>105-120min.</sub>
LS1	49 minutos	19	19	15
LS2	1 hora	17	17	12
LS4	2 horas e 37 minutos	19	14	12
LS6	5 horas <sup>(i)</sup>	85	78	71
LS7	5 horas	23	34	35
LS9	5 horas e 28 minutos	32	21	18
LS12S	45 minutos + 1 dia de armazenagem <sup>(ii)</sup>	18	13	13
LS13S***	5 dias de armazenagem <sup>(iii)</sup>	34	23	19

Observações referentes ao Quadro 4.6:

(i) A temperatura de digestão foi elevada para 240 °C nos primeiros 45 minutos;

(ii) Armazenagem do betume-borracha em estufa na temperatura de 130 °C e posteriormente elevada à 180 °C durante a mistura com os agregados;

(iii) Mistura produzida em central betuminosa, sem tempo de digestão conhecido.

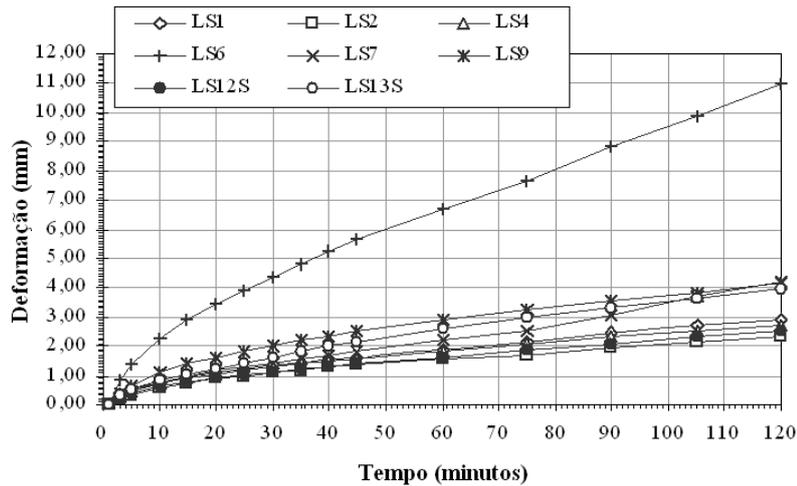


Figura 4.37 – Resultados da deformação permanente das misturas com betume-borracha (produzidas em laboratório) estudadas por Antunes *et al.* (2000)

De acordo com os resultados obtidos em laboratório, os autores efectuaram as seguintes observações:

- as misturas produzidas utilizando betume-borracha com maior tempo de digestão (mais que 2,5 horas) apresentaram deformação permanente mais elevada;
- o armazenamento do betume-borracha durante 1 dia, aparentemente não afectou o desempenho da mistura;
- entretanto, o armazenamento por 5 dias na temperatura de 130 °C e produzida na central betuminosa, apresentou a mais elevada velocidade de deformação ( $v_{105-120min.}$ );
- a mistura produzida com o betume-borracha, o qual a temperatura foi elevada a 240 °C durante o processo de digestão apresentou a maior deformação permanente. Por esta razão, a temperatura deve ser controlada durante o processo de digestão.

Way (1998) considera que as misturas betume-borracha apresentam um excelente desempenho quando aplicadas em camadas de desgaste. Considerando as condições climáticas do Estado do Arizona, além da redução da propagação de fendas, as misturas betume-borracha aumentam a durabilidade das camadas de desgaste e, em áreas urbanas, principalmente as misturas *open graded*, diminuem o ruído.

Way (2000, 2003) avaliou a reabilitação no Estado do Arizona, no trecho de 16,7 km da *Interstate 40* próximo a Flagstaff, em 1990. Essa estrada possuía um elevado volume de tráfego (20000 veículos por dia, sendo, 35% de camiões pesados) e, sendo construída em

pavimento rígido, encontrava-se na época com elevada percentagem de área fendilhada. O clima da região possui temperaturas variando entre 27 °C no verão e -31 °C no inverno.

O projecto de reabilitação compreendeu uma camada de desgaste com 12,5 cm de espessura, das quais 7,5 em mistura betuminosa convencional (betume AC-20 e percentagem de betume 4,6%), e 5,0 cm em mistura betuminosa gap graded (AR-ACFC) com betume-borracha (betume AC 10, 20% de borracha e percentagem de betume 6,5%). Em alguns trechos foi ainda construída uma camada de 12,5 cm de uma mistura *open graded* com betume-borracha e em um pequeno trecho realizada uma camada de desgaste em mistura convencional como referência.

Na investigação, o autor verificou um aumento de 100% no custo de produção da mistura betuminosa com borracha, custo recuperado com a redução na espessura e nas poucas obras de conservação durante a vida útil. Durante os nove anos em que a estrada foi acompanhada, os trechos com betume-borracha, apresentaram excelente desempenho, não apresentando deformações plásticas excessivas nem fendas. A condição superficial, medida com o equipamento *Mu meter*, apresentou um resultado satisfatório (Way 2000; 2003).

A Figura 4.38 mostra a evolução da área fendilhada<sup>2</sup>, observada por Way (2000) no Estado do Arizona, na reabilitação do pavimento com uma mistura convencional e com a mistura com betume-borracha (AR-ACFC).

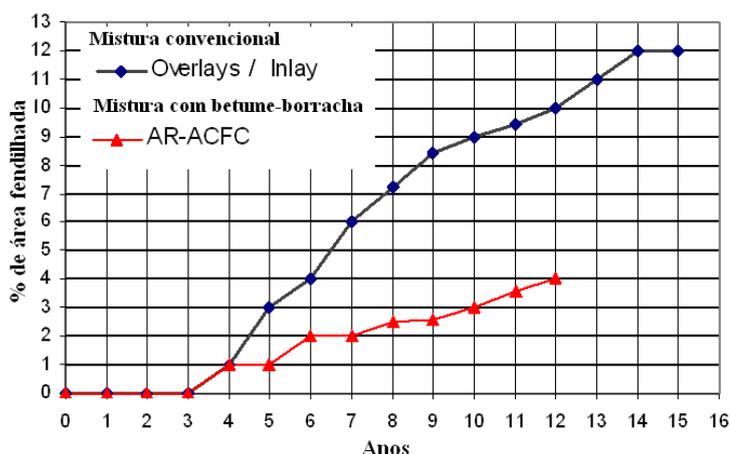


Figura 4.38 – Evolução do fendilhamento das misturas convencional e com betume-borracha AR-ACFC (Way, 2000)

<sup>2</sup> A percentagem de área fendilhada é avaliada de acordo com *Distress Identification Manual, 4<sup>th</sup> Revised Edition*. (Miller & Bellinger, 2003. FHWA-RD-03-031, Georgetown Pike, Mc Lean; VA, USA).

Way (2003) avaliou, durante os três anos seguintes, o desempenho de misturas betuminosas com betume-borracha aplicadas durante 15 anos no Arizona, tendo concluído que estas misturas reduzem a propagação de fendas, aumentam a durabilidade das camadas de desgaste e em áreas urbanas reduzem o ruído. Em geral, as espessuras de camadas de desgaste aplicadas variam de 12,5 mm a 50,0 mm e nas condições climáticas do Arizona têm mostrado excelente durabilidade. A Figura 4.39 apresenta a área fendilhada em função dos anos, do pavimento reabilitado com uma mistura convencional e com a mistura com betume-borracha (AR-ACFC).

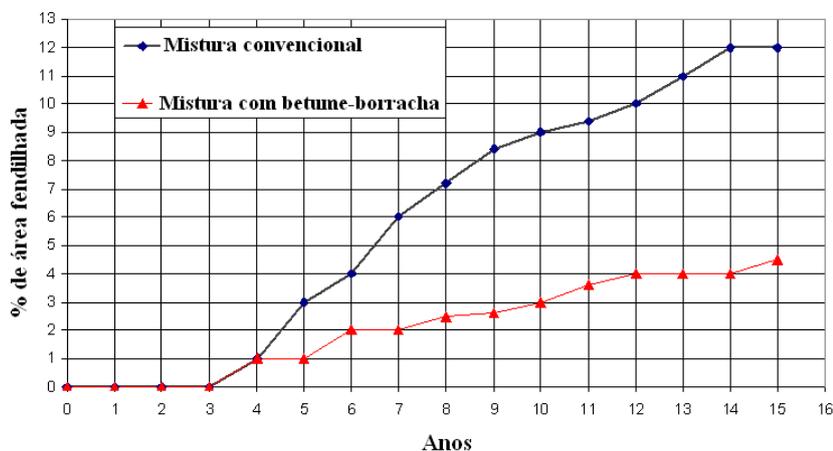


Figura 4.39 – Evolução do fendilhamento das misturas convencional e com betume-borracha AR-ACFC (Way, 2003)

Na Austrália, a integração da borracha nos betumes utilizados em camadas de impermeabilização tem sido realizada com sucesso, reduzindo a propagação de fendas, melhorando a adesividade do agregado na camada e reduzindo a produção de ruído. A quantidade de borracha variou de 16% a 20% por volume de betume (Beatty *et al.* 2002).

A investigação conduzida no Estado da Louisiana (Estados Unidos) avaliou 8 trechos com misturas com betume-borracha e um trecho em mistura convencional para controlo. A comparação entre os trechos foi realizada através de ensaios de tracção indirecta, módulo resiliente, deformação permanente, fadiga e inspecção visual do fendilhamento. As conclusões da avaliação conduzida por Huang *et al.* (2002) foram os seguintes:

- as misturas com betume-borracha, em geral, apresentaram valores menores de rigidez e módulo resiliente do que as misturas de controlo;

- os trechos com misturas betume-borracha apresentaram menores rodeiras do que os trechos de controlo;
- os trechos com misturas betume-borracha apresentaram vida à fadiga inferior ou similar aos trechos de controlo;
- os trechos com misturas betume-borracha apresentaram menor fendilhamento que os trechos de controlo.

Na África do Sul, em 17 anos de utilização, as misturas betume-borracha têm demonstrado bom desempenho. No entanto, a metodologia de formulação Marshall deve ser complementada com a avaliação do desempenho à fadiga, ensaio *creep* e módulo de rigidez (Potgieter & Coetsee, 2003).

Sebaaly *et al.* (2003) avaliaram trechos de pavimentos no Estado de Nevada (Estados Unidos) em camadas de desgaste com misturas convencionais e betume-borracha. Os resultados com camadas SAMI e camadas de desgaste não obtiveram o desempenho esperado. No entanto, resultados com misturas com betume-borracha em reabilitação de pavimentos foram efectivas considerando as condições de tráfego e clima daquele Estado.

### **Aspectos construtivos**

A construção de camadas de pavimentos com uma mistura betuminosa betume-borracha é semelhante à mistura convencional. A temperatura do betume-borracha, da mistura e da compactação varia de acordo com a granulometria, teor de borracha e tipo de betume convencional. As temperaturas de aplicação e de compactação são, em geral, mais elevadas considerando que a viscosidade do betume-borracha, mais elevada que a viscosidade de um betume convencional. Não devem ser utilizados rolos de pneus na compactação da camada (Oda, 2000).

Specht (2004) acrescenta que as técnicas de construção e reabilitação de pavimentos utilizando o betume-borracha são basicamente as mesmas utilizadas para misturas convencionais. No entanto, algumas modificações devem ser feitas na central tendo em conta a elevada viscosidade do betume-borracha, como a instalação de bombas e canalizações com maiores dimensões que as usuais, bem como a protecção térmica.

A utilização de rolos lisos, com ou sem vibração, na compactação de misturas betume-borracha é recomendada também pelo FHWA/USDOT (1995). Os rolos de pneus não devem ser utilizados porque os pneus aderem ao betume viscoso, tornando a superfície irregular.

Kandhal (1992) recomenda que uma fina camada de areia (0,5 a 1,0 kg/m<sup>2</sup>) deve ser espalhada sobre a camada a ser compactada, facilitando a compactação, evitando a aderência entre o revestimento e os pneus e facilitando a abertura ao tráfego em um menor período de tempo.

Baker *et al.* (2003) acrescenta que a adequada compactação é um dos elementos vitais para o bom desempenho das misturas betume-borracha. Os factores que influenciam a compactação são as características da mistura, a temperatura ambiente e o equipamento utilizado para compactação.

Durante a compactação, o controlo de temperatura é um factor importante do processo. A investigação conduzida na Califórnia por Harvey & Popesku (2000) mostrou que as misturas *gap graded* arrefecem rapidamente após o espalhamento, de modo que o controlo da temperatura destas misturas é essencial para o desempenho satisfatório do produto final.

O guia de especificação do Caltrans para misturas betume-borracha (Caltrans, 2003<sub>A</sub>) indica que o controlo da temperatura é a chave para a qualidade destas misturas, seja na produção do betume-borracha, seja na construção do pavimento.

Outro aspecto é referente à temperatura ambiente de aplicação da mistura. O Caltrans especifica como 12,7 °C a temperatura mínima de espalhamento da mistura betume-borracha. Adicionalmente, quando a temperatura atmosférica for inferior a 15,5 °C, a temperatura de espalhamento da mistura deve estar entre 143 °C e 163 °C (Caltrans, 2003<sub>A</sub>).

Os organismos rodoviários norte-americanos também fazem referência à temperatura ambiente para o espalhamento das misturas betuminosas com betume-borracha. O Texas DOT, por exemplo, especifica como sendo mínima a temperatura ambiente de espalhamento da mistura betuminosa de 26 °C. O ADOT especifica esta temperatura como sendo 29 °C. No caso do Estado da Florida, a temperatura ambiente mínima é de 10 °C. O sucesso da aplicação

de misturas betuminosas com betume-borracha tem sido evidenciado em regiões com clima quente e seco (Baker *et al.*, 2003).

O FHWA/USDOT (1995) recomenda que a temperatura do pavimento, para aplicação de misturas betume-borracha seja, no mínimo, de 26 °C, enquanto Roberts *et al.* (1989) sugerem uma temperatura mínima de 15 °C.

Em estudos conduzidos nos Estados Unidos em New Jersey (1994), Michigan (1994), Texas (1995) e Califórnia (1994 e 2001), para avaliação dos resíduos e gases tóxicos emanados na central betuminosa durante a produção de misturas betume-borracha, indicaram, em geral, que as emissões durante a produção de misturas betume-borracha e misturas convencionais são semelhantes. Apesar da borracha de pneus usados possuir químicos, que consistem em hidrocarbonetos, negro de fumo, óleos e fíleres inertes, estes produtos não representam novos riscos à saúde. A maioria dos componentes das borrachas está também presente nos betumes convencionais, embora em diferentes proporções (Baker *et al.*, 2003).

Com base nos estudos referidos, é consensual afirmar que a produção de misturas betume-borracha não são mais prejudiciais ao meio ambiente do que as misturas convencionais, nomeadamente quanto às emissões ao ar, líquidos efluentes, material sólido e higiene ocupacional (Emery, 1995).

#### 4.4.6. Misturas com betume-borracha no Brasil

Leite *et al.* (2000), no Brasil, avaliaram a resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas através de ensaios *creep* e ensaios de deformação permanente com o simulador do tipo LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*). Os resultados dos ensaios *creep* indicaram uma melhoria na resistência às deformações permanentes das misturas produzidas com betume-borracha em relação à mistura confeccionada com o betume convencional (AC 20<sup>3</sup>). Em relação ao betume modificado com EVA, a resistência à deformação permanente é semelhante, mas para percentagens de betume superiores a 5,6%, a mistura com EVA torna-se muito susceptível à variação da percentagem de betume. Os resultados obtidos por Leite *et al.* (2000) são apresentados na Figura 4.40.

---

<sup>3</sup> AC 20 corresponde ao CAP-20, classificado por viscosidade, da antiga especificação brasileira DNER – EM 204 (1995).

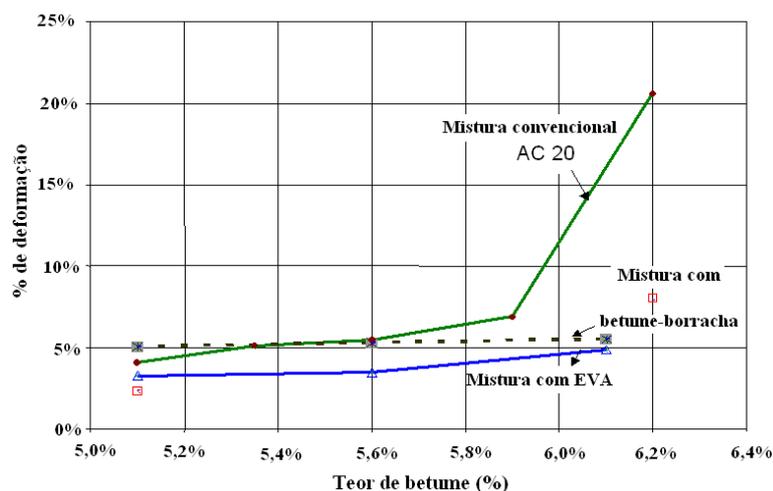


Figura 4.40 – Percentagem de deformação das misturas (Leite *et al.*, 2000)

Uma das primeiras aplicações do betume-borracha através do sistema *terminal blend* no Brasil foi em 2002, na Via Anhanguera, Estado de São Paulo. Nesta estrada, foi realizada a aplicação de uma mistura *gap graded* (betume *terminal blend* com 20% de borracha). O projecto de reabilitação inicial era composto de uma camada de 7,0 cm de mistura betuminosa convencional colocada sobre uma camada fresada e recomposta de 8,0 cm (Morilha *et al.*, 2002). Após o tratamento das degradações e selagem de fendas, a nova camada foi aplicada directamente sobre o pavimento existente com 4,0 cm de uma mistura *gap graded* com betume-borracha, utilizando uma equivalência estrutural<sup>4</sup> de 60% em relação à mistura convencional.

Em 2002, foi realizado na Via Anchieta (SP 150) um troço experimental de 350 metros de comprimento e 3,5 metros de largura, no qual a aplicação de misturas betuminosas (com betume-borracha e convencionais) foi monitorizada *in situ* e em laboratório.

A investigação foi conduzida por Leite *et al.* (2003), que avaliaram a resistência à fadiga e à deformação permanente das misturas através do *Asphalt Pavement Analyzer* (APA). O APA é um equipamento de carga de roda capaz de realizar ensaios de deformação permanente e de fadiga e vem sendo usado na caracterização de misturas betuminosas brasileiras através do Centro de Pesquisa da Petrobrás (CENPES). O procedimento do ensaio de fadiga consiste em submeter provetes prismáticos ou cilíndricos a um carregamento contínuo de rodas de aço que entram em contacto directo com uma viga em direcção vertical. A rodeira é medida a cada

<sup>4</sup> Pavimentos com o mesmo comportamento estrutural são denominados estruturalmente equivalentes. Isto significa dizer utilizar 4,0 cm de espessura de uma camada “x” possui a mesma equivalência estrutural que aplicar 6,4 cm de espessura de uma camada “y”, e neste caso, a equivalência estrutural é de 60%.

passagem da roda de aço. O limite de rotura do provete é definido quando ocorre uma interrupção brusca do crescimento dos deslocamentos (Leite *et al.*, 2003).

Neste estudo, foram produzidas em laboratório, as seguintes misturas betuminosas: (i) com betume-borracha do tipo *terminal blend* (betume base CAP-20 com 20% de borracha incorporada), granulometria *gap graded* do Caltrans, percentagem de betume 7,4%; (ii) mistura convencional, betume CAP-20, granulometria *gap graded* do Caltrans, percentagem de betume 4,3%; (iii) mistura convencional, betume CAP-20, granulometria *dense graded* Fuso IV-B do AI, percentagem de betume 5,5%.

Para avaliar a resistência à deformação permanente através do APA, os provetes ficaram em estufa, durante 5 horas na temperatura de 60 °C, de modo a simular a temperatura média das camadas a serem reabilitadas na região Sudeste do Brasil. Os ensaios foram conduzidos na temperatura de 60 °C, a uma pressão de contacto de 0,7 MPa. Após 8000 ciclos, a profundidade das rodeiras foi determinada, para cada mistura, como apresenta a Figura 4.41. A mistura *gap graded* com betume-borracha apresentou a menor profundidade de rodeiras e portanto, uma maior resistência à deformação permanente.

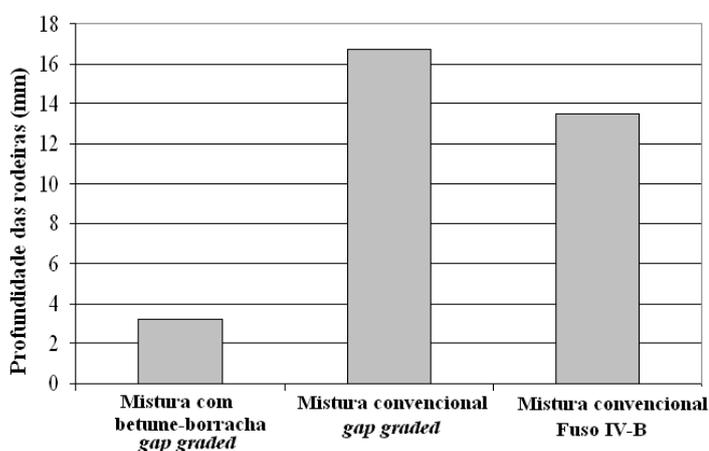


Figura 4.41 – Profundidade das rodeiras (Leite *et al.*, 2003)

Os ensaios de fadiga no APA foram realizados à temperatura de 25 °C. Os provetes foram previamente submetidos a estufa por 120 horas, a uma temperatura de 80 °C. O critério de finalização do ensaio adoptado foi a deflexão medida de 1,0 mm após N ciclos (passagens da roda). Os resultados, mostrados na Figura 4.42, revelaram que, a mistura com betume-borracha apresentou a maior resistência à fadiga.

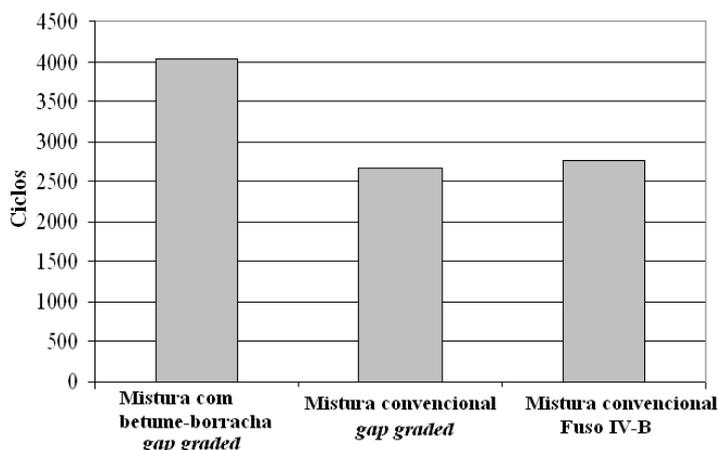


Figura 4.42 – Número de ciclos para a deflexão de 1,0 mm (Leite *et al.*, 2003)

A extracção de provetes para comparação do volume de vazios e módulo com os provetes moldados durante a construção mostrou que os módulos eram similares entre os dois provetes (extraídos após 2 meses de construção e moldados em laboratório). No entanto, o mesmo não ocorreu com o volume de vazios, bem maior nos provetes extraídos no trecho, o que revela a importância da compactação (Leite *et al.* 2003).

Relativamente à vida à fadiga, os resultados obtidos no APA foram diferentes daqueles obtidos no ensaio de compressão diametral. Os resultados do APA foram superiores aos de compressão diametral, este último muito mais agressivo (Leite *et al.* 2003).

Severo *et al.* (2003) realizaram um estudo experimental com aplicação de betume-borracha na rodovia BR 116 (Estado do Rio Grande do Sul, região Sul do Brasil) na reabilitação de uma camada de desgaste. A avaliação realizada após 2 anos de execução mostrou que o trecho experimental não apresenta degradações severas nas secções reabilitadas.

Ceratti *et al.* (2006) investigaram a eficiência no retardamento de propagação de fendas de misturas densas com betume convencional CAP-20 e com betume-borracha *terminal blend* com 15% de borracha. Para tanto, foi construída uma pista experimental, na qual foi realizado um ensaio acelerado com o simulador de tráfego, com aplicação de cargas de semi-eixo de 50 kN. Para simular a condição de fendilhamento de um pavimento degradado, parte do revestimento da pista experimental foi previamente fendilhado (com o emprego de uma serra de corte). Em seguida, foram executadas as camadas do revestimento novo, simulando assim a reabilitação de um pavimento. Para a avaliação do desempenho das duas misturas, foram

acompanhadas a evolução da deflexão (medida com a viga Benkelman), o afundamento de trilha de roda (rodeiras) e a área fendilhada.

A Figura 4.43 mostra que o pavimento construído com betume-borracha apresentou um comportamento superior ao do pavimento com betume convencional.

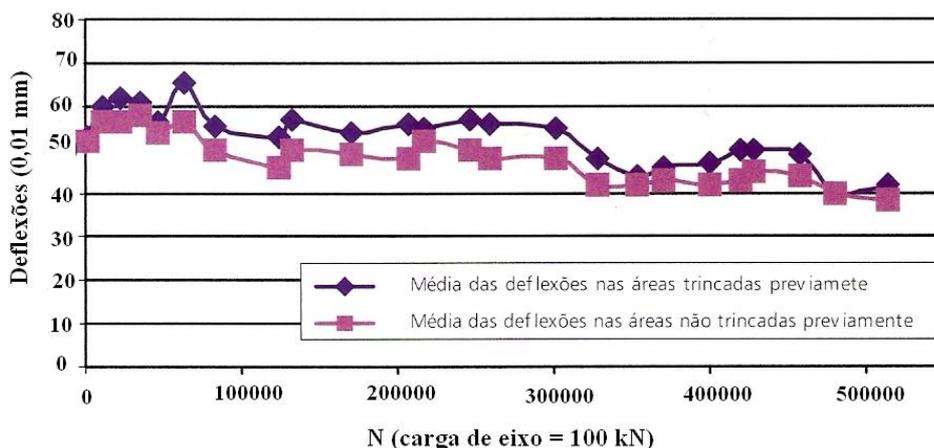


Figura 4.43 – Evolução das deflexões (Ceratti *et al.*, 2006)

Os afundamentos nas trilhas de roda (ATR) foram medidas através de um perfilógrafo. Os ATR apresentaram evoluções iniciais semelhantes para os dois pavimentos, mas a partir dos 37000 ciclos, a taxa de deformação plástica do pavimento com betume convencional tornou-se maior. A Figura 4.44 apresenta a evolução dos ATR médios medidos (rodeiras).

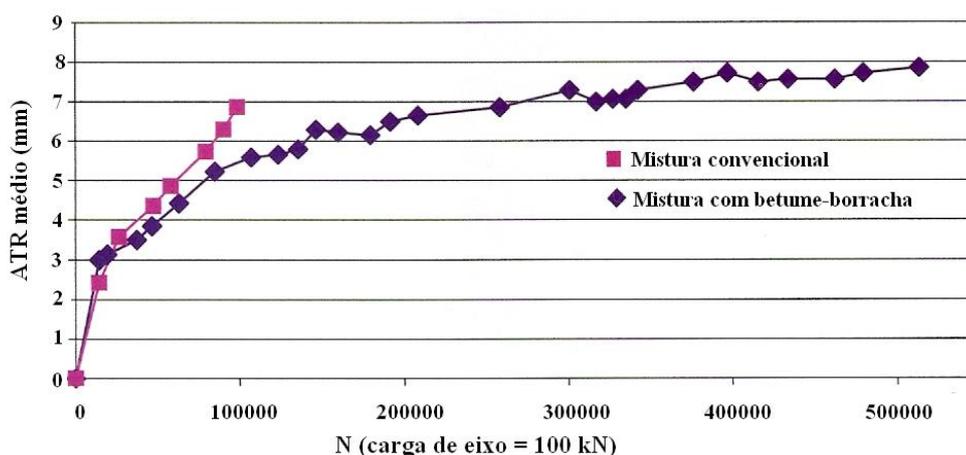


Figura 4.44 – Evolução das rodeiras (Ceratti *et al.*, 2006)

Relativamente à propagação de fendas, o desempenho do pavimento com betume-borracha foi superior. As primeiras fissuras reflectidas no pavimento convencional foram observadas após

14000 ciclos de carga, evoluindo até tornarem-se fendas. No pavimento com betume-borracha, a primeira fenda reflectida apareceu aos 123000 ciclos de carga. A Figura 4.45 apresenta a evolução do fendilhamento observada nos pavimentos estudados.

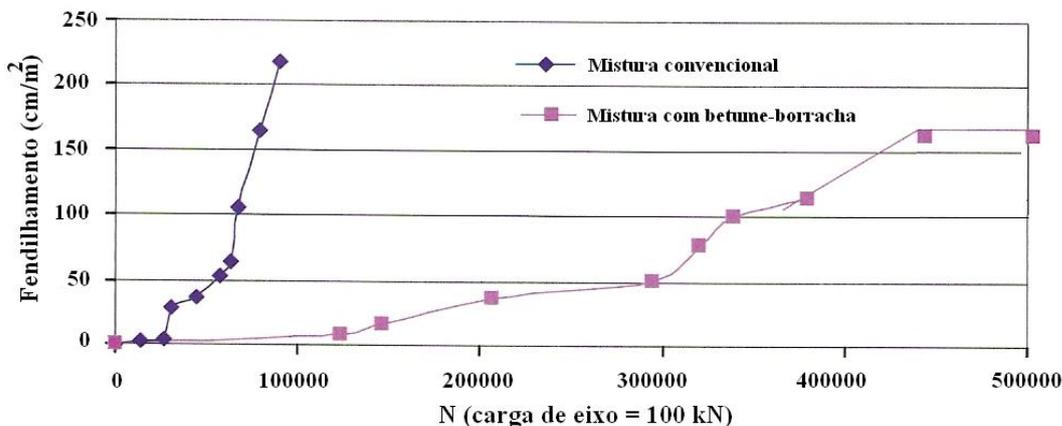


Figura 4.45 – Evolução do fendilhamento (Ceratti *et al.*, 2006)

#### 4.4.7. Redução da espessura de camadas de reabilitação executadas com betume-borracha

Entre 1980 e 1992, o Caltrans conduziu uma investigação em pavimentos reabilitados na qual comparou as degradações nas camadas com misturas convencionais e com misturas com betume-borracha. Através das avaliações de campo, foi determinado que os pavimentos com misturas com betume-borracha poderiam reduzir significativamente a espessura e obter a mesma vida em serviço comparativamente a uma mistura convencional, o que resultou no desenvolvimento, pelo Caltrans, de um guia de redução da espessura com misturas betuminosas com betume-borracha em camadas reabilitadas (Van Kirk & Holleran, 2000).

O guia *Reduced Thickness Design Guide* foi desenvolvido em 1992 e proposto ao FHWA (*Federal Highway Administration*) para misturas com betume-borracha e granulometria *gap graded*, seguindo os seguintes procedimentos (Caltrans, 1992; Van Kirk, 2003):

- 1º – determinar a espessura de reabilitação requerida para uma mistura convencional (DGAC) através de critérios deflectométricos;
- 2º – determinar a espessura requerida para retardar a propagação de fendas para uma mistura convencional;

- 3º – determinar a espessura equivalente da mistura com betume-borracha *gap graded* (ARHM-GG), com ou sem SAMI (Quadro 4.7).

Quadro 4.7 – Espessuras de equivalência estrutural (mm)

DGAC	ARHM-GG <sup>(i)</sup> (sem SAMI)	ARHM-GG (com SAMI)
45	30 <sup>(ii)</sup>	-
60	30	-
75	45	30
90	45	30
100	60	45
120	60	45
140	45 <sup>(iii)</sup>	60
150	45 <sup>(iv)</sup>	60
170	60 <sup>(iii)</sup>	45 <sup>(iii)</sup>
180	60 <sup>(iv)</sup>	45 <sup>(iv)</sup>

Observações referentes ao Quadro 4.7:

<sup>(i)</sup> A equivalência máxima permitida é de 2:1;

<sup>(ii)</sup> A espessura mínima permitida de ARHM-GG é de 30,0 mm;

<sup>(iii)</sup> A camada deve ser composta ainda por 45,0 mm de DGAC a ser colocada primeiro;

<sup>(iv)</sup> A camada deve ser composta ainda por 60,0 mm de DGAC a ser colocada primeiro.

Em 1993, o Caltrans conduziu uma investigação em conjunto com a Universidade de Berkeley da Califórnia com o objectivo de validar os dados obtidos em campo de redução da espessura. Nesta investigação, foram realizados ensaios com o simulador de veículo pesado (HVS – *Heavy Vehicle Simulator*) em camadas de 75 mm de espessura com misturas com betume convencional (AC) e, em camadas com 38 mm e 25 mm com betume-borracha e granulometria *gap graded* (ARHM-GG). Os resultados são apresentados no Quadro 4.8 (Van Kirk & Holleran, 2000).

Quadro 4.8 – Resultados dos ensaios com o HVS

Repetições	Carga (kN)	AC (75 mm)	ARHM-GG (38 mm)	ARHM-GG (25 mm)
0 – 100000	40	Fendas a 100000	-	-
100000 – 175000	40	Fendas tipo bloco a 175000	-	-
175000 – 200000	80	Completamente fendilhado	-	Fissuras
200000 – 237000	80	Teste encerrado	-	Completamente fendilhado

Os resultados obtidos, de acordo com o Quadro 4.8, mostraram que a secção com mistura convencional estava completamente degradada ao final de 200000 repetições. Na secção com betume-borracha e espessura de 38 mm, com a carga de roda de 40 kN e ao fim de 175000 repetições, ela não apresentou fendilhamento, e mesmo com o aumento da carga de roda para 80 kN e ao final de 237000 repetições.

Na secção com betume-borracha e espessura de 25 mm, com a carga de roda de 40 kN e ao fim de 175000 repetições, não foi evidenciado fendilhamento. Nesta secção, com o aumento da carga de roda para 80 kN, o fendilhamento foi observado com 200000 repetições e somente no fim do ensaio, com 237000 repetições, a secção estava completamente fendilhada. A partir dos resultados obtidos nos ensaios, pôde-se concluir que 25 mm de ARHM-GG obteve um melhor desempenho do que 75 mm de AC, que corresponde a uma redução de espessura de 3:1.

De acordo com Harvey *et al.* (2000) na Califórnia a proporção de aplicação de misturas com betume-borracha (principalmente *gap graded*) era ainda relativamente inferior à aplicação de misturas densas convencionais devido à incerteza sobre o ciclo de vida de misturas betume-borracha *gap graded* versus a convencional *dense graded*, pela falta de comparação a partir de dados das aplicações do Caltrans e, ainda, por causa do custo de construção mais elevado das misturas betume-borracha. No entanto, o diferencial custo é minorado pela possibilidade de redução da espessura quando da aplicação das misturas betume-borracha.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Andrietta, A.J., 2002. Pneus e Meio Ambiente: Um Grande Problema Requer uma Grande Solução. Site Reciclar é Preciso. [www.reciclarepreciso.hpg.ig.com.br/recipientes.htm](http://www.reciclarepreciso.hpg.ig.com.br/recipientes.htm)  
Acesso em: Junho de 2004.
- Abdeirahman, M., 2006. Controlling the Performance of Crumb Rubber Modifier (CRM) Binders through the Addition of Polymer Modifiers. 85<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.
- Airey, G.; Rahman, M.; Collop, A., 2003. Absorption of Bitumen into Crumb Rubber Using the Basket Drainage Method. The International Journal of Pavement Engineering, Vol. 4, n° 2. Abingdon, UK.
- ADOT, 2005. ADOT Construction Manual. Arizona Department of Transportation, Intermodal Transportation Division, Arizona, USA.
- Amirkhanian, S.N., 2001. Utilization of Crumb Rubber in Asphaltic Concrete Mixtures – South Carolina’s Experience. Report Draft. South Carolina Department of Transportation. Clemson, South Carolina, USA.
- ANIP, 2009. 200 Milhões de Pneus Insersíveis têm Destino Adequado no Brasil. Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP) e Reciclanip. Newsletter ANIP, Edição 1, Março de 2009, Brasil.
- Antunes, M.L.; Baptista, F.; Eusébio; M.I.; Costa, M.S.; Miranda, C.V., 2000. Characterization of Asphalt Rubber Mixtures for Pavement Rehabilitation Projects in Portugal. Asphalt Rubber 2000, Proceedings. Vilamoura, Portugal.
- Asphalt Institute, 1989. The Asphalt Handbook, Manual Series n° 4 (MS-4), 1989 Edition, Kentucky, USA.
- ASTM D 36, 1995. Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM, 1996. Annual Book of ASTM Standards. Section 4: Construction. Vol. 04.3. Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken.

ASTM C 136, 1996. Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM D 5, 1997. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM D 8, 1997. Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM D 6114, 1997. Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM D 2196, 2005. Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA.

Baker, T.E.; Allen, T.M.; Jenkins, D.V.; Mooney, T.M.; Pierce, L.M.; Christie, R.A.; Weston, J.T., 2003. Evaluation of the Use of Scrap Tires in Transportation Related Applications in the State of Washington. Report to the Legislature as Required by SHB 2308. Washington State Department of Transportation. Olympia, Washington, USA.

Beatty, T.L., *et al.*, 2002. Pavement Preservation Technology in France, South Africa, and Australia, Report FHWA-PL- 3-001, Office of International Programs, Federal Highway Administration, Washington, D.C., USA.

Bennert, T.; Maher, A.; Smith, J., 2004. Evaluation of Crumb Rubber in Hot Mix Asphalt. Final Report. Center for Advanced Infrastructure and Transportation (CAIT). Rutgers University. USDOT, Research and Special Programs Administration. Washington, D.C., USA.

Brazil tires, 2005. Consulta em Dezembro/2006. Site: [www.braziltires.com.br](http://www.braziltires.com.br)

Caltrans, 1992. Design Guide for ARHM-GG. California Department of Transportation. Division of New Technology, Materials and Research. Sacramento, California, USA.

Caltrans, 2003<sub>A</sub>. Asphalt Rubber Usage Guide. State of California Department of Transportation. Materials and Testing Services. Office of Flexible Pavement Materials. Sacramento, California, USA.

Caltrans, 2003<sub>B</sub>. Maintenance Technical Advisory Guide (TAG), Caltrans. State of California Department of Transportation, Sacramento, California, USA.

Caltrans, 2005. Use of Scrap Tire Rubber. State of California Department of Transportation. Materials and Testing Services. Office of Flexible Pavement Materials. Sacramento, California, USA.

Caltrans, 2006. Open Graded Friction Usage Guide. State of California Department of Transportation. Materials and Testing Services. Office of Flexible Pavement Materials. Sacramento, California, USA.

Ceratti, J.A.P.; Núñez, W.P.; Cruz, L.L.; Wickbolt, V.S.; 2006. Estudo Comparativo do Desempenho de um Recapeamento Utilizando Asfalto Borracha. 1ª Edição. Greca Asfaltos, LAPAV – Laboratório de Pavimentação da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Univias. Porto Alegre, RS, Brasil.

Costa, H.M.; Visconte, L.L.Y.; Nunes, R.C.R., 2003. Historical Aspects of Vulcanization. Polímeros, April/June 2003, vol.13, no.2, p.125-129. ISSN 0104-1428. São Paulo, SP, Brasil.

Coulter, P.E., 2003. Synopsis of Scrap Tire Reclamation in Canada. North American Recycled Rubber Association. Ontario, Canada.

- Dantas Neto, S.A., 2004. Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, DF, Brasil.
- Emery, J., 1995. Evaluation of Rubber Modified Asphalt Demonstration Projects. In Recycled Tire Rubber and Other Waste Materials in Asphalt Mixtures. Transportation Research Board, Transportation Research Record nº1515, pp. 37-46.
- EPA, 2008. Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts for 2006. United States Environmental Protection Agency (EPA). Washington, D.C., USA. Site: <http://www.epa.gov>
- Epps, J.A., 1994. Use of Recycled Rubber Tires in Highways. NCHRP Synthesis of Highway Practice nº 198, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.
- Fapemig, 2003. Consulta em Janeiro/2007. Site: <http://revista.fapemig.br/10/pneus.html>
- FHWA/USDOT, 1995. Crumb Rubber Modifiers (CRM) in Asphalt Pavements. Federal Highway Administration /U.S. Department of Transportation. FHWA SA - 95-056. Washington, D.C., USA.
- Gallego, J.; Tomás, R.; Nosetti, R.A.; Daguerre, L.; Bianchetto, H.D., 2000. Laboratory Performance of Several Spanish Asphalt Paving Mixes Produced with Asphalt-Rubber. Asphalt Rubber 2000 – Proceedings. Vilamoura, Portugal.
- Greenbook, 2000. Standard Specifications for Public Works Construction, 2000 Edition. Public Works Standards, Inc. Anaheim, California, USA.
- Harvey, J. & Popescu, L., 2000. Accelerated Pavement Testing of Rutting Performance of Two Caltrans Overlay Strategies. Transportation Research Board, 2000 Annual Meeting (79<sup>th</sup>), Paper nº 00-0427.

- Harvey, J.; Bejarano, M.; Fantoni, A.; Heath, A.; Shin, H.-C., 2000. Performance of Caltrans Asphalt Concrete and Asphalt-Rubber Hot-mix Overlays at Moderate Temperatures Accelerated Pavement Testing Evaluation: Draft. University of California at Berkeley, Pavement Research Center, 2000.
- Hicks, R.G.; Lundy, J.R.; Leahy, R.B.; Hanson, D.; Epps, J., 1995. Crumb Rubber Modifier (CRM) in Asphalt Pavement: Summary of Practices in Arizona, California, and Florida. FHWA-SA-95-056.
- Hicks, R.G. & Epps, J.A., 2000. Quality Control for Asphalt Rubber Binders and Mixes. Rubber Pavement Association. Tempe, Arizona, USA.
- Hicks, R.G. & Epps, J.A., 2001. Life Cycle Cost Analysis of Asphalt Rubber Paving Materials. Rubber Pavement Association. Tempe, Arizona, USA.
- Hicks, R.G., 2002. Asphalt Rubber Design and Construction Guidelines, Volume I – Design Guidelines. Northern California Rubberized Asphalt Concrete Technology Center (NCRCTC) and California Integrated Waste Management Board (CIWMB). Sacramento, California, USA.
- Heitzman, M., 1992. Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber. Transportation Research Record nº 1339, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.
- Holleram, G., 2000. Rubber Hits the Road. Pavement Maintenance Specialists. Sacramento, USA
- Holleram, G. & Reed, J.R., 2000. Emulsification of Asphalt Rubber Blends. Asphalt Rubber 2000, Proceedings. Vilamoura, Portugal.
- Huang, B.; Mohammad, L.N.; Graves, P.S.; Abadie, C., 2002. Louisiana Experience with Crumb-Rubber Modified Hot-ix Asphalt Pavement. Transportation Research Record.

- Hunt, E.A.; 2002. Crumb Rubber Modified Asphalt Concrete in Oregon. Final Report SPR 355. Oregon Department of Transportation and Federal Highway Administration. Oregon, USA.
- Kaloush, K.E.; Witczak, M.W.; Way, G.B.; Zborowski, A.; Abojaradeh, M.; Sotil, A., 2002. Performance Evaluation of Arizona Asphalt Rubber Mixtures Using Advanced Dynamic Material Characterization Tests. Final Report. Arizona State University, Tempe, Arizona, USA.
- Kaloush, K.E.; Zborowski, A.; Sotil, A.; Way, G.B., 2003. Material Characteristics of Asphalt Rubber Mixtures. Asphalt Rubber in Brazil: Pavement Performance and Laboratory Study. Asphalt Rubber 2003, Proceedings. Brasília, Brazil.
- Kandhal, P. S., 1992. Waste Materials in Hot Mix Asphalt – an Overview. NCAT – National Center for Asphalt Technology report n.92-6. Auburn, Alabama, USA.
- Kuennen, T., 2005. Polymer-Modified Asphalt Comes of Age, Better Roads Magazine, USA.
- Januszke, R.M., 1971. Paving Asphalt – Additives in Durability Determination. Central Research Laboratories. Imperial Chemical Industries of Australia and New Zealand, Ltd. Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Develop, Vol. 10, nº 2, Australia.
- Jorgenson, L., 2002. Tires Make the Road – The Latest in Asphalt Rubber Pavements. University of California Berkeley, Institute of Transportation Studies, Technology Transfer Program, Berkeley, California, USA.
- Larsen, P. E., 1989. Eight-year Performance Evaluation of an Asphalt Rubber Hot Mix Pavement. Proceedings National Seminar on Asphalt Rubber. Kansas City, Missouri, USA.
- Leite, L.F.M.; Motta, L.M.G.; Bernucci, L.B.; Soares, J.B., 2000. Mechanical Behaviour of Asphalt Rubber Mixes Prepared in Laboratory. Asphalt Rubber 2000 Proceedings. Vilamoura, Portugal.

- Leite, L.F.M.; Silva, P.A.; Edel, G.; Motta, L.M.G.; Nascimento, L.A.H.; 2003. Asphalt Rubber in Brazil: Pavement Performance and Laboratory Study. Asphalt Rubber 2003, Proceedings. Brasília, Brazil.
- Luminari, M. & Fidato, A., 1998. State of the Art Report on Mix Design. RILEM Report 17. Bituminous Binders and Mixes. State of the Art and Interlaboratory Tests on Mechanical Behaviour and Mix Design, pg. 69-101. London, England.
- Lund, H. F., 2001. The McGraw-Hill Recycling Handbook, 2<sup>nd</sup> Edition. Chapter 18 – Tires. McGraw-Hill, Inc. New York, NY, USA.
- Madapati, R.R.; Lee, K.W.; Manning, F.J.; Franco, C.A., 1996. Feasibility of Crumb Rubber Use for Asphalt Pavement Construction. Transportation Research Record. Washington, USA.
- Martins, M.A., 2001. Fibra de Sisal: Mercerização, Acetilação e Aplicação em Compósitos de Borracha de Pneu Triturado. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campinas. Instituto de Química. Campinas, SP, Brasil.
- Miller, J.S. & Bellinger, W.Y., 2003. Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program (4<sup>th</sup> Revised Eddition). Report n° FHWA-RD-03-031. Office of Infrestructure research and Development Federal Highway Administration. Gerogetown Pike, McLean, VA, USA.
- Mohammad, L.N.; Huang, B.; Roberts, F.; Rasoulilian, M., 2000. Accelerated Loading Performance and Laboratory Characterization of Crumb Rubber Asphalt Pavements. Asphalt Rubber 2000 Proceedings. Vilamoura, Portugal.
- Mamlouk, M. & Barzin, M., 2003. Cracking Resistance of asphalt Rubber Mix Versus Hot-Mix Asphalt. Asphalt Rubber 2003, Proceedings. Brasília, Brasil.
- Morilha Jr.A., Dantas, G.A.; Barros, R.M.V., 2002. Aplicações Práticas de Ligante Asfáltico Modificado por Borracha de Pneus de Alta Viscosidade. Associação Brasileira de Pavimentação. 11<sup>a</sup> Reunião de Pavimentação Urbana. Porto Alegre, RS, Brasil.

- Morilha, Jr.A. & Greca, M.R., 2003. *Betume Borracha Ecoflex*. Greca Asfaltos. Curitiba, Paraná, Brasil.
- Morilha, Jr.A. & Trichês, G., 2003. *Análise Comparativa de Envelhecimento em Laboratório de Nove Ligantes Asfálticos*. 34ª Reunião Anual de Pavimentação. Campinas, SP, Brasil.
- Nourelhuda, M.; Mamlouk, M.; Way, G.; Forstier, D., 2000. *Accelerated Testing of Crumb Rubber Modified Pavement*. Asphalt Rubber 2000, Proceedings. Vilamoura, Portugal.
- Oda, S., 2000. *Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação*. Tese de Doutorado. Engenharia Civil – Área de Transportes. Escola de Engenharia de São Carlos, EESC/USP. São Carlos, São Paulo, Brasil.
- Page, G.C.; Ruth, B.R.; West, R.C., 1992. *Florida's Approach Using Ground Tire Rubber in Asphalt Concrete Mixtures*. Transportation Research Record 1339, TRB, Washington, D.C., USA.
- Piggott, M.R. & Woodhams, R.T., 1979. *Recycling of Rubber Tires in Asphalt Paving Materials*. Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, University of Toronto, Toronto, Canada.
- Potgieter, C.J.; Pike, L.L.; Balmaceda; P., 1998. *The Bitumen Rubber Asphalts of the Buccleuch Interchange – Report on the 1986 Construction and 12 Years Service Life*. Proceedings of The South Africa Conference, South Africa.
- Potgieter, C.J. & Coetsee, J.S., 2003. *Bitumen Rubber Asphalt: Year 2003 Design and Construction Procedures in South Africa*. Asphalt Rubber 2003, Proceedings. Brasília, Brazil.
- Raad, L.; Saboundjian, S.; Minassian, G., 2001. *Field Aging Effects on the Fatigue of Asphalt Concrete and Asphalt-Rubber Concrete*. Transportation Research Board Annual Meeting. Paper nº 01-3097. Washington, D.C., USA.

- RAC, 2004. New Frontiers in Tire Recycling. Rubber Association of Canada. Tire Recycling Background – from Rubber Recycling 2004. Banff, Alberta, Canadá.
- Recipav, 2004. A Utilização do Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus em Portugal. Recipav Engenharia e Pavimentos, Ltda. Grupo Águas de Portugal. Cartaxo, Portugal.
- Reschner, K., 2006. Scrap Tire Recycling – A Summary of Prevalent Disposal and Recycling Methods. Berlin, Germany.
- RMA, 2005. Rubber Manufacturers Association. Scrap tires Characteristics. Washington, D.C., USA. Site: [www.rma.org/scrap\\_tires](http://www.rma.org/scrap_tires)
- RRI, 2006. Rubber Recycling. Scrap Tire News. Recycling Research Institute. Leesburg, Virginia, USA.
- Roberts, F.L.; Kandhal, P.S.; Brown, E.R.; Dunning, R.L., 1989. Investigation and Evaluation of Ground Tire Rubber in Hot Mix Asphalt. National Center for Asphalt Technology n° 89-3. Auburn, Alabama, USA.
- RPA, 2000. Volumetric Mixture Design Procedures for Asphalt-Rubber Mixtures. Asphalt-Rubber Research and Development. Asphalt-Rubber Association, Tempe, Arizona, USA.
- RPA, 2006. Ground Tire Rubber in Asphalt Paving Applications. Cliff Ashcroft. Asphalt-Rubber Research and Development. Asphalt-Rubber Association, Tempe, Arizona, USA.
- Scrap Tire Management Council, 1995. Scrap Tire Use/Disposal Study 199. Washington, D.C., USA.
- Sebaaly, P.E.; Bazi, G.; Weitzel, D.; Coulson, M.A.; Bush, D., 2003. Long Term Performance of Crumb Rubber Mixtures in Nevada. Asphalt Rubber 2003, Proceedings. Brasília, Brazil.

Severo, L.; Ruwer, P.; Gonçalves, F.P.; Ceratti, J.A.P., 2003. Performance of Asphalt- Rubber Hot Mix Overlays at Brazilian Highway. Asphalt Rubber 2003, Proceedings. Brasília, Brazil.

Shatnawi, S. & Long, B., 2000. Performance of Asphalt Rubber as Thin Overlays. Asphalt Rubber 2000, Proceedings. Vilamoura, Portugal.

Silva, H.M.R.D., 2005. Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Sousa, J.B.; Fonseca, P.; Freire, A.; Pais, J.C., 1999. Comparação da Vida à Fadiga e Deformação Permanente entre Misturas com Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus Convencionais. Relatório Consulpav EST 99-07. Portugal.

Sousa, J.B; Pais, J.C.; Saïm, R., 2000. The Effect of Mode of Loading on the Comparison Between Asphalt Rubber and Traditional Hot Mixes Laboratory Performance. Asphalt Rubber 2000, Proceedings. Vilamoura, Portugal.

Specht, L.P., 2004. Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEC/UFRGS). Porto Alegre, RS, Brasil.

Takallou, A.B.; Hicks, R.G.; Esch, D.C., 1986. Effect of Mix Ingredients on the Behaviour of Rubber-Modified Asphalt Mixtures. Transportation Research Board, TRR 1096, Washington, D.C., USA.

Takallou, H.B. & Sinton, A., 1992. Advances in Technology of Asphalt Paving Material Containing Used Tired Rubber. Transportation Research Record n°.1339. Washington, D.C., USA.

Takallou, H.B. & Takallou M.B., 2003. Effects of Mixing Time and Temperature on the Visco-elastic Properties of Asphalt Rubber Binder. Asphalt Rubber 2003, Proceedings. Brasília, Brazil.

- TFHRC, 2005. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. Turner Fairbank Highway Research Center. FHWA, Federal Highway Administration. Washington, D.C., USA.
- TNZ, 2006. Use of Reclaimed Tyre Rubber in Asphalt – Research Report. Transit New Zealand, Wellington, New Zealand.
- Van Kirk, J. & Holleran, G.; 2000. Reduced Thickness Asphalt Rubber Concrete Leads to Cost Effective Pavement Rehabilitation. 1<sup>st</sup> International Conference World of Pavements. Sydney, Australia.
- Van Kirk, J., 2003. Thin is in – The Development of the Caltrans Reduced Thickness Guidelines. Asphalt-Rubber Association, Tempe, Arizona, USA.
- Visser, A.T. & Verhaeghe, M.B., 2000. Bitumen Rubber: Lessons Learned in South Africa. Asphalt Rubber 2000, Proceedings. Vilamoura, Portugal.
- Volle, T.H., 2000. Performance of Rubberized Asphalt Pavements in Illinois. Illinois Department of Transportation. Illinois, USA.
- WAPA, 2006. WAPA Asphalt Pavement Guide. Washington Asphalt Pavement Association. Seattle, Washington, USA.
- Way, G.B. 1998. OGFC Meets CRM: Where the Rubber Meets the Rubber. Arizona Department of Transportation, Materials Group. Arizona, USA.
- Way, G.B., 2000. OGFC Meets CRM: Where the Rubber Meets the Rubber: 12 Years of Durable Success. Asphalt Rubber 2000, Proceedings. Vilamoura, Portugal.
- Way, G.B., 2003. OGFC Meets CRM: Where the Rubber Meets the Rubber: 15 Years of Durable Success. Asphalt Rubber 2003, Proceedings. Brasilia, Brazil.
- WSDOT, 2006. WSDOT Pavement Guide. Washington Department of Transportation. Olympia, Washington, USA.

Zaman, A.A.; Fricke, A.L.; Beatty, C.L., 1995. Rheological Properties of Rubber-Modified Asphalt. *Journal Transportation Engineering, ASCE*, vol.121, nº 6, nov/ dec.

Zanzotto, L. & Kennepohl, G.J., 1996. Development of Rubber and Asphalt Binders by Depolymerization and Devulcanization of Scrap Tires in Asphalt. *Transportation Research Record 1530, TRB*. Washington, D.C., USA.

## Capítulo 5

# MÉTODOS E MATERIAIS UTILIZADOS NA INVESTIGAÇÃO

### 5.1. MÉTODOS UTILIZADOS NA INVESTIGAÇÃO

Neste capítulo são caracterizados os materiais empregues na investigação e são descritas as cinco fases relativas à metodologia experimental, bem como os procedimentos utilizados no estudo dos betumes-borracha e das misturas betuminosas produzidas com este tipo de ligante, de modo a obter uma mistura otimizada para aplicação na construção e na reabilitação de pavimentos. O trabalho está dividido em cinco fases.

Na Fase 1, intitulada **Caracterização dos Materiais Empregues**, foram seleccionados os agregados minerais e o filler (de procedência portuguesa) a serem utilizados na produção de misturas betuminosas. Em seguida foi realizada a análise granulométrica da borracha granulada de pneus produzida no processo ambiente, de procedência brasileira. Posteriormente, o betume convencional (CAP 50/70), de origem brasileira, e os betumes-borracha através do sistema *terminal blend* (com 15% e 20% de borracha incorporada e designados BB15 e BB20, respectivamente), também de origem brasileira, foram avaliados através dos seguintes ensaios de caracterização: (i) penetração; (ii) ponto de amolecimento; (iii) resiliência; (iv) viscosidade, antes e após envelhecimento através do RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*); (v) reologia.

Neste trabalho foram utilizadas granulometrias contínuas (*Asphalt Institute AI* – tipo IV) e descontínuas (ADOT AR-AC – *Asphalt Rubber Asphalt Concrete* e Caltrans ARHM-GG – *Asphalt Rubber Hot Mix – Gap Graded*) para produção das misturas betuminosas com betume-borracha. Estas granulometrias foram as escolhidas tendo em conta o bom desempenho mecânico referenciado na literatura internacional. Além disto, no Brasil, as misturas do tipo *gap graded* com betume-borracha têm sido bastante utilizadas.

A granulometria seleccionada para produção da mistura de referência com betume convencional foi do tipo contínua (Especificação de Serviço DNIT – ES 031, 2006 – Concreto

Asfáltico Usinado à Quente, faixa “C”), tendo sido esta a escolhida por ser a mistura mais utilizada nos pavimentos do Sul do Brasil.

A Fase 2, **Optimização do Betume-Borracha *Continuous Blend***, apresenta as diferentes configurações utilizadas para se obter a optimização do betume-borracha através do sistema *continuous blend*, com o betume CAP 50/70 (nomenclatura BB, significando: **B**etume **B**rasileiro) e a borracha **B**rasileira (nomenclatura bB). As variáveis envolvidas na optimização foram: (i) tempo de digestão; (ii) temperatura de mistura; (iii) percentagem de borracha.

A escolha do betume optimizado através do sistema *continuous blend* foi baseada em critérios de selecção a partir dos ensaios de caracterização dos betumes. Para tal, foram realizados dois estudos: (i) estudo das características dos betumes; (ii) estudo da viscosidade.

O estudo das características dos betumes para optimização do betume-borracha na Fase 2 foi realizado de acordo com a seguinte configuração das variáveis estudadas: (i) percentagem de borracha: 16%, 17% e 20% (em massa de betume-borracha); (ii) tempos de digestão: 45, 60 e 90 minutos; (iii) temperatura de mistura: 180 °C.

Nesta fase fez-se, também, um estudo da viscosidade em que foi verificada a influência do tempo de digestão na viscosidade aparente medida com viscosímetro Brookfield, considerando-se as seguintes variáveis de produção do betume-borracha: (i) percentagem de borracha: 19% (i) tempo de digestão: 30, 60, 90, 120, 150, 180 e 210 minutos; (i) temperatura de mistura: 190 e 200 °C.

Na Fase 3, **Optimização das Misturas Betuminosas**, foram produzidas misturas betuminosas utilizando curvas granulométricas contínuas (*dense graded*) e descontínuas (*gap graded*). As misturas betuminosas foram produzidas com betume convencional (CAP 50/70) e com betume-borracha, obtidos através dos dois tipos de sistemas (*continuous blend* e *terminal blend*), de modo a seleccionar a mistura de melhor desempenho. Nesta investigação, a mistura convencional (sem betume-borracha) foi utilizada como mistura de referência (Faixa “C” da especificação DNIT – ES 031, 2006), com a nomenclatura BBB, significando granulometria **B**rasileira com **B**etume **B**rasileiro. As misturas confeccionadas com betume-borracha foram as seguintes (entre parêntesis estão as nomenclaturas adoptadas):

- granulometria *Asphalt Institute* (AI) tipo IV com betume-borracha *terminal blend* (15% de borracha), (IBB15);
- granulometria *Asphalt Institute* (AI) tipo IV com betume-borracha *continuous blend* otimizado na Fase 2, betume brasileiro (CAP 50/70) + borracha brasileira, (IBBbB);
- granulometria Caltrans ARHM-GG com betume-borracha *terminal blend* (20% de borracha), (CBB20);
- granulometria Caltrans ARHM-GG com betume-borracha *continuous blend* otimizado na Fase 2, betume brasileiro (CAP 50/70) + borracha brasileira, (CBBbB);
- granulometria ADOT AR-AC com betume-borracha *terminal blend* (20% de borracha), (ABB20);
- granulometria ADOT AR-AC com betume-borracha *continuous blend* otimizado na Fase 2, betume brasileiro (CAP 50/70) + borracha brasileira, (ABBbB).

Nas nomenclaturas das misturas, **A** designa granulometria do ADOT; **C** designa granulometria do Caltrans; **I** designa granulometria do AI.

A percentagem de ligante e os parâmetros volumétricos das misturas foram determinados através da metodologia Marshall. Após a definição da percentagem de ligante, foram moldadas, para cada granulometria, duas lajes (placas), das quais foram extraídos provetes para os ensaios de desempenho mecânico (módulo dinâmico, resistência à fadiga e resistência à deformação permanente).

A produção da mistura betuminosa foi realizada numa misturadora mecânica e a compactação, num molde metálico utilizando-se um rolo compactador liso. O processo de compactação durou até que fosse alcançada a baridade aparente obtida na dosagem Marshall. Os provetes foram obtidos através do corte das lajes, tendo-se obtido nove provetes prismáticos (vigas) para os ensaios de resistência à fadiga e de módulo dinâmico e oito provetes cilíndricos (carotes) para ensaios de resistência à deformação permanente.

O desempenho das misturas betuminosas produzidas nesta fase foi avaliado com base nos resultados obtidos nos seguintes ensaios:

- módulo dinâmico: ensaio de flexão alternada em quatro pontos a três temperaturas (15, 20 e 25 °C) e a 7 frequências (10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2; 0,1 Hz);

- resistência à fadiga: ensaio de flexão alternada em quatro pontos, em extensão controlada, à temperatura de 20 °C e a três níveis de extensão de tracção ( $800 \times 10^{-6}$ ,  $400 \times 10^{-6}$  e  $200 \times 10^{-6}$ ), obtidos através de um carregamento sinusoidal;
- resistência à deformação permanente e módulo de corte: ensaio de corte simples repetido a altura constante – RSST-CH (*Repeated Simple Shear Test at Constant Height*), à temperatura de 60 °C.

Os resultados obtidos nesta fase, para as misturas com betume-borracha (*terminal blend e continuous blend*), não foram considerados conclusivos, ou seja, o desempenho obtido para as misturas betuminosas estudadas foi muito idêntico não tendo sido possível identificar uma mistura betuminosa com desempenho claramente superior às outras. Desta forma, foi verificada a necessidade de uma nova optimização do betume-borracha.

Considerando os resultados de desempenho obtidos e com o objectivo de avaliar a qualidade dos materiais brasileiros empregues na optimização do betume-borracha, foram utilizados materiais (betumes convencionais e borracha granulada de pneus) de proveniência portuguesa. O estudo detalhado foi realizado variando-se o tipo de betume e de borracha na produção de novos betumes-borracha e, posteriormente, comparados com o betume-borracha optimizado na Fase 2.

Os betumes convencionais de origem portuguesa PEN 50/70 (nomenclatura BG) e PEN 35/50 (nomenclatura BC) foram caracterizados através dos mesmos ensaios utilizados para o betume CAP 50/70 (brasileiro). A borracha portuguesa (nomenclatura bP), proveniente do processo criogénico, foi caracterizada através da análise granulométrica.

Para comparar os dois tipos de borracha utilizados, obtidas pelo processo ambiental (brasileira) e criogénico (portuguesa) foi realizada uma análise microscópica por varrimento electrónico à superfície dos grãos da borracha.

Para esta segunda optimização foi escolhida a mistura com a granulometria Caltrans (ARHM-GG), tendo sido produzidas misturas betuminosas com as seguintes variações de betume convencional e de borracha para produção dos betume-borracha *continuous blend* (entre parêntesis encontram-se as nomenclaturas adoptadas para os betumes-borracha):

- betume brasileiro (CAP 50/70) + borracha portuguesa (criogénica), (BBbP);
- betume português (PEN 50/70) + borracha portuguesa (criogénica), (BGbP);
- betume português (PEN 50/70) + borracha brasileira (ambiente), (BGbB);
- betume português (PEN 35/50) + borracha portuguesa (criogénica), (BCbP);
- betume português (PEN 35/50) + borracha brasileira (ambiente), (BCbB).

Utilizando a granulometria do Caltrans (ARHM-GG) e os cinco novos betumes-borracha, foram produzidas as seguintes misturas betuminosas:

- granulometria Caltrans (ARHM-GG) com betume-borracha BBbP, (CBBbP);
- granulometria Caltrans (ARHM-GG) com betume-borracha BGbP, (CBGbP);
- granulometria Caltrans (ARHM-GG) com betume-borracha BGbB, (CBGbB);
- granulometria Caltrans (ARHM-GG) com betume-borracha BCbP, (CBCbP);
- granulometria Caltrans (ARHM-GG) com betume-borracha BCbB, (CBCbB).

O critério de decisão de avaliação do desempenho das misturas betuminosas produzidas nesta fase teve como fundamento os resultados obtidos nos ensaios de módulo dinâmico, de resistência à fadiga, de resistência à deformação permanente e módulo de corte.

Com base nos resultados de desempenho obtidos na segunda optimização, também não houve uma mistura que apresentasse um desempenho claramente superior às restantes, em termos de resistência à fadiga e de resistência à deformação permanente, não sendo assim possível nesta fase estabelecer a mistura de melhor desempenho.

Desta forma, na Fase 4, denominada **Melhoria do Desempenho das Misturas**, procurou avaliar-se a influência de uma maior quantidade de ligante na mistura, pelo que foram produzidas misturas com mais 1% de betume que o definido pela metodologia Marshall. As misturas produzidas nesta fase do trabalho foram as seguintes (entre parêntesis estão as nomenclaturas adoptadas):

- *Asphalt Institute* tipo IV com betume-borracha *terminal blend* (15% de borracha), (IBB151);
- *Asphalt Institute* tipo IV com betume-borracha *continuous blend* optimizado na Fase 2, betume brasileiro (CAP 50/70) + borracha brasileira, (IBBbB1);
- Caltrans ARHM-GG com betume-borracha *terminal blend* (20% de borracha), (CBB201);

- Caltrans ARHM-GG com betume-borracha *continuous blend* otimizado na Fase 2, betume brasileiro (CAP 50/70) + borracha brasileira, (CBBbB1);
- ADOT AR-AC com betume-borracha *terminal blend* (20% de borracha), (ABB201);
- ADOT AR-AC com betume-borracha *continuous blend* otimizado na Fase 2, betume brasileiro (CAP 50/70) + borracha brasileira, (ABBbB1).

Considerando o desempenho encontrado com a mistura *Asphalt Institute* tipo IV, foram realizadas ainda as seguintes misturas (as nomenclaturas adoptadas estão entre parêntesis):

- *Asphalt Institute* tipo IV com betume-borracha *continuous blend*, produzido na Fase 3, betume português (PEN-35/50) + borracha portuguesa, (IBCbP);
- *Asphalt Institute* tipo IV com betume-borracha *continuous blend*, produzido na Fase 3, betume português (PEN-35/50) + borracha brasileira, (IBCbB).

Após a avaliação do desempenho destas misturas betuminosas foram seleccionadas cinco misturas, entre as quais a mistura convencional de referência como as que apresentaram melhor desempenho, atendendo aos seguintes critérios:

- desempenho nos ensaios de resistência à fadiga e de resistência à deformação permanente;
- granulometria (*gap graded* e *dense graded*);
- sistemas de obtenção do betume-borracha (*continuous blend* e *terminal blend*).

Estas cinco misturas, com o melhor desempenho, foram objecto de ensaios adicionais, nomeadamente o ensaio de avaliação da resistência à deformação permanente utilizando o equipamento *Wheel Tracking*.

Os provetes (lajetas) para o ensaio *Wheel Tracking*, foram produzidos pela aplicação de 2 camadas (coladas), nomeadamente 3 cm de mistura com betume-borracha assentes sobre 5 cm de mistura de referência, simulando a aplicação da mistura betuminosa com betume-borracha sobre uma camada de mistura betuminosa existente num pavimento quando da sua reabilitação. No caso do provete da mistura de referência, este foi produzido com uma camada única com 8 cm de espessura.

Considerando os resultados obtidos nos ensaios de desempenho, esta fase compreendeu ainda, o dimensionamento de um pavimento novo para diferentes níveis de tráfego, contemplando a camada de desgaste com e sem betume-borracha.

Na Fase 5, **Propagação de Fendas**, foi avaliada a resistência à propagação de fendas recorrendo à modelação numérica por elementos finitos através do programa ANSYS 10.0 (*Multiphysics*) com o modelo de simulação de propagação de fendas desenvolvido por Minhoto (2007). A resistência à propagação de fendas foi obtida conhecendo-se o nível de extensão de Von Mises instalado no material de reforço sobre as fendas, obtido através da modelação numérica do pavimento e respectivo reforço, e a lei de fadiga obtida nesta investigação. Ainda nesta fase, foi igualmente avaliada a resistência à propagação de fendas utilizando o ensaio de laboratório *Reflective Cracking Device*. Nesta fase do trabalho foram utilizadas a cinco misturas seleccionadas na fase 4, permitindo avaliar o desempenho destas misturas na reabilitação de pavimentos.

Como exposto, a metodologia experimental utilizada neste trabalho de investigação é composta por cinco fases que se encontram detalhadas nos seguintes capítulos e ilustradas na Figura 5.1 (a) até à Figura 5.1 (e):

- Capítulo 5 – Fase 1;
- Capítulo 6 – Fases 2 e 3;
- Capítulo 7 – Fases 4;
- Capítulo 8 – Fase 5.

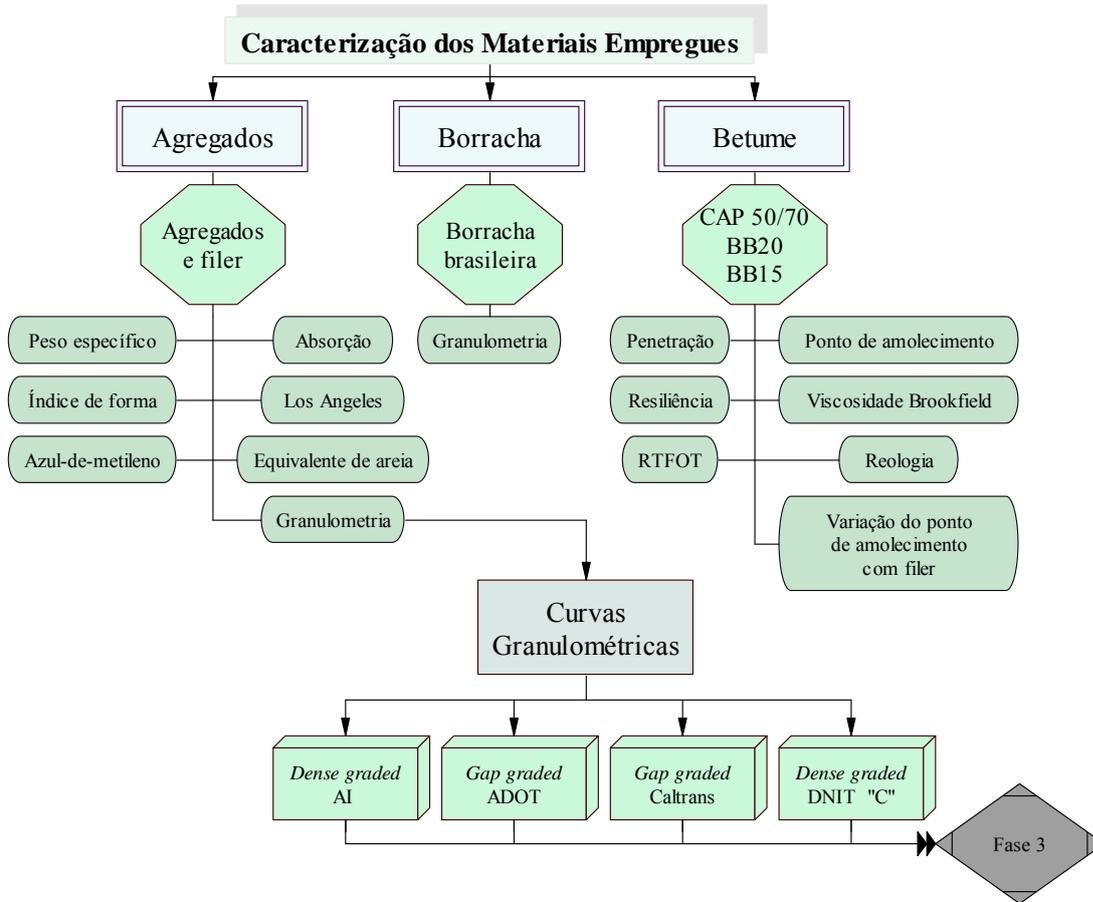


Figura 5.1 (a) – Fase 1: Caracterização dos Materiais Empregues

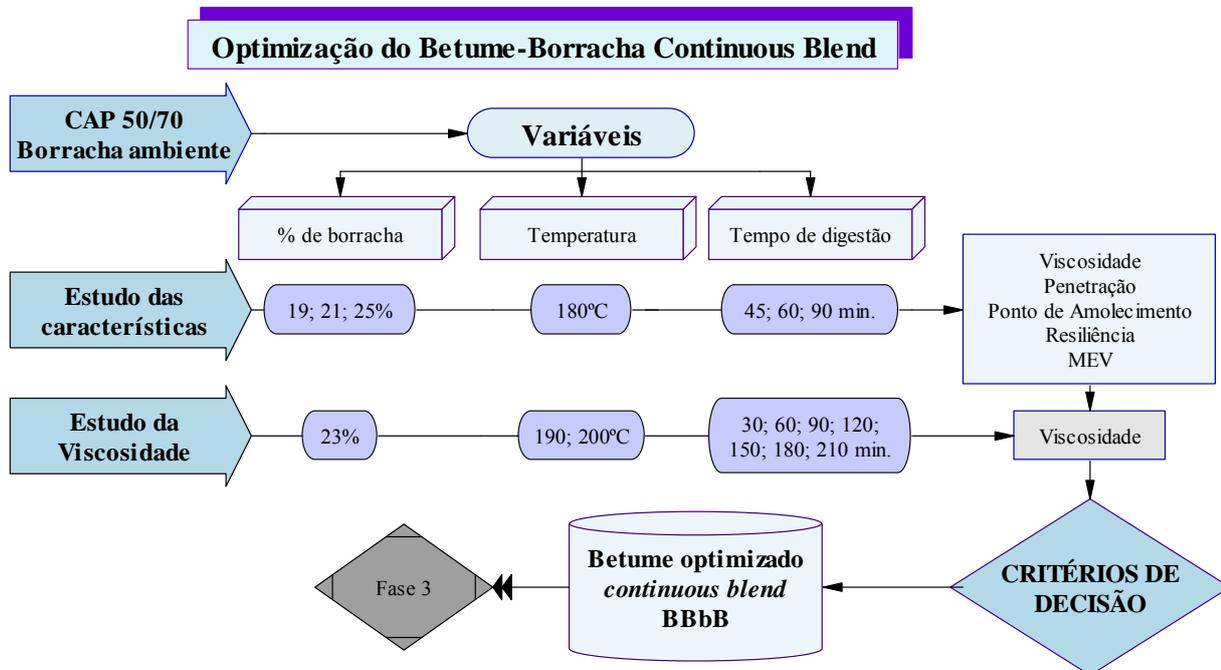


Figura 5.1 (b) – Fase 2: Optimização do Betume-Borracha *Continuous Blend*

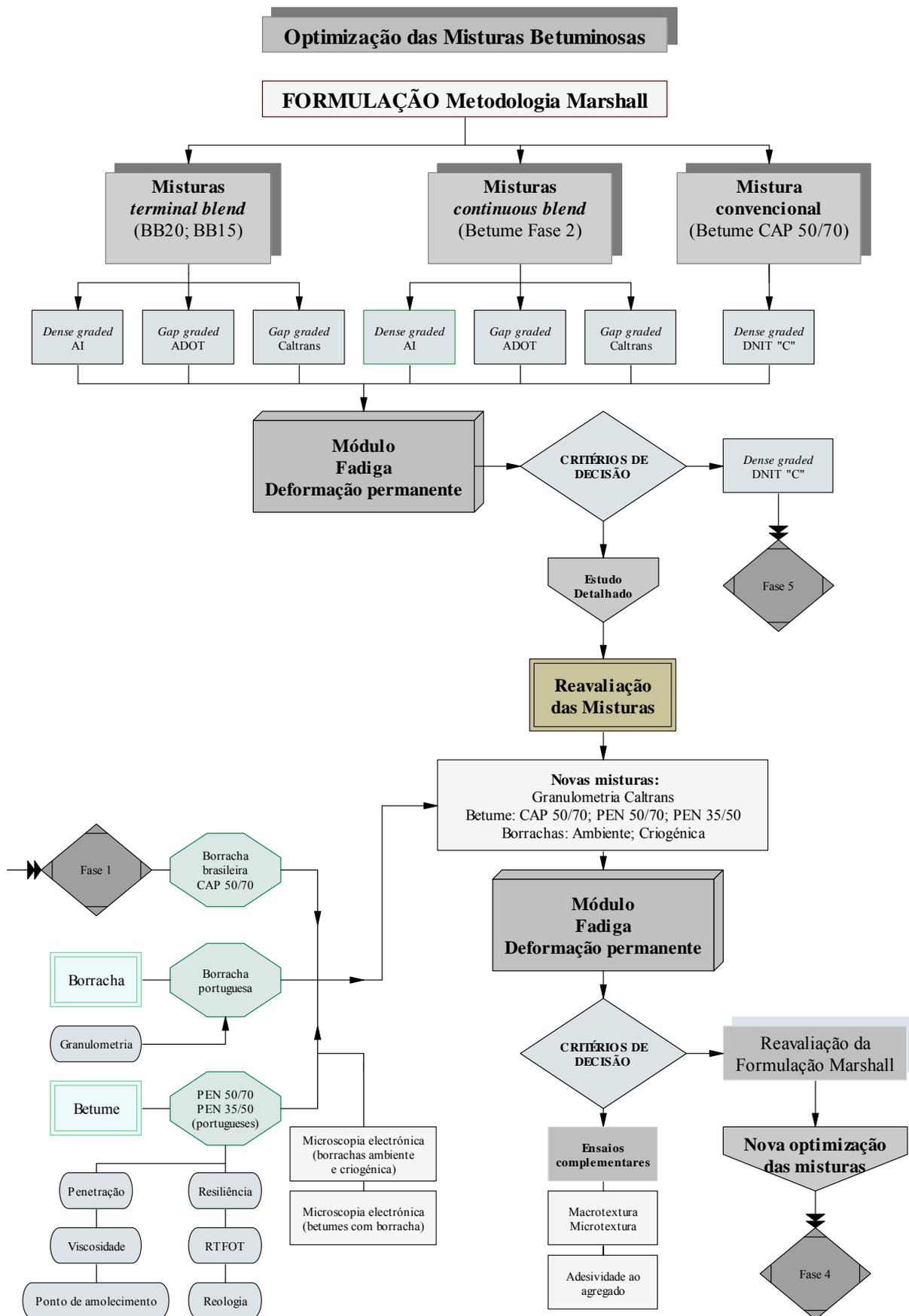


Figura 5.1 (c) – Fase 3: Optimização das Misturas Betuminosas

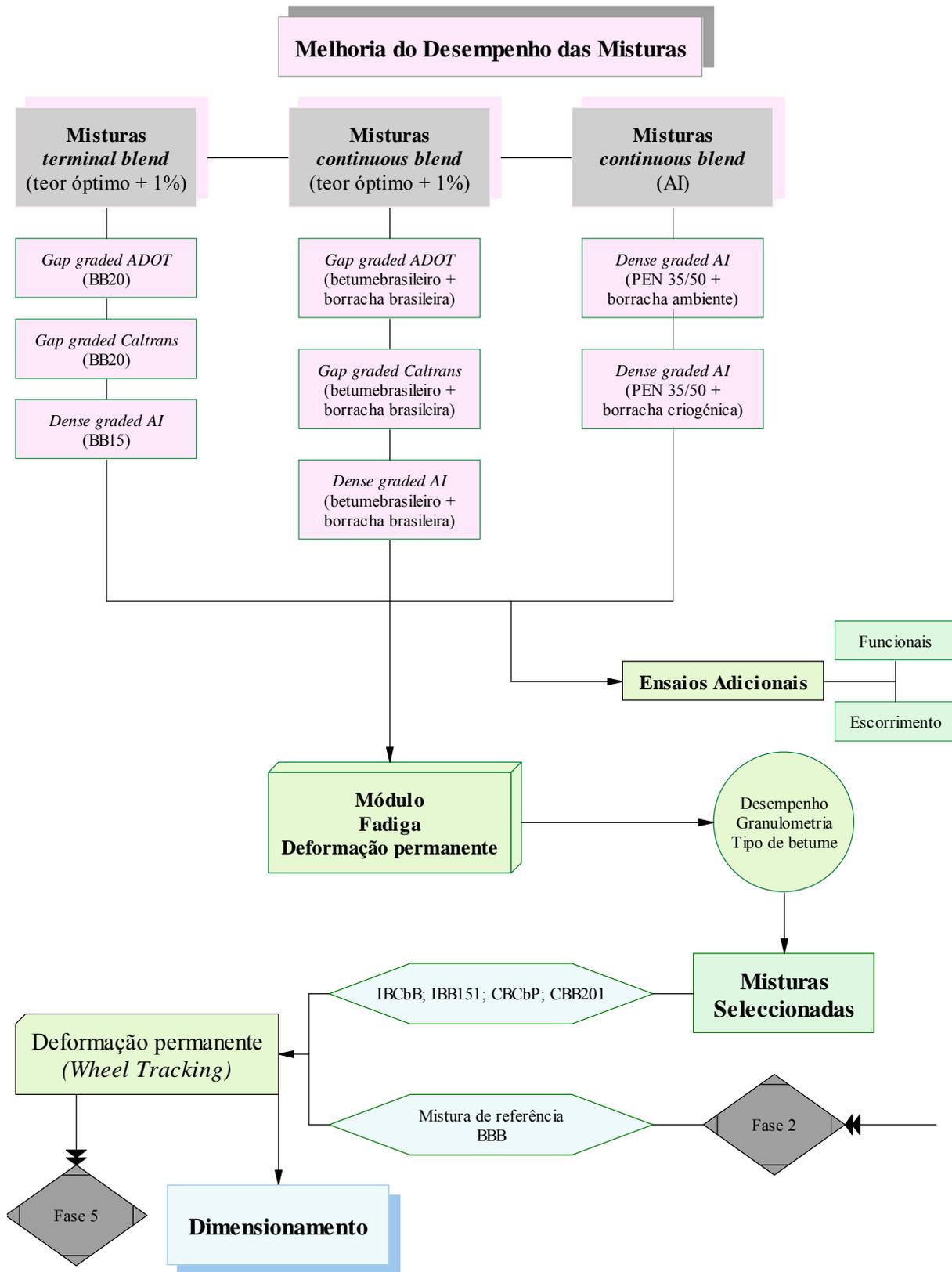


Figura 5.1 (d) – Fase 4: Melhoria do Desempenho das Misturas

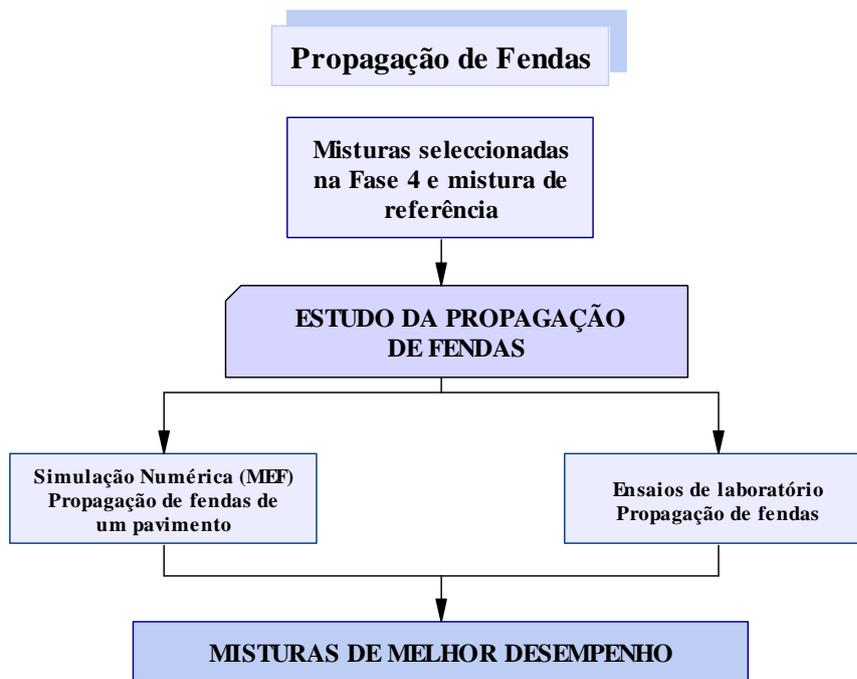


Figura 5.1 (e) – Fase 5: Propagação de Fendas

## 5.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGUES

### 5.2.1. Propriedades tecnológicas dos agregados

Nesta investigação foram utilizados agregados graníticos britados, provenientes da exploração de formações homogéneas de uma pedreira localizada no norte de Portugal (Guimarães), com características físicas e mecânicas semelhantes aos agregados britados encontrados na região de Florianópolis (Estado de Santa Catarina, região Sul do Brasil). Foi utilizado também filer comercial calcário de origem calcítica procedente de Portugal.

Para caracterização das propriedades físicas e mecânicas, os agregados foram recolhidos directamente dos silos da britagem, a partir de diversos pontos, obtendo-se uma amostra representativa dos materiais, de acordo com a norma DNER – PRO 120 (1997), (Colecta de amostras de agregados).

Os agregados minerais utilizados na produção das misturas betuminosas, convencional e com betume-borracha, possuem a seguinte designação granulométrica:

- brita 6/12 – tamanho nominal 6,0 a 12,0 mm;
- brita 4/10 – tamanho nominal 4,0 a 10,0 mm;
- brita 0/4 (pó-de-pedra) – tamanho nominal inferior a 4,0 mm.

A recolha dos agregados foi efectuada uma única vez de modo a garantir a homogeneidade dos materiais granulares durante todo o trabalho de investigação. A redução das amostras em laboratório foi realizada através do esquartelamento (quarteamento).

Para a caracterização e classificação dos agregados foram realizados os seguintes ensaios:

- determinação da resistência ao choque e abrasão na máquina Los Angeles (ASTM C 131);
- determinação do índice de lamelação e alongamento (BS 812 *Part* 105);
- determinação do valor de azul de metileno (NP EN 933-9);
- determinação da massa volúmica de britas (NP EN 581);
- determinação da absorção de britas (NP EN 581);
- determinação da massa volúmica de areias (NP EN 954);
- determinação da absorção de areias (NP EN 954);
- determinação do equivalente de areia (NP EN 933-8);
- análise granulométrica dos agregados (ASTM C 136);
- análise granulométrica do filer (ASTM D 546);
- determinação do aumento do ponto de amolecimento com uso do filer (EN 13179-1).

O ensaio de variação do ponto de amolecimento com a adição do filer foi realizado após a caracterização dos betumes convencionais e o ensaio de adesividade ao agregado na Fase 2. Os resultados da caracterização dos agregados (ensaios físicos e mecânicos) são apresentados no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Caracterização dos agregados

Ensaio	Norma	Especificação	Resultado	
Desgaste Los Angeles	ASTM C 131	30%	26%	
Índice de Lamelação	BS 812	25%	Brita 4/10	23%
			Brita 6/12	12%
Índice de Alongamento	BS 812	25%	Brita 4/10	23%
			Brita 6/12	17%
Valor do Azul-de-metileno	NP EN 933-9	0,8	0,2	
Massa volúmica de britas	NP EN 581	-	Brita 4/10	2,65 g/cm <sup>3</sup>
			Brita 6/12	2,66 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de britas	NP EN 581	2%	Brita 4/10	1,24%
			Brita 6/12	0,88%
Massa volúmica de areias	NP EN 954	-	2,61 g/cm <sup>3</sup>	
Absorção de areias	NP EN 954	2%	0,41%	
Equivalente de areia	NP EN 933-8	60%	60%	
Análise granulométrica	ASTM C 136	(i)	-	
Análise granulométrica filer	ASTM D 546	(i)	-	

Observação referente ao Quadro 5.1:

- (i) A combinação da granulometria dos agregados e do filer satisfaz as especificações adoptadas para as curvas granulométricas utilizadas no estudo (*Asphalt Institute*, Caltrans, ADOT e DNIT).

De acordo com os resultados apresentados no Quadro 5.1, os agregados satisfazem as especificações para utilização em misturas betuminosas.

A análise granulométrica do filer (cal calcítica) está apresentada no Quadro 5.2 de acordo com a especificação ASTM D 242 (1995).

Quadro 5.2 – Distribuição granulométrica do filer

Peneiros		Especificação	Filer utilizado
nº	mm	% passante	
30	0,60	100 – 100	100
50	0,30	95 – 100	95
100	0,15	-	80
200	0,075	70 – 100	70

O Quadro 5.3 apresenta a distribuição granulométrica das britas 6/12 mm, 4/10 mm, e do pó de pedra, 0/4 mm. A Figura 5.2 apresenta as curvas de distribuição granulométrica determinada para os agregados e filer.

Quadro 5.3 – Distribuição granulométrica dos agregados

Peneiros		Pó (0/4 mm)	Brita (4/10 mm)	Brita (6/12 mm)
pol/nº	mm	% passante	% passante	% passante
3/4"	19,10	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,70	100,00	100,00	90,77
3/8"	9,50	100,00	96,99	49,73
nº 4	4,75	99,15	20,52	10,17
nº 8	2,36	80,33	4,79	5,90
nº 10	2,00	75,60	4,20	5,36
nº 20	0,84	53,36	2,92	3,89
nº 30	0,60	44,96	2,64	3,52
nº 40	0,43	36,51	2,36	3,11
nº 50	0,30	29,06	2,10	2,72
nº 80	0,18	19,29	1,66	2,10
nº 100	0,15	15,91	1,49	1,86
nº 200	0,075	7,87	0,95	1,14

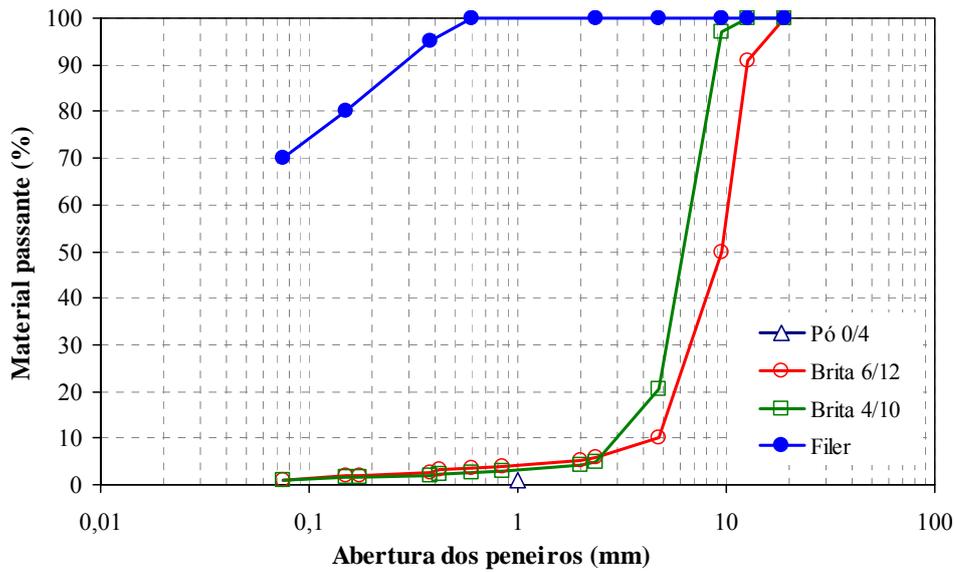


Figura 5.2 – Curva granulométrica dos agregados

### 5.2.2. Borracha de pneus

Na Fase 1 foi utilizada a borracha de pneus obtida através do processo ambiente denominada borracha micronizada, proveniente do Brasil, sendo do mesmo tipo da utilizada para produção dos betumes-borracha através do sistema *terminal blend*, empregues nestes estudo. No Brasil,

prioritariamente são utilizadas borrachas provenientes do processo ambiente para modificação do betume.

A norma ASTM D 6114 (1997) fixa as especificações que a borracha de pneus deve possuir para ser adicionada para a modificação do betume (Quadro 5.4). Esta norma preconiza ainda que a borracha granulada, obtida por qualquer processo, necessita estar seca, solta e não produzir espuma quando adicionada ao betume.

Quadro 5.4 – Especificações da borracha de pneus (ASTM 6114, 1997)

Propriedades físicas	Especificação
Teor em água (%)	< 0,75 (por massa)
Teor de fibras têxteis (%)	< 0,5 (por massa)
Teor de fibras metálicas (%)	< 0,01 (por massa)
Outros contaminantes	< 0,2 (por massa)
Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	11,5 ± 0,5

A especificação granulométrica adoptada para classificação da borracha (Quadro 5.5) foi a descrita pelo ADOT, *Rubber Type B, Construction Manual Section 1009* (ADOT<sub>B</sub>, 2005).

Quadro 5.5 – Especificação granulométrica ADOT, *Rubber Type B*

Peneiros		Especificação
nº	mm	% passante
10	2,00	100 – 100
16	1,18	65 – 100
30	0,60	20 – 100
50	0,30	0 – 45
200	0,075	0 – 5

A secagem da amostra de borracha, com aproximadamente 100 g, para realização da análise granulométrica foi realizada em estufa a  $60 \pm 0,5$  °C até massa constante. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM C 136 (1996), adaptada com as recomendações do *Greenbook* (2000), *Crumb Rubber Modifier (CRM) gradations – Section 203-11.2.3.1*. Os teores de fibras têxteis e de partículas metálicas foram determinados durante a peneiração. A análise granulométrica da borracha ambiente mostrou que a mesma está enquadrada na borracha tipo “B” do ADOT (ADOT<sub>B</sub>, 2005).

O valor da superfície específica foi calculado de acordo com a Equação 5.1 (Santana, 1992), utilizando-se para a massa específica dos grãos de borracha o valor de 1,15 kg/m<sup>3</sup> (ADOT<sub>B</sub>, 2005 e ASTM D 6114, 1997):

$$\xi = \sum_i \left( \frac{6}{d_{i-j} \times \rho} \right) \times P_{i-j} \tag{5.1}$$

onde:

$\xi$  = superfície específica (m<sup>2</sup>/kg);

$P_{i,j}$  = percentagem de material retida entre os peneiros i e j;

$d_{i,j}$  = diâmetro médio das partículas retidas entre os peneiros i e j (m);

$\rho$  = massa específica dos grãos de borracha (kg/m<sup>3</sup>).

O diâmetro médio das partículas<sup>1</sup>, entre peneiros, foi calculado através da Equação 5.2 (Santana, 1992):

$$d_{i-j} = \sqrt{d_i \times d_j} \tag{5.2}$$

onde:

$d_i$  = abertura do peneiro i (m);

$d_j$  = abertura do peneiro j (m).

O Quadro 5.6 apresenta os resultados obtidos da caracterização da borracha ambiente. Os resultados obtidos para os teores em água e de fibras mostram que a borracha ambiente satisfaz as especificações da ASTM D 6114 (1997).

Quadro 5.6 – Características da borracha ambiente

Propriedades físicas	Borracha ambiente
Teor em água (%)	0,3
Teor de fibras têxteis (%)	-
Teor de fibras metálicas (%)	-
Outros contaminantes	-
Superfície específica (m <sup>2</sup> /kg)	19,27

<sup>1</sup> O diâmetro médio entre dois diâmetros é dado através da média geométrica.

### 5.2.3. Caracterização dos betumes

O Quadro 5.7 apresenta o resumo e as normas correspondentes dos ensaios utilizados nesta investigação.

Quadro 5.7 – Ensaios e as normas para betumes

Ensaio	Norma	Propósito
Penetração	ASTM D 5	O ensaio consiste em determinar a profundidade (em décimos de milímetro) através da penetração, com o equipamento penetrómetro, que uma agulha padrão penetra verticalmente em uma amostra de betume em condições específicas: temperatura (25 °C); carga (100 g); tempo (5 s).
Ponto de Amolecimento (Método anel e bola)	ASTM D 36	No ensaio anel e bola, é a temperatura lida, correspondente à mais baixa temperatura, no momento em que uma esfera metálica padronizada atravessa o anel (padronizado), cheio com o material betuminoso, toca uma placa de referência após ter percorrido uma distância de 25,4 mm em condições especificadas.
Viscosidade aparente (Viscosímetro Brookfield)	ASTM D 2196	O viscosímetro rotacional Brookfield possui cilindros coaxiais e mede a viscosidade aparente de um betume através da torção necessária para rodar um veio ( <i>spindle</i> ) imerso num provete de betume quente à velocidade constante.
Resiliência	ASTM D 5329	No equipamento penetrómetro, introduz-se a ferramenta “bola”. O ensaio consiste na penetração da ferramenta “bola” durante 10 segundos em um amostra de betume. Posteriormente deixa-se o provete recuperar a penetração durante 20 segundos e faz-se a leitura final.

O ensaio de resiliência é conduzido com o equipamento penetrómetro (ASTM D 5, 1997) excepto pela substituição da agulha de penetração por uma ferramenta “bola” de penetração (massa de  $75 \pm 0,01$  g) e o provete é o mesmo utilizado no ensaio de penetração. A norma do ensaio é a ASTM D 5 (1996) (*Standard Test Method for Sealants and Fillers, Hot Applied, For Joints and Cracks in Asphaltic and Portland Cement Concrete Pavements*) e permite identificar a recuperação elástica de um betume.

O provete é colocado em um banho à temperatura de  $25 \pm 0,1$  °C durante 2 horas imediatamente antes do ensaio. A superfície do provete é seca e coberta com uma fina camada de talco. No equipamento penetrómetro, introduz-se a ferramenta “bola”, de forma que esta faça contacto com a superfície do provete, mas não penetre na superfície e assim, é realizada a leitura inicial. Posteriormente, zera-se a leitura do mostrador e inicia-se o ensaio através da penetração da ferramenta “bola” durante 10 segundos. Após este tempo, durante 5 segundos, retornar o medidor ao valor zero. Finalmente, deixa-se o provete recuperar a penetração durante 20 segundos e faz-se a leitura final (ASTM D 5, 1996).

O valor da recuperação elástica é calculado através da Equação 5.3:

$$R = P + 100 - F \quad (5.3)$$

onde:

R = recuperação elástica (%);

P = leitura inicial (0,1 mm);

F = leitura final (0,1 mm).

A Figura 5.3 apresenta o posicionamento do equipamento bola e o provete após o ensaio de resiliência.



Figura 5.3 – Provete no ensaio de resiliência

As propriedades dos sistemas betumes-borracha podem apresentar-se compatíveis ou incompatíveis. A compatibilidade depende do tipo de borracha e do tipo de betume e está directamente relacionada com o desempenho que as misturas betuminosas preparadas com este ligante apresentarão em serviço. A incompatibilidade resulta em sistemas pobres no que se refere às propriedades mecânicas das misturas. Assim, é necessário avaliar as propriedades de um betume convencional, base do betume-borracha, através dos ensaios de caracterização para prever o seu desempenho para produção de betumes-borracha.

Nesta fase, foi realizada a caracterização do betume convencional CAP-20<sup>2</sup> e dos betumes-borracha provenientes do sistema *terminal blend*, de procedência brasileira.

Neste trabalho foram adoptadas as seguintes nomenclaturas para designar os betumes:

- CAP-20, nomenclatura BB (Betume Brasileiro Convencional);

<sup>2</sup> O betume CAP-20 corresponde ao CAP 50/70.

- betume obtido através do sistema *terminal blend* com 20% de borracha, e denominado como BB20 (Betume Brasileiro com 20% de borracha);
- betume obtido através do sistema *terminal blend* com 15% de borracha, e denominado de BB15 (Betume Brasileiro com 15% de borracha);

### **Betume CAP-20**

Na época do início da investigação (Setembro/2004), estava em vigor a especificação DNER - EM 204 (1995) para classificação de betumes produzidos no Brasil. O betume CAP-20 foi o escolhido porque correspondia ao ligante mais utilizado na produção de misturas betuminosas convencionais em obras de pavimentação no Sul do Brasil. Além disto, o betume-borracha *terminal blend*, utilizado neste trabalho, foi produzido com o betume base CAP-20.

O betume convencional CAP-20 foi caracterizado na condição virgem e após envelhecimento no RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) através dos seguintes ensaios: (i) penetração; (ii) ponto de amolecimento pelo método do anel e bola; (iii) viscosidade aparente (viscosímetro Brookfield); (vi) resiliência.

O Quadro 5.8 apresenta os resultados de caracterização do betume convencional CAP-20 empregue no estudo e a especificação DNER - EM 204 (1995).

Considerando a mudança da especificação brasileira, foram realizados ensaios adicionais de viscosidade aparente a três temperaturas (135, 150 e 177 °C) para classificação do CAP-20 de acordo com a nova especificação. O CAP-20 se enquadrou na nova especificação dos betumes (DNIT – EM 095, 2006) como um CAP 50/70, como indicado no Quadro 5.9.

Quadro 5.8 – Características do BB (CAP-20, vigente até Julho/2005)

Ensaio	Norma	Especificação CAP-20	Resultado
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)	ASTM D 5	50 mín.	51,5
Ponto de amolecimento <sup>(i)</sup> (°C)	ASTM D 36	-	51,5
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 175 °C	ASTM D 2196	-	127
Resiliência (%)	ASTM D 5329	-	0
RTFOT 163 °C, 85 minutos	ASTM D 2872		
Varição em massa (% de massa) máx.		-	0,3
Aumento do ponto de amolecimento (°C) máx.		-	4,3
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 175 °C		-	95,8
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)		-	22,3
Penetração retida (%) mín.		-	43,3

Observações referentes ao Quadro 5.8:

(i) Método anel e bola;

(ii) Viscosímetro Brookfield, veio 21, 20 rpm.

Quadro 5.9 – Comparação entre o CAP-20 e o CAP 50/70 (nova especificação)

Ensaio	Norma	Especificação CAP 50/70	Resultado
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)	ASTM D 5	50 - 70	51,5
Ponto de amolecimento <sup>(i)</sup> (°C)	ASTM D 36	46 mín.	51,5
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 135 °C	ASTM D 2196	mín. 274	580
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 150 °C	ASTM D 2196	mín. 112	150
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 177 °C	ASTM D 2196	57 - 285	112
Resiliência (%)	ASTM D 5329	-	0
RTFOT 163 °C, 85 minutos	ASTM D 2872		
Varição em massa (% de massa) máx.		0,5	0,3
Aumento do ponto de amolecimento (°C) máx.		8	4,3
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 175 °C		-	95,8
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)		-	22,3
Penetração retida (%) mín.		55	43,3

Observações referentes ao Quadro 5.9:

(i) Método anel e bola;

(ii) Viscosímetro Brookfield, veio 21, 20 rpm.

O estudo comparativo mostrou que o betume CAP-20 pode ser enquadrado nas especificações vigentes, apesar de não atender ao requisito de penetração retida mínima. No entanto, a perda de massa ficou dentro do limite especificado, assim como o aumento do ponto de amolecimento. O ensaio de resiliência foi realizado tendo em conta que este betume foi o

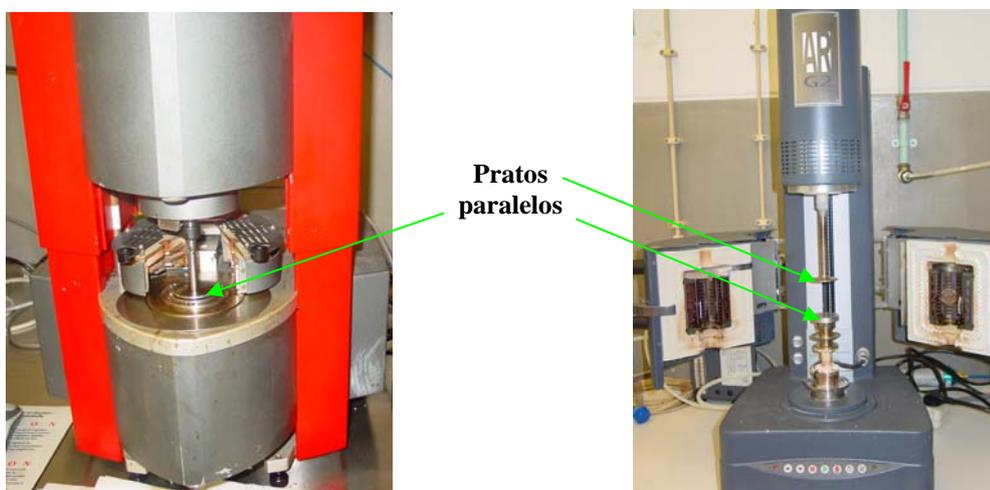
utilizado de base para fabricação dos betumes-borracha. Assim, o CAP-20 passa agora a ser denominado de acordo com a nova classificação como CAP 50/70 e com a nomenclatura BB.

Adicionalmente foram realizados ensaios reológicos para verificação do comportamento dos betumes nas temperaturas de manuseio e fabrico. O reómetro utilizado foi o *Reologica StressTech HR* de pratos paralelos (Figura 5.4) com 40 mm de diâmetro e espessura da amostra de 8 mm. Nesta configuração a deformação não é homogénea e o material fica submetido a uma deformação máxima junto à periferia e nula no centro.



Figura 5.4 – Reómetro *Reologica StressTech HR* utilizado na investigação

As Figuras 5.5 a 5.7 ilustram a sequência utilizada para execução do ensaio de reologia. A Figura 5.5 apresenta o reómetro aberto no qual é possível visualizar os pratos paralelos.



(a) fechados

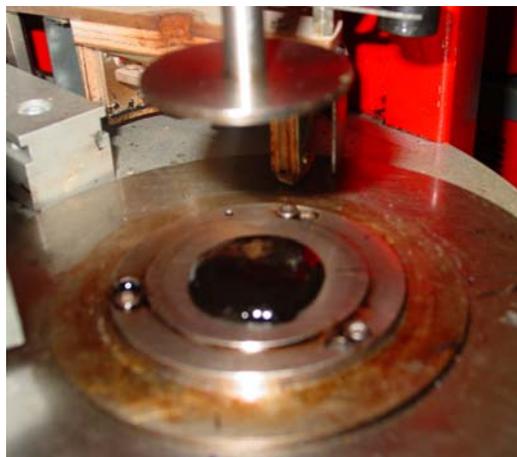
(b) abertos

Figura 5.5 – Posição dos pratos paralelos do reómetro, antes do ensaio

A Figura 5.6 mostra o posicionamento dos pratos paralelos (a) e a colocação da amostra a ser ensaiada (b).



(a) pratos paralelos



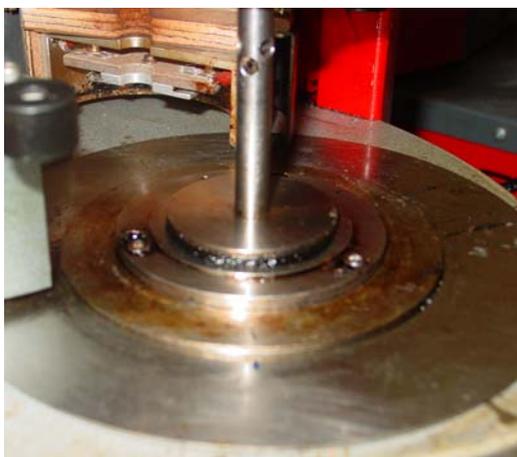
(b) colocação da amostra

Figura 5.6 – Posicionamento dos pratos e colocação da amostra de betume

A Figura 5.7 apresenta em (a) a junção dos pratos paralelos com a amostra intercalada, e devido à elevada temperatura do betume, este tende a fluir. Após a limpeza do excesso de material, ilustrada em (b), dá-se início a realização do ensaio.



(a) junção dos pratos com a amostra



(b) após a limpeza do excesso de material

Figura 5.7 – Amostra posicionada entre os pratos paralelos

Os ensaios foram realizados através de medições dinâmicas, ou seja, uma deformação oscilatória de natureza sinusoidal, de baixa amplitude, em condições controladas. Assim, para o betume convencional CAP 50/70 foram realizados varrimentos a 25 frequências entre 0,01 e 100 Hz, onde é obtido o regime linear do material, para posteriormente proceder à realização

do ensaio de oscilação. Os ensaios foram realizados em temperaturas de 20 °C a 60 °C. Na tentativa de simular o comportamento reológico durante a confecção das misturas, também foi utilizada a temperatura de 180 °C. No entanto, para temperaturas elevadas não foi possível avaliar com clareza os parâmetros  $G^*/\text{sen}\delta$  e  $G.\text{sen}\delta$ , tendo em conta que estes, relativos à deformação permanente e fadiga respectivamente, foram estabelecidos para temperaturas de serviço dos pavimentos (20 °C a 60 °C). Os resultados encontrados serão avaliados comparativamente aos dos outros betumes estudados no Capítulo 6.

### **Betume-borracha *terminal blend***

A norma ASTM D 6114 (1997) especifica as características físicas para o betume-borracha conforme apresentado no Quadro 5.10. Relativamente aos tipos de betume-borracha (I, II ou III), a escolha está relacionada com a temperatura da região em que o material será aplicado. O tipo I é recomendado para regiões com temperaturas entre -1 °C e 43 °C (ou superiores); o tipo II deve ser utilizado em regiões com temperaturas que variam entre -9 °C e 43 °C; o tipo III é indicado para regiões com temperaturas entre -9 °C e 27 °C (ou inferiores). No caso da região Sul do Brasil, o betume-borracha indicado seria do tipo II.

Quadro 5.10 – Características do betume-borracha (ASTM D 6114, 1997)

Especificação	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Viscosidade aparente 175 °C (cP)	1500 (mín.) 5000 (máx.)	1500 (mín.) 5000 (máx.)	1500 (mín.) 5000 (máx.)
Penetração, 25 °C, 100 g, 5 s (0,1 mm)	25 a 75	25 a 75	50 a 100
Ponto de amolecimento (°C) mín.	57,2	54,4	51,7
Ponto de fulgor (°C) mín.	232,2	232,2	232,2
Resiliência (%)	25	20	10

Assim, como o betume convencional CAP 50/70, os betumes-borracha através do sistema *terminal blend* foram igualmente caracterizados através dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento pelo método do anel e bola, viscosidade aparente (viscosímetro Brookfield) e resiliência, antes e após envelhecimento com o ensaio RTFOT.

Os Quadros 5.11 e 5.12 apresentam os resultados de caracterização dos betume-borracha *terminal blend* com 20% de borracha (BB20) e com 15% de borracha (BB15), respectivamente, sendo a percentagem de borracha calculada a partir da massa do

betume-borracha. Neste caso, a especificação seguida é a ASTM D 6114 (1997), para o tipo II.

A norma ASTM D 6114 (1997) especifica um valor mínimo de 20% (tipo II) para o parâmetro resiliência. Outros organismos rodoviários e especificações também exigem um valor mínimo deste parâmetro.

O *Greenbook* especifica um valor mínimo de 18% no valor de resiliência para betumes-borracha (Greenbook, 2000). O ADOT especifica valores mínimos de resiliência em função do tipo de betume-borracha, sendo o valor mínimo exigido de 15% (ADOT, 2005<sub>A</sub>). O Caltrans prevê o valor mínimo especificado em função do tempo de digestão, sendo 18% o valor mínimo prescrito (Caltrans, 2003).

Quadro 5.11 – Características do BB20

Ensaio	Norma	Especificação	Resultado
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)	ASTM D 5	25 a 75	40,0
Ponto de amolecimento <sup>(i)</sup> (°C)	ASTM D 36	54,4 mín.	68,0
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 175 °C	ASTM D 2196	1500 mín.	2179
Resiliência (%)	ASTM D 5329	20	28,0
RTFOT 163 °C, 85 minutos	ASTM D 2872		
Varição em massa (% de massa) máx.		0,6	0,3
Aumento do ponto de amolecimento (°C)		-	1,0
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)		-	28,8
Penetração retida (%)		-	72,0
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 175 °C		-	5350
Resiliência (%)		-	39,0
RTFOT 175 °C, 85 minutos	ASTM D 2872		
Varição em massa (% de massa) máx.		0,6	0,4
Aumento do ponto de amolecimento (°C)		-	2,9
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)		-	28,0
Penetração retida (%)		-	73,8
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 175 °C		-	5350
Resiliência (%)		-	45,5

Observações referentes ao Quadro 5.11:

- (i) Método anel e bola;
- (ii) Viscosímetro Brookfield, veio 27, 20 rpm.

Quadro 5.12 – Características do BB15

Ensaio	Norma	Especificação	Resultado
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)	ASTM D 5	25 a 75	42,0
Ponto de amolecimento <sup>(i)</sup> (°C)	ASTM D 36	54,4 mín.	67,7
Viscosidade aparente <sup>(iii)</sup> (cP) a 175 °C	ASTM D 2196	1500 mín.	1644
Resiliência (%)	ASTM D 5329	20	33,0
RTFOT 163 °C, 85 minutos			
Varição em massa (% de massa) máx.		0,6	0,3
Aumento do ponto de amolecimento (°C)	ASTM D 2872	-	2,9
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)		-	25,3
Penetração retida (%)		-	60,2
Viscosidade aparente <sup>(iii)</sup> (cP) a 175 °C		-	1962
Resiliência (%)		-	36,0
RTFOT 175 °C, 85 minutos			
Varição em massa (% de massa) máx.		0,6	0,4
Aumento do ponto de amolecimento (°C)	ASTM D 2872	-	4,3
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)		-	26,2
Penetração retida (%)		-	62,4
Viscosidade aparente <sup>(iii)</sup> (cP) a 175 °C		-	1862
Resiliência (%)		-	34,5

Observações referentes ao Quadro 5.12:

- (i) Método anel e bola;
- (ii) Viscosímetro Brookfield, veio 27, 20 rpm.

De acordo com os Quadros 5.11 e 5.12, os dois betumes, BB20 e BB15, atendem às especificações constantes na ASTM D 6114 (1997) (Quadro 5.10). Comparativamente, o betume BB20 apresentou um valor de penetração inferior ao betume BB15, o que é explicado por conter uma maior quantidade de borracha incorporada, 20% em relação a 15%. Pela mesma razão, o betume BB20 possui uma viscosidade mais elevada do que o betume BB15, que pode reflectir em uma menor trabalhabilidade quando da produção de misturas betuminosas.

Relativamente ao ponto de amolecimento, o resultado de ambos foi praticamente igual. Comparativamente ao betume convencional BB (CAP 50/70) que apresentou um ponto de amolecimento de 51,5 °C (Quadro 5.9) é possível demonstrar a melhoria desta propriedade, em mais de 15 °C, quando se adiciona a borracha ao betume.

O mesmo comportamento foi observado no parâmetro resiliência, que fornece um indicativo da recuperação elástica do material. Enquanto que o ensaio de resiliência com o betume convencional não mostrou recuperação elástica neste ensaio, a incorporação da borracha de pneus alterou este comportamento (28% para ambos os betume-borracha).

A norma ASTM D 6114 (1997) especifica os valores do envelhecimento para o ensaio TFOT (*Thin Film Oven Test*), mas admite que o ensaio seja substituído pelo RTFOT. Neste caso, foram seguidas as especificações do Caltrans (Caltrans, 2003) que especifica a perda de massa máxima de 0,6%.

Os resultados do ensaio de envelhecimento RTFOT mostraram que:

- o pequeno valor de aumento do ponto de amolecimento para os dois betumes-borracha demonstrou que, apesar da severidade do ensaio RTFOT, o envelhecimento não afectou de forma significativa estes betumes;
- a pequena perda de massa mostrou que a modificação dos betumes assegurou a fixação dos óleos maltenos e aromáticos durante o processo de envelhecimento;
- a penetração retida foi maior para o betume-borracha com uma maior percentagem de borracha, ou seja, o betume BB20 endureceu menos que o betume BB15 no ensaio de envelhecimento;
- ocorreu um aumento da resiliência (recuperação elástica) devido ao facto de que o aquecimento associado à fina película formada durante este ensaio, proporcionou uma interacção entre as moléculas de borracha e de betume (continuidade do processo de fusão), melhorando esta propriedade.

O ensaio de envelhecimento RTFOT foi realizado, ainda, na temperatura de 175 °C, de modo a avaliar o envelhecimento dos betumes em temperaturas próximas daquelas de produção das misturas betuminosas. Comparativamente, os resultados do ensaio RTFOT nas duas temperaturas (163 °C e 175 °C), observou-se que com o aumento da temperatura de ensaio, o betume-borracha BB20 apresentou um aumento no ponto de amolecimento, sem variação da viscosidade aparente, enquanto que o betume-borracha BB15 obteve o aumento do ponto de amolecimento, uma pequena redução de viscosidade e de resiliência. Tendo em conta os resultados obtidos, o betume-borracha BB20 apresentou uma maior resistência ao envelhecimento, assim como uma mais elevada capacidade de recuperação elástica.

A análise reológica dos betumes-borracha do *tipo terminal blend* foi feita da mesma maneira que o betume convencional CAP 50/70, mas para varrimentos a 25 frequências entre 0,01 Hz e 10 Hz, em temperatura de 20 °C a 60 °C. Os resultados serão comparados no Capítulo 6.

Tendo em conta avaliar a melhoria da incorporação do filer ao betume, comparativamente à incorporação da borracha, foi realizado o ensaio de variação do ponto de amolecimento com o uso do filer (EN 13179-1). Para tal, foi incorporado ao CAP 50/70 4% e 6% de filer e realizados os ensaios de penetração e de ponto de amolecimento. Os resultados estão apresentados no Quadro 5.13.

Quadro 5.13 – Efeito da adição do filer na rigidificação do betume

Betume	Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm) (ASTM D 5)	Ponto de amolecimento (°C) (ASTM D 36)
CAP 50/70	51,5	51,5
CAP 50/70 + 4% de filer	33,0	53,0
CAP 50/70 + 6% de filer	36,0	55,0

De acordo com o Quadro 5.13, a incorporação do filer calcário ao betume puro produziu um aumento do ponto de amolecimento, elevando sua rigidificação, como mostra o valor da penetração. No entanto, a introdução da borracha de pneus ao betume promove uma melhoria das propriedades do betume puro mais evidente quando comparada a incorporação do filer.

#### 5.2.4. Granulometria das misturas

As misturas betuminosas estudadas foram produzidas com as granulometrias contínua (*dense graded*) e descontínua (*gap graded*). Para os dois tipos de granulometria, foram produzidas misturas betuminosas com betume convencional e com betume-borracha.

##### Granulometrias contínuas (*dense graded*)

As granulometrias contínuas utilizadas foram as seguintes:

- Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ), DNIT Faixa “C” (DNIT – ES 031, 2006);
- *Asphalt Institute* AI tipo IV (AI, 1989).

O Quadro 5.14 apresenta o fuso granulométrico da especificação DNIT – ES 031 (2006) para o Concreto Asfáltico Usinado a Quente, DNIT Faixa “C”, e a granulometria da curva utilizada, os quais estão ilustrados na Figura 5.8. Esta granulometria é usualmente utilizada no Sul Brasil na produção de misturas betuminosas com betume convencional.

Quadro 5.14 – Especificação e granulometria da curva DNIT Faixa “C” utilizada

Peneiros		Especificação	Curva utilizada
pol/nº	mm	% passante	% passante
3/4"	19,00	100 – 100	100,00
1/2"	12,70	80 – 100	97,51
3/8"	9,50	70 – 90	85,52
nº 4	4,75	44 – 72	51,56
nº 10	2,00	22 – 50	35,95
nº 40	0,42	8 – 26	19,15
nº 80	0,18	4 – 16	11,62
nº 200	0,075	2 – 10	6,14

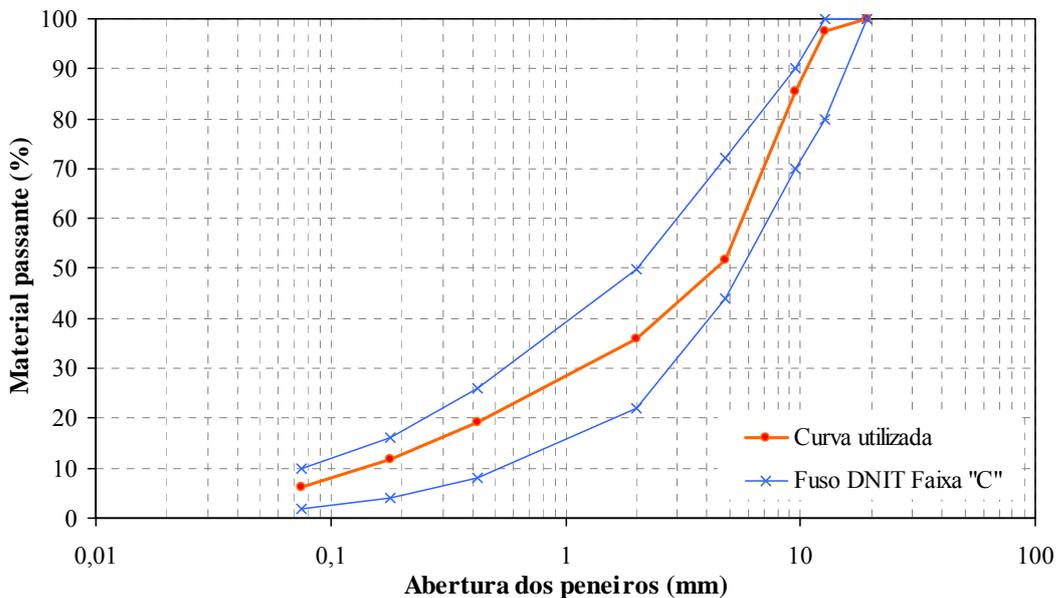


Figura 5.8 – Curva granulométrica utilizada e fuso granulométrico DNIT Faixa “C”

A granulometria densa especificada pelo *Asphalt Institute*, AI tipo IV, de acordo com o *The Asphalt Handbook Manual Series nº 4* (AI, 1989), foi a utilizada para produção de misturas betuminosas com o betume-borracha BB15 (*terminal blend* com 15% de borracha). O Quadro 5.15 apresenta o fuso granulométrico especificado para a granulometria *Asphalt Institute* e a granulometria da curva utilizada, os quais estão ilustrados na Figura 5.9.

Quadro 5.15 – Especificação e granulometria da curva AI, tipo IV utilizada

Peneiros		Especificação	Curva utilizada
pol./nº	mm	% passante	% passante
3/4"	19,0	100 – 100	100
1/2"	12,7	80 – 100	97,69
3/8"	9,5	70 – 90	86,80
nº 4	4,8	50 – 70	60,42
nº 8	2,4	35 – 50	46,45
nº 30	0,6	18 – 29	27,36
nº 50	0,3	13 – 23	18,79
nº 100	0,15	8 – 16	11,29
nº 200	0,075	4 – 10	6,60

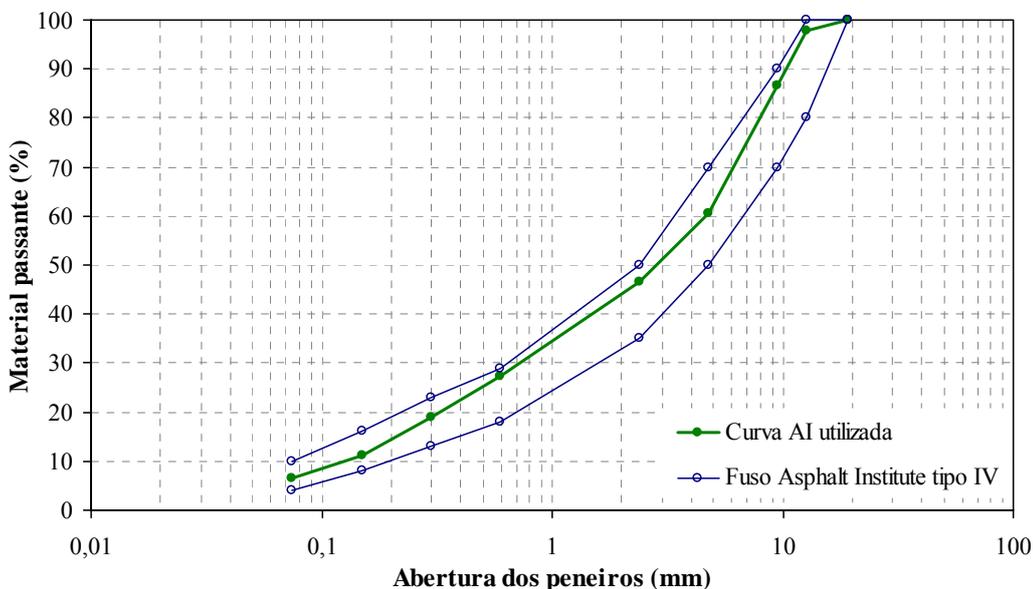


Figura 5.9 – Curva granulométrica utilizada e fuso granulométrico do AI tipo IV

As granulometrias densas DNIT faixa “C” e AI tipo IV apresentam uma distribuição contínua com elevadas percentagens de material passante no peneiro de nº 200 (0,075 mm). As duas curvas encontram-se dentro do respectivo fuso granulométrico especificado pelos organismos regulamentadores.

**Granulometrias descontínuas (*gap graded*)**

As granulometrias adoptadas para produção de misturas descontínuas (*gap graded*) foram as especificadas pelo Caltrans, mistura tipo ARHM-GG (*Asphalt Rubber Hot Mix Gap Graded*),

de acordo com o *Standard Special Provisions, SSP 39-400* (Caltrans, 2003) e pelo ADOT, mistura AR-AC (*Asphalt Rubber Asphaltic Concrete*) de acordo com o *ADOT Construction Manual, Section 414* (ADOT<sub>A</sub>, 2005).

O Quadro 5.16 apresenta o fuso granulométrico prescrito para ARHM-GG, do Caltrans, e a respectiva curva utilizada. A Figura 5.10 representa a curva utilizada e o fuso granulométrico. Para a granulometria ADOT AR-AC, o fuso especificado e a curva utilizada no estudo são apresentados no Quadro 5.17 e ilustrados na Figura 5.11.

Quadro 5.16 – Especificação e granulometria da curva Caltrans ARHM-GG utilizada

Peneiros		Especificação	Curva utilizada
pol./nº	mm	% passante	% passante
3/4"	19,0	100 – 100	100,00
1/2"	12,7	90 – 100	98,06
3/8"	9,5	78 – 92	87,76
nº 4	4,8	28 – 42	36,46
nº 8	2,4	15 – 25	22,99
nº 30	0,6	10 – 20	14,21
nº 50	0,3	7 – 15	10,41
nº 100	0,15	5 – 10	6,81
nº 200	0,075	2 – 7	4,45

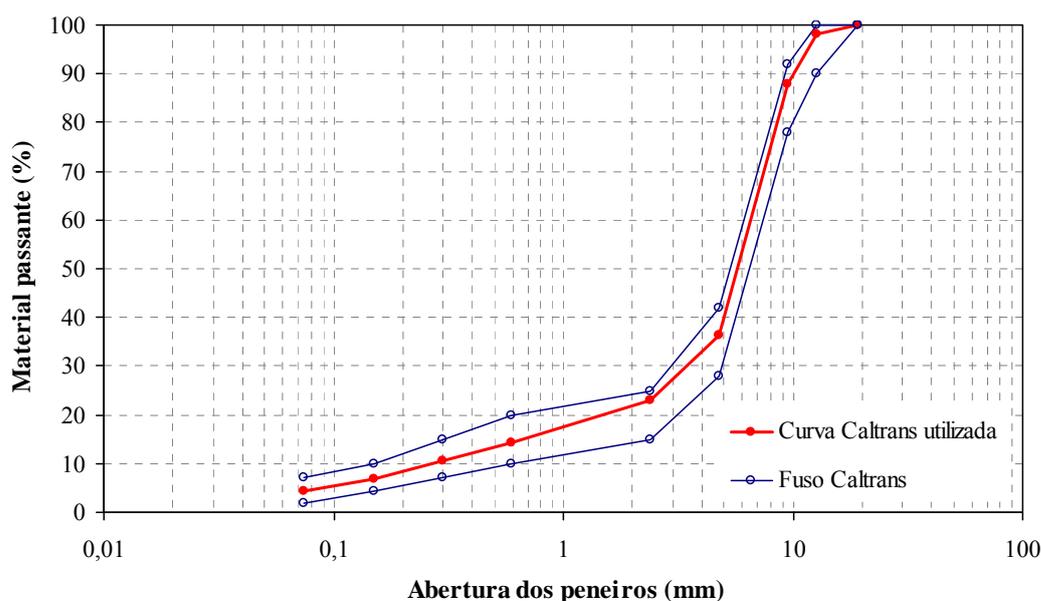


Figura 5.10 – Curva granulométrica utilizada e fuso granulométrico ARHM-GG do Caltrans

Quadro 5.17 – Especificação e granulometria da curva ADOT AR-AC utilizada

Peneiros		Especificação	Curva utilizada
pol./nº	mm	% passante	% passante
3/4"	19,0	100 – 100	100
1/2"	12,7	90 – 100	98,15
3/8"	9,5	79 – 89	88,23
nº 4	4,8	34 – 42	36,58
nº 10	2,0	15 – 23	21,59
nº 40	0,4	4 – 14	12,27
nº 200	0,075	1 – 5	4,44

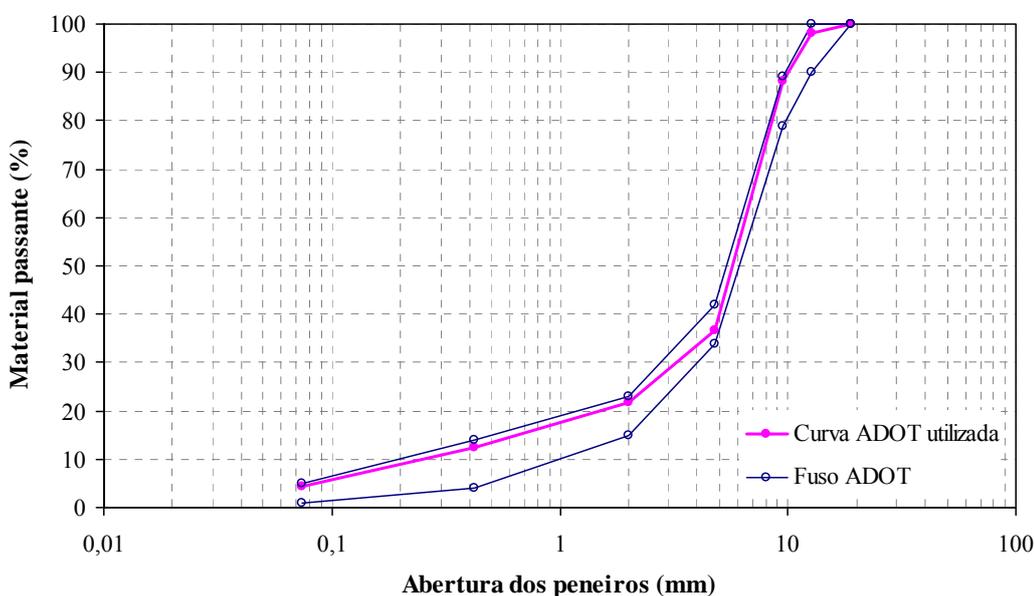


Figura 5.11 – Curva granulométrica utilizada e fuso granulométrico AR-AC do ADOT

Através da análise das curvas *gap graded* apresentadas na Figura 5.10 e Figura 5.11, pôde-se verificar que as granulometrias apresentam uma certa uniformidade para determinados tamanhos de grãos, mas apresentam uma descontinuidade na fracção fina, característica de curvas tipo *gap*. As duas curvas *gap graded* utilizadas no estudo são muito semelhantes e ambas satisfazem as especificações exigidas. As misturas com as granulometrias *gap graded* foram produzidas com o betume-borracha dos dois sistemas de produção (*continuous blend* e *terminal blend*). Tendo em conta os agregados disponíveis, a determinação das curvas granulométricas objectivou o arranjo e a combinação dos agregados para alcançar o maior imbricamento do esqueleto mineral possível.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADOT, 2005<sub>A</sub>. Arizona Department of Transportation (ADOT) Construction Manual, Section 414 AR-AC (Asphalt Rubber Asphaltic Concrete). Arizona, USA.

ADOT, 2005<sub>B</sub>. Arizona Department of Transportation (ADOT) Construction Manual, Section 1009 (Rubber Material). Arizona, USA.

AI, 1989. Asphalt Institute – The Asphalt Handbook, Manual Series nº 4 (MS-4). 1989 Edition, Kentucky, USA.

ASTM D 546, 1994. Standard Test Method for Sieve Analysis of Mineral Filler for Road and Paving Materials. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM D 36, 1995. Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM D 242, 1995. Standard Specifications for Mineral Filler for Bituminous Paving for Mixtures. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM, 1996. Annual Book of ASTM Standards. Section 4: Construction. Vol. 04.3. Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken.

ASTM C 136, 1996. Standard Test Method for Sieve Analysis of Coarse Aggregates. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM D 5329, 1996. Standard Test Method for Sealants and Fillers, Hot-Applied; For Joints and Cracks in Asphaltic and Portland Cement Concrete Pavements. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM D 5, 1997. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM D 2872, 1997. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM D 6114, 1997. Standard Specifications for Asphalt Rubber. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM D 8, 2001. Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM C 131, 2003. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM D 2196, 2005. Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA.

BS 812 Part 105, 1990. Testing Aggregates. General Requirements for Apparatus and Calibration. CD Rom. British Standard. London, United Kingdom.

Caltrans, 2003. Standard Special Provisions. State of California Department of Transportation, Sacramento, California, USA.

DNER, 1995. EM 204 (Cimentos Asfálticos de Petróleo – Especificação de Material). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, Brasil.  
Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)

DNER, 1997. PRO 120 (Colecta de Amostras de Agregados – Procedimento). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, Brasil.  
Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)

DNER, 1997. EM 313 (Pavimentação – Concreto Betuminoso – Especificação de Serviço).  
Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, Brasil.

Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)

DNIT, 2006. ES 031 (Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço).  
Departamento Nacional de Infra-Estrutura Terrestre. Diretoria de Planejamento e Pesquisa/IPR. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)

DNIT, 2006. EM 095 (Cimentos Asfálticos de Petróleo – Especificação de Material).  
Departamento Nacional de Infra-Estrutura Terrestre. Diretoria de Planejamento e Pesquisa/IPR. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)

EN 13179, 2000. European Standard. Tests for Filler Aggregate Used in Bitumen Mixtures - Part 1: Delta Ring and Ball Test.

LNEC, 1997. E-80 – Especificação 80. Betumes e Ligantes Betuminosos. Betumes de Pavimentação (classificação, propriedades e exigências de conformidade). Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, Portugal.

Greenbook, 2000. Standard Specifications for Public Works Construction, 2000 Edition. Public Works Standards, Inc. Anaheim, California, USA.

Minhoto, M.J.C., 2007. Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal.

NP 581, 1969. Determinação das Massas Volúmicas e da Absorção de Água de Britas e Godos. Instituto Português de Qualidade, 2005. Caparica, Portugal.

NP 954, 1973. Determinação das Massas Volúmicas e da Absorção de Água das Areias. Instituto Português de Qualidade, 2005. Caparica, Portugal.

NP EN 933-8, 2002. Norma Portuguesa Especificação Normativa 933-8. Ensaio das Propriedades Geométricas dos Agregados. Parte 8: Determinação do Teor de Finos. Ensaio do Equivalente de Areia. Instituto Português de Qualidade, 2005. Caparica, Portugal.

NP EN 933-9, 2002. Norma Portuguesa Especificação Normativa 933-8. Ensaio das Propriedades Geométricas dos Agregados. Parte 9: Determinação do Teor de Finos. Ensaio do Azul de Metileno. Instituto Português de Qualidade, 2005. Caparica, Portugal.

Santana, H., 1992. Manual de Pré-Misturados a Frio. Instituto Brasileiro do Petróleo, Comissão de Betume. Rio de Janeiro, Brasil.

Sousa, J.B.; Pais, J.C.; Saim, R.; Way, G.B.; Stubstad, R.N., 2002. Development of a Mechanistic-Empirical Based Overlay Design Method for Reflective Cracking. Transportation Research Board, p. 209-217.



## Capítulo 6

# OPTIMIZAÇÃO DO BETUME-BORRACHA E DAS MISTURAS BETUMINOSAS

### 6.1. INTRODUÇÃO

A optimização do betume-borracha para produção do betume *continuous blend*, que corresponde à Fase 2 da metodologia experimental, consiste na variação dos parâmetros percentagem de borracha, temperatura de mistura e tempo de digestão, através dos quais os betumes-borracha são produzidos e avaliados em ensaios de caracterização. Além disto, foi avaliada a viscosidade aparente em função do tempo de digestão. Adicionalmente foi realizada a análise microscópica por varrimento electrónico dos betumes-borracha seleccionados na optimização.

Após a optimização do betume-borracha *continuous blend* teve início a Fase 3, a qual corresponde à optimização das misturas betuminosas que foram produzidas a partir do betume-borracha *continuous blend* optimizado e dos betumes-borracha *terminal blend*. Nesta fase foi produzida a mistura *dense graded* (DNIT – ES 031, 2006), DNIT “C”, com betume convencional CAP 50/70, e designada por mistura de referência. A formulação das misturas foi realizada através da metodologia Marshall.

As misturas betuminosas produzidas foram avaliadas através dos seguintes ensaios de desempenho: (i) módulo dinâmico; (ii) fadiga; (iii) deformação permanente.

Os resultados dos ensaios de desempenho realizados nesta fase mostraram-se inconcludentes, face aos resultados encontrados na literatura internacional (Sousa *et al.*, 1999; Visser & Verhaeghe, 2000, Shatnawi & Long, 2000; Antunes *et al.*, 2000; Gallego *et al.*, 2000; Shatnawi & Holleran, 2003; Dantas Neto, 2004). Uma vez que a prioridade do estudo está focada na avaliação de materiais de origem brasileira, foi importante e necessário comparar estes materiais com outros, de modo a verificar a compatibilidade do betume e da borracha brasileiros para a produção de betumes-borracha. Desta forma, foram produzidas misturas betuminosas com materiais (betume e borracha) provenientes de outras fontes.

A partir destas considerações foram produzidas misturas betuminosas com betume-borracha (*continuous blend*) com betumes portugueses e brasileiro e borrachas brasileira (ambiente) e portuguesa (criogénica). De modo a particularizar este estudo, a granulometria escolhida para produção das misturas betuminosas com estes materiais foi a *gap graded* do Caltrans.

## 6.2. OPTIMIZAÇÃO DO BETUME-BORRACHA *CONTINUOUS BLEND*

No sistema húmido de produção do betume-borracha, quando a borracha é adicionada ao betume e misturada, sob agitação e a elevadas temperaturas, este betume modifica-se e passa a ter diferentes propriedades em relação ao betume original. A modificação deve-se a mudanças na composição do betume que ocorrem durante a interacção entre o betume e a borracha.

A percentagem de borracha, a granulometria das partículas de borracha, o tempo e a temperatura de digestão são características que influenciam as propriedades físicas e reológicas como a viscosidade, o ponto de amolecimento e a recuperação elástica do betume-borracha. Com base nestas características foram avaliadas as propriedades adquiridas na modificação do betume para a escolha do betume-borracha optimizado. A sequência experimental adoptada para optimização do betume CAP 50/70 e a borracha ambiente, ambos de procedência brasileira, foi realizada conforme já apresentado na Figura 5.1 (b).

Os critérios de decisão foram baseados nos ensaios convencionais, fundamentados nas especificações para este tipo de betume (com borracha). A partir destes critérios, foi seleccionado o betume optimizado com materiais brasileiros a ser utilizado na produção de misturas betuminosas *continuous blend* para as granulometrias estudadas.

### 6.2.1. Estudo das características físicas

O objectivo da optimização do betume-borracha foi estabelecer a percentagem de borracha, o tempo de digestão e a temperatura de fabrico do betume-borracha no sistema *continuous blend* com materiais brasileiros que levariam a um melhor desempenho das misturas betuminosas com ele formuladas.

Para o estudo das características da optimização do betume, foram estabelecidas as seguintes variáveis:

- percentagens de borracha: 16, 17, 20% em massa de betume-borracha<sup>1</sup>;
- tempos de digestão: 45, 60, 90 minutos;
- temperatura de digestão: 180 °C.

A escolha das percentagens e dos tempos de digestão foi realizada com base na literatura técnica, nos valores utilizados pelo ADOT e Caltrans e visando a obtenção de betumes-borracha com elevadas percentagens de borracha. Além destas referências, alguns autores utilizaram as seguintes variáveis para a produção de betume-borracha a ser utilizado em camadas betuminosas, com o betume base classificado por penetração 50/70:

- Coetzee & Monismith (1979) – temperatura de digestão entre 175 e 200 °C e 20% de borracha;
- Roberts *et al.* (1989) – temperatura de digestão entre 190 e 215 °C, 15 a 26% de borracha e tempo de digestão de 60 e 120 minutos;
- Heitzman (1992) – 15 a 20% de borracha;
- Daly & Negulesku (1997) – temperatura de digestão entre 170 e 220 °C e 15 a 20% de borracha;
- Ruth *et al.* (1997) – temperatura de digestão de 180 °C e 12, 18 e 24% de borracha;
- Leite (1999) – temperatura de digestão entre 190 °C, 15 a 20% de borracha e tempo de digestão de 120 minutos;
- Dantas Neto (2004) – temperatura de digestão entre 170 e 210 °C, 15, 17 e 21% de borracha e tempo de digestão de 30 a 300 minutos.

Após a definição das variáveis foi estabelecido o factorial de estudo, no qual foram produzidos então 9 diferentes tipos de betume-borracha.

### **Preparação dos betumes-borracha**

A adição da borracha ao betume através do sistema *continuous blend* foi realizada por agitação durante o tempo de digestão e na temperatura seleccionada.

---

<sup>1</sup> O cálculo da percentagem de borracha pode ser realizado com base na massa de betume convencional ou na massa total de betume-borracha. Nesta investigação, optou-se pela massa do betume-borracha  $[\text{massa da borracha}/(\text{massa do betume} + \text{borracha})] \times 100$ . Os valores escolhidos, de 16, 17 e 20% corresponderiam, caso fossem calculados em relação à massa do betume, a percentagens de borracha de 19, 21 e 25%, respectivamente.

O agitador mecânico que promoveu a incorporação e as interações entre o betume e a borracha consiste num motor no qual está acoplada uma hélice e de uma cuba aquecedora monitorizada por um controlador de temperatura, como apresentado na Figura 6.1.



Figura 6.1 – Agitador utilizado para produção do betume-borracha tipo *continuous blend*

A velocidade de rotação da hélice variou de 250 a 350 rpm e foi escolhida por proporcionar uma mistura homogénea entre a borracha granulada e o ligante, sem a ocorrência de segregação ou sedimentação das partículas de borracha.

A Figura 6.2 apresenta o procedimento de adição da borracha ao betume para confecção do betume-borracha do tipo *continuous blend*.



(a) betume convencional



(b) início da adição da borracha



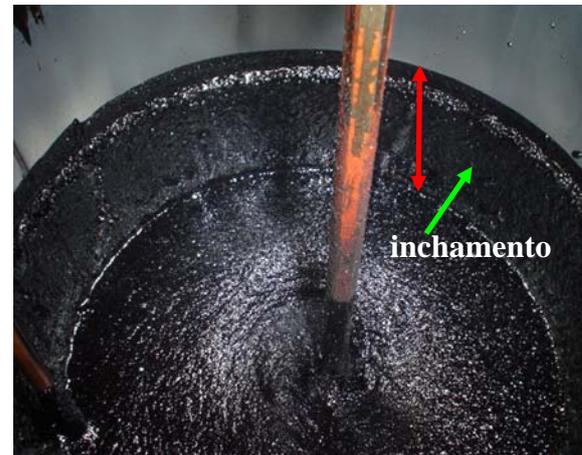
(c) fim da adição da borracha



(d) início da mistura



(e) inchamento inicial



(f) fim do inchamento

Figura 6.2 – Processo de fabrico em laboratório do betume-borracha tipo *continuous blend*

A preparação dos betumes-borracha (Figura 6.2) foi realizada de acordo com o seguinte procedimento:

- pesagem da borracha a ser adicionada ao betume (percentagem em relação à massa do betume-borracha);
- pré-aquecimento (temperatura de digestão menos 10 °C) do betume no recipiente, previamente pesado, em estufa;
- aquecimento do betume na cuba aquecedora até a temperatura de digestão;
- adição da borracha ao betume à temperatura de mistura e início da contagem do tempo de digestão (metade do tempo de colocação da borracha foi adicionado ao tempo total de digestão) sob constante agitação.

Durante o processo de interacção do betume com a borracha, os grãos de borrachas “incham” devido à absorção dos óleos voláteis que são incorporados ao betume e formam um novo produto, o betume-borracha. No entanto, após este processo, se a temperatura é mantida muito alta por um longo período (tempo de digestão), a borracha começa parcialmente a se desintegrar (processo de despolicimerização) no betume causando uma redução da viscosidade.

### Resultados obtidos nos ensaios

Após a produção dos 9 betumes-borracha foram realizados os ensaios de caracterização (penetração, ponto de amolecimento, viscosidade aparente e resiliência), e realizada uma análise comparativa entre eles. As Figuras 6.3 e 6.4 apresentam os resultados dos ensaios de penetração em função da percentagem de borracha e do tempo de digestão, respectivamente.

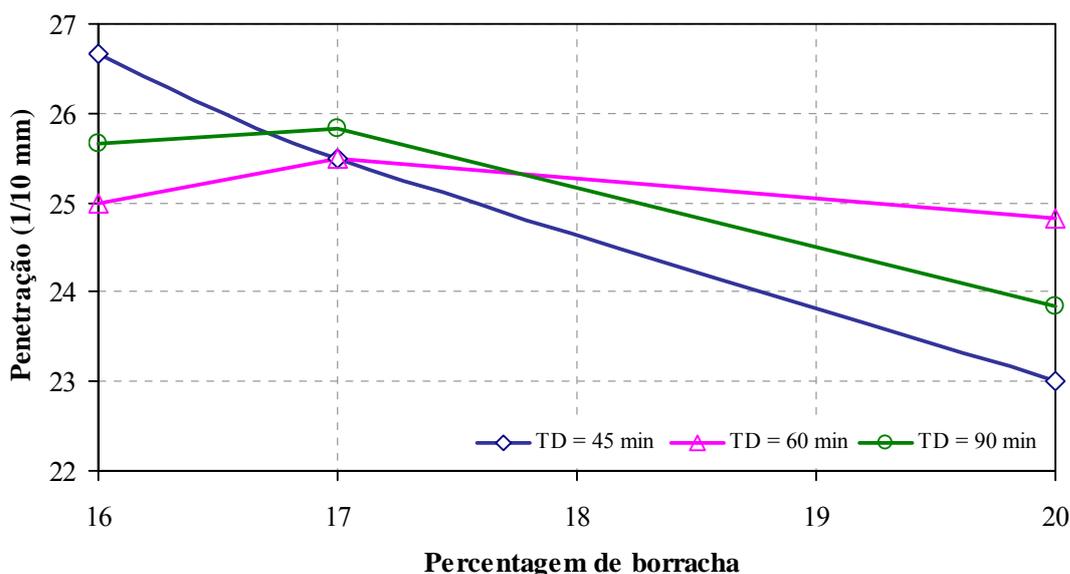


Figura 6.3 – Variação da penetração em função da percentagem de borracha

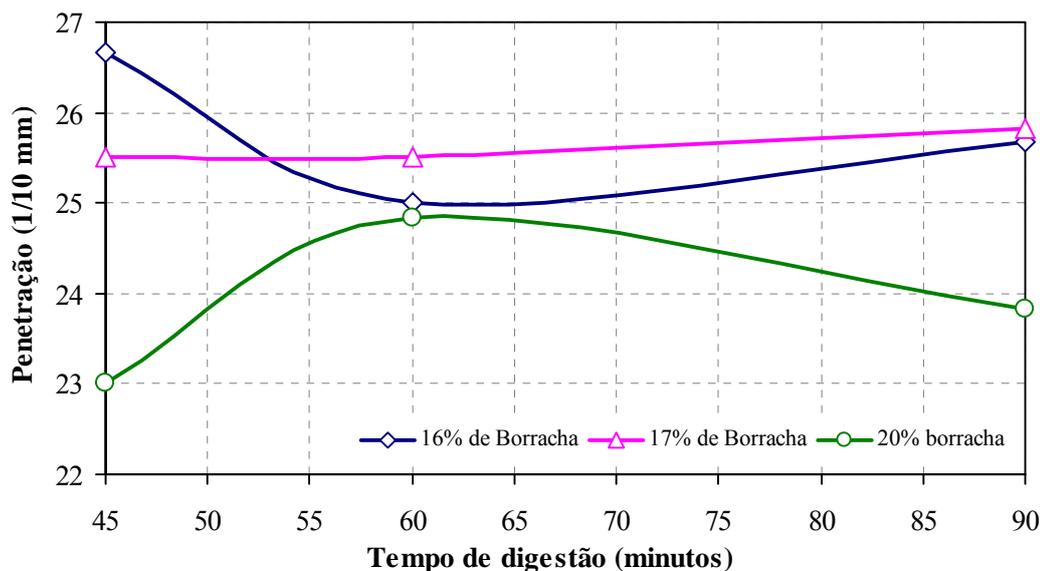


Figura 6.4 – Variação da penetração em função do tempo de digestão

O valor da penetração diminuiu com o aumento da percentagem de borracha incorporada, tendo-se verificado que para percentagens de borracha até 17% o valor da penetração permanece quase constante para os três tempos de digestão. A influência mais significativa foi verificada para a maior percentagem de borracha incorporada (20%). O comportamento apresentado justifica-se porque a adição de borracha torna o ligante mais viscoso, resultando em valores mais baixos de penetração em função do aumento da quantidade de borracha (Figura 6.3). O tempo de digestão influenciou principalmente o valor da penetração para a quantidade de 16% e 20% de borracha adicionada, não se tendo verificado influência para 17% de borracha (Figura 6.4).

Desta forma, o valor da penetração dos betumes-borracha é influenciada principalmente pela percentagem de borracha granulada, tendo em conta que o aumento da percentagem de borracha faz com que a penetração diminua. Este facto está relacionado ao endurecimento do ligante devido à absorção dos componentes voláteis (fracções leves) pelas partículas de borracha.

As Figuras 6.5 e 6.6 apresentam a influência da percentagem de borracha e do tempo de digestão em relação ao ponto de amolecimento (método anel e bola) para os betumes-borracha produzidos.

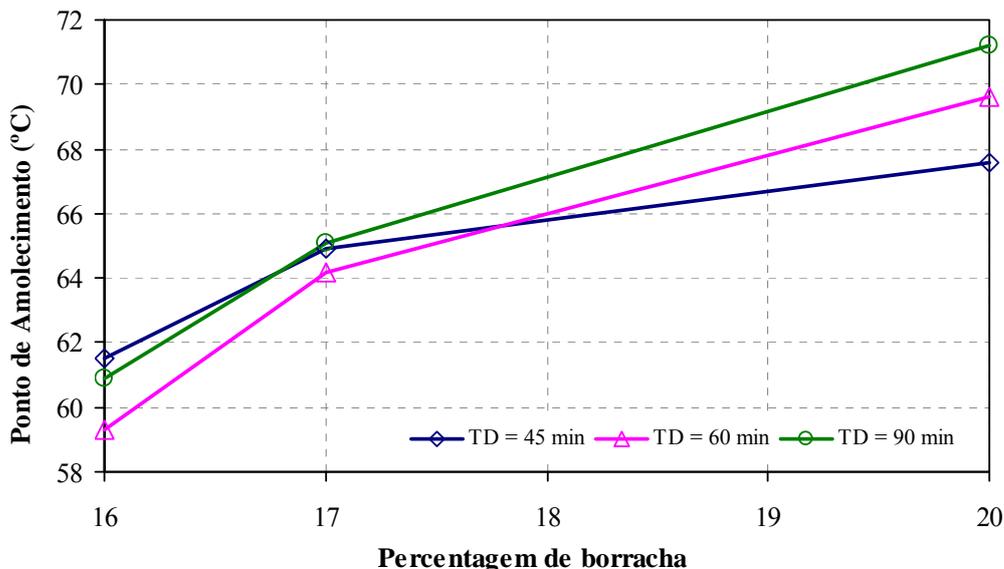


Figura 6.5 – Variação do ponto de amolecimento em função da percentagem de borracha

O ponto de amolecimento se elevou com a percentagem de borracha, indicando um aumento na resistência à deformação permanente das misturas contendo betume-borracha (Figura 6.5). Pode observar-se ainda que os valores obtidos para a percentagem de 17% de borracha foram semelhantes para os três tempos de digestão. O aumento do tempo de digestão não se traduziu num aumento significativo do valor do ponto de amolecimento (Figura 6.6).

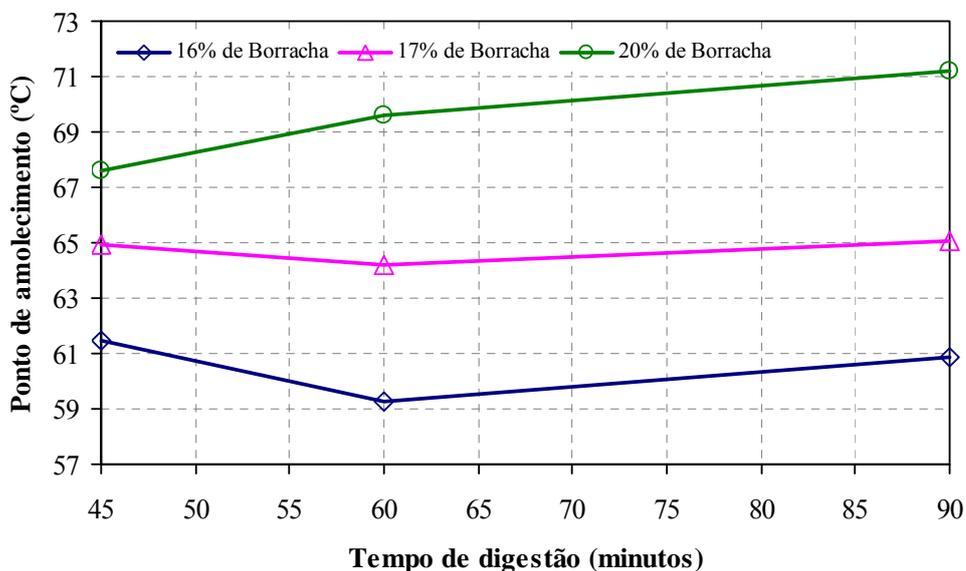


Figura 6.6 – Variação do ponto de amolecimento em função do tempo de digestão

A influência do tempo de digestão na modificação das propriedades do betume é dependente do tamanho das partículas de borracha e da temperatura da mistura. Para o tipo de borracha

(micronizada) utilizada neste trabalho, o tempo de digestão não foi uma variável com influência considerável no valor do ponto de amolecimento (para os tempos de digestão estudados).

Relativamente aos resultados obtidos no ensaio da resiliência, as Figuras 6.7 e 6.8 apresentam a influência desta característica em função da percentagem de borracha e do tempo de digestão. A resiliência do betume-borracha é influenciada principalmente pela percentagem de borracha adicionada ao betume (Figura 6.7).

O tempo de digestão não teve um efeito significativo na mudança das propriedades do betume (Figura 6.8). Através deste ensaio foi possível observar o aumento da resposta elástica dos betumes-borracha em relação ao betume convencional (resiliência igual a zero).

O aumento da resiliência está relacionado com a presença da borracha, material este com capacidade de recuperação elástica, incorporada ao ligante. A absorção das fracções leves pelas partículas de borracha faz com que o betume-borracha “herde” também esta capacidade de recuperação elástica e isto reflecte-se no aumento da resiliência medida no ensaio.

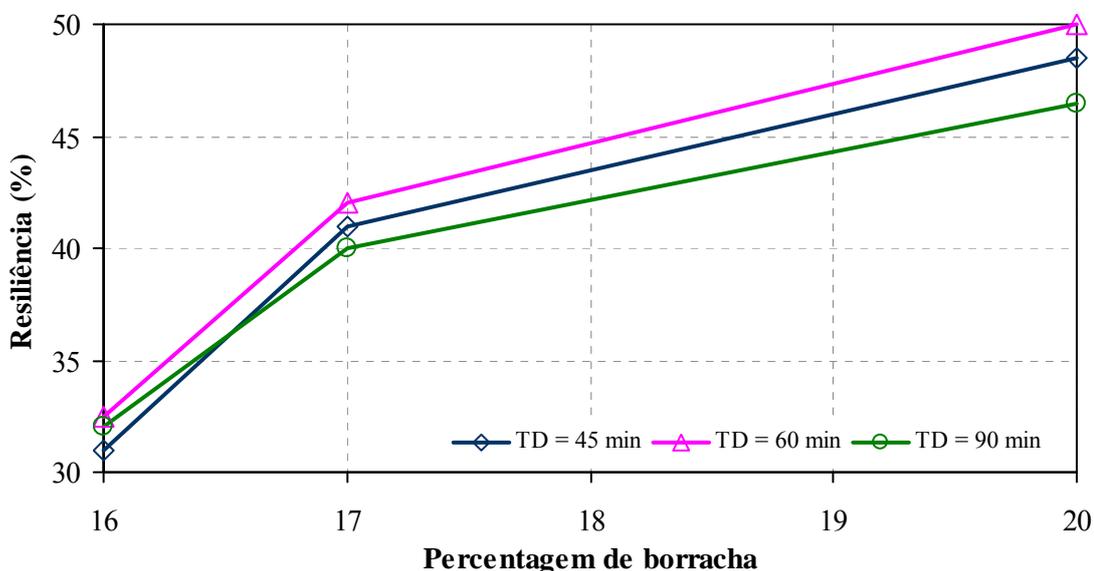


Figura 6.7 – Variação da resiliência em função da percentagem de borracha

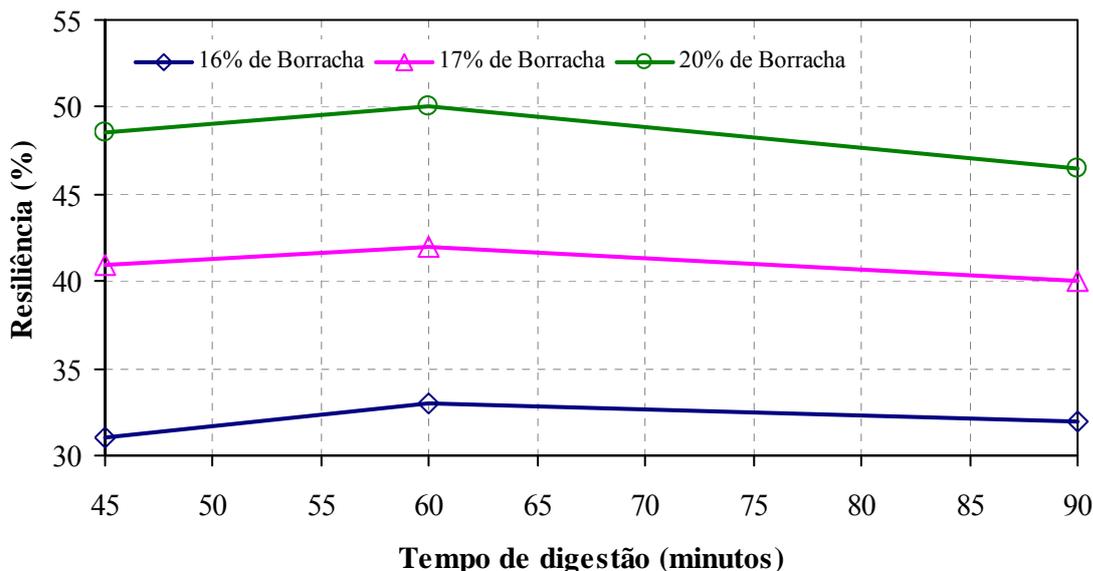


Figura 6.8 – Variação da resiliência em função do tempo de digestão

Os ensaios para determinação da viscosidade aparente do betume-borracha foram realizados à temperatura de 180 °C (temperatura de digestão). Os ensaios foram realizados em um viscosímetro rotacional do tipo Brookfield a uma velocidade de 20 rpm (rotações por minuto), utilizando-se o veio (*spindle*) 27. Considerando a probabilidade de grãos de borracha migrarem para o fundo do recipiente no qual a amostra está inserida, os ensaios foram realizados após o 1º minuto de rotação do veio na amostra. As Figuras 6.9 e 6.10 apresentam os resultados do ensaio de viscosidade para os betumes-borracha.

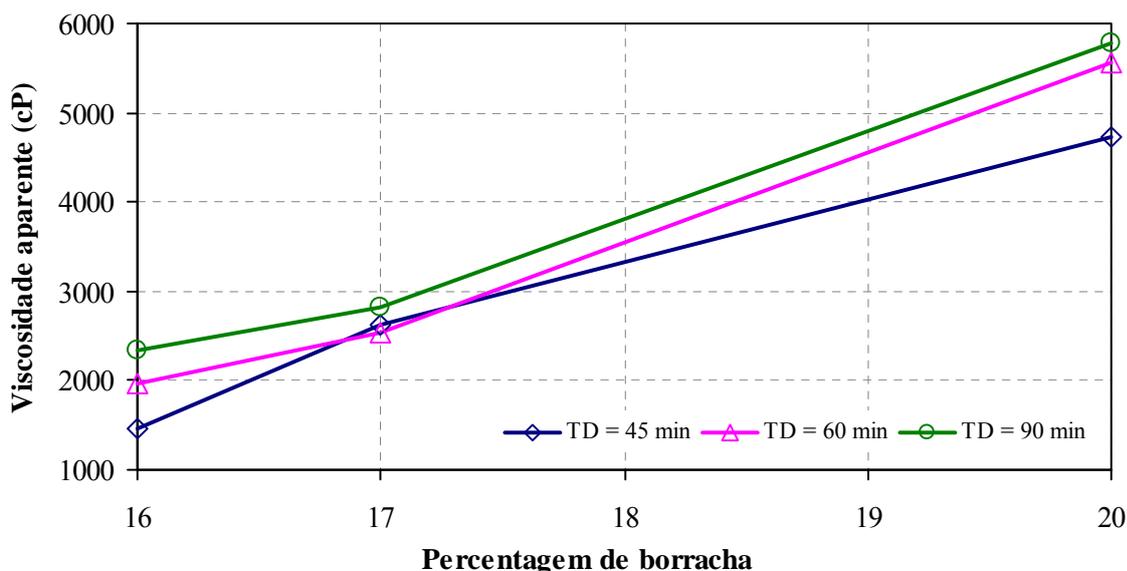


Figura 6.9 – Variação da viscosidade em função da percentagem de borracha

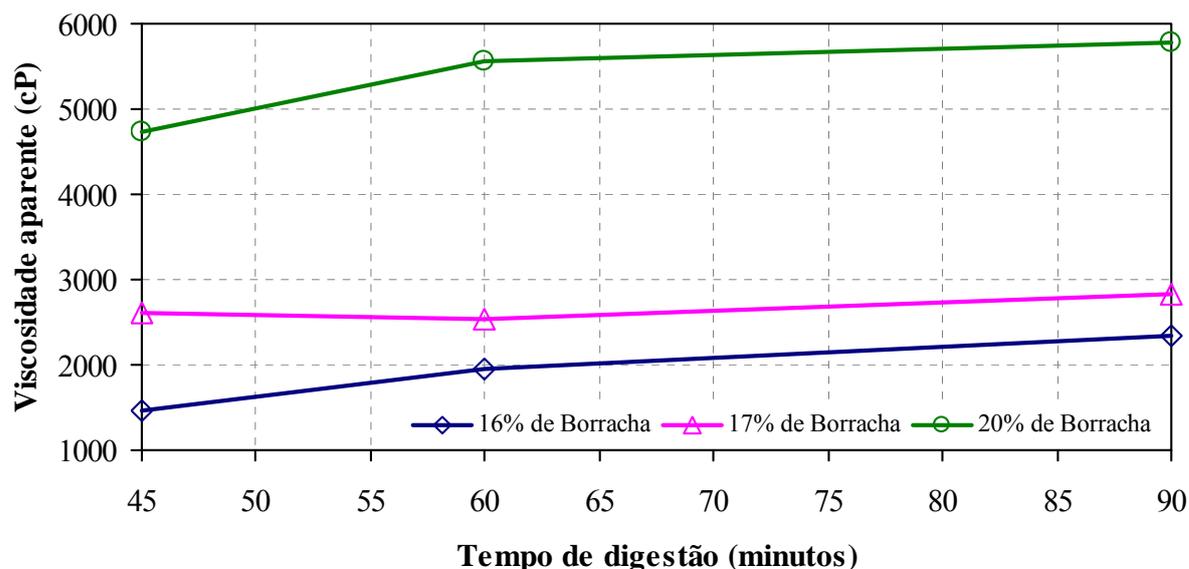


Figura 6.10 – Variação da viscosidade em função do tempo de digestão

Com base nos resultados expostos pode concluir-se que, entre os factores analisados, a percentagem de borracha é o que mais influencia a viscosidade do betume-borracha, havendo um significativo aumento da viscosidade com o aumento da percentagem de borracha (Figura 6.9).

O aumento da viscosidade do betume, dependendo da quantidade de borracha, pode exceder os valores permitidos pela especificação (ASTM D 6114, 1997), conforme sucedeu com a percentagem de 20%. O efeito do tempo de digestão da mistura não foi significativo, mas apresenta uma tendência a tornar-se constante entre os 60 e 90 minutos (Figura 6.10).

O estudo realizado para optimização do betume através do sistema *continuous blend* permitiu concluir que a percentagem de borracha influencia significativamente o comportamento do betume-borracha. Relativamente ao tempo de digestão, não foi possível a compreensão da influência desta variável na mudança das propriedades do betume.

A viscosidade é uma das principais propriedades físicas dos materiais betuminosos e que está relacionada directamente à capacidade de bombeamento, facilidade de mistura e aplicação destes materiais. Assim, nesta fase da investigação, realizou-se um estudo detalhado da influência desta propriedade, em relação ao tempo de digestão, denominado como estudo da viscosidade.

### 6.2.2. Estudo da viscosidade

O estudo da viscosidade compreendeu uma avaliação detalhada da influência do tempo de digestão na viscosidade aparente do betume-borracha tipo *continuous blend*. Para este estudo, foram produzidos 14 betumes-borracha e realizados ensaios de viscosidade aparente (viscosímetro Brookfield), elegendo-se as seguintes variáveis:

- % de borracha: 19%;
- tempos de digestão: 30, 60, 90, 120, 150, 180 e 210 minutos;
- temperaturas de digestão: 190 e 200 °C.

A percentagem de borracha de 19% foi a seleccionada por ser o valor que permite obter uma viscosidade inferior a 5000 cP, de acordo com a norma ASTM 6114, 1997 (Quadro 5.10). As temperaturas de 190 °C e 200 °C foram escolhidas para avaliar a modificação do betume a temperaturas mais elevadas.

O estudo detalhado mostrou que o valor da viscosidade para a temperatura de 190 °C possui uma tendência crescente mesmo com o aumento do tempo de digestão. Para a temperatura de 200 °C, foi verificado o aumento do valor da viscosidade até os 150 minutos de digestão e, posteriormente, a sua redução, como mostra a Figura 6.11.

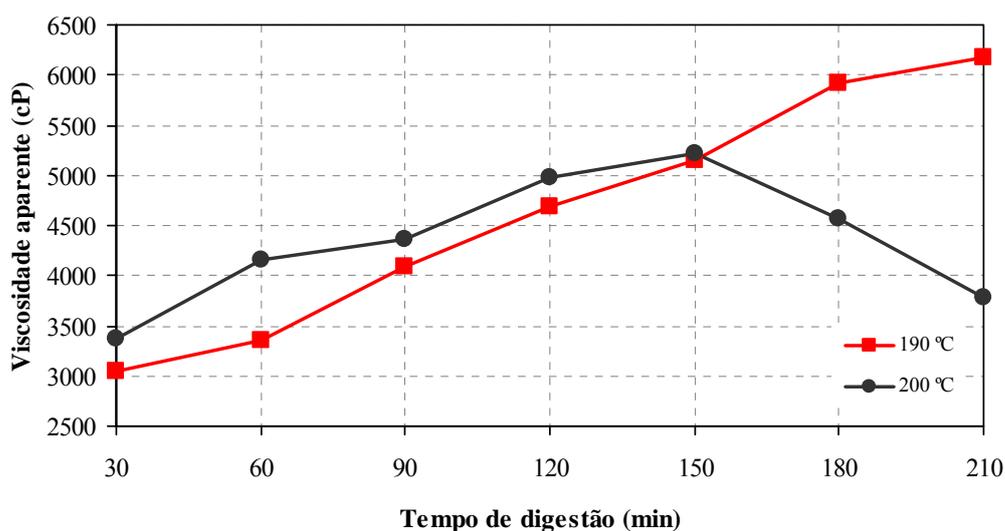


Figura 6.11 – Variação da viscosidade em função do tempo de digestão e temperatura

O decréscimo da viscosidade apresentado pelo betume-borracha produzido a 200 °C pode ser explicado com base no processo de produção dos betumes-borracha. Numa primeira fase do

processo, ocorre o inchamento da borracha e a modificação processa-se durante o tempo de digestão e temperatura determinados. No entanto, se a temperatura for muito elevada ou se o tempo de digestão for maior do que o necessário para produzir a modificação, inicia-se a despolimerização da borracha e ocorre a redução e a queda da viscosidade, exactamente como apresentado na Figura 6.11 para a temperatura de 200 °C.

Os resultados da viscosidade em função do tempo de digestão obtidos para todos os betumes produzidos na Fase 2 estão ilustrados na Figura 6.12.

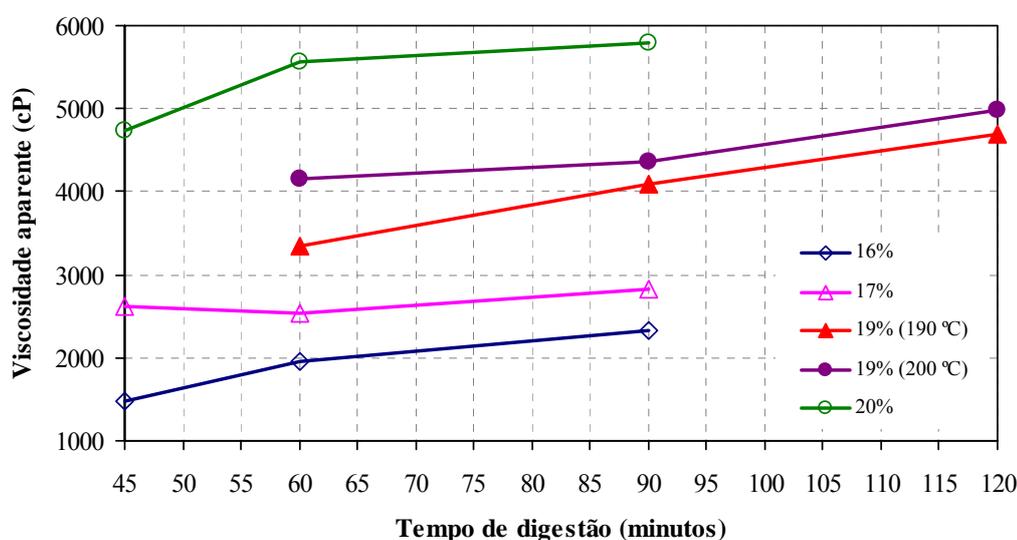


Figura 6.12 – Variação da viscosidade aparente a diversos tempos de digestão e percentagens de borracha

As percentagens de 16% a 19% de borracha atendem às especificações dos valores para a viscosidade aparente (entre 1500 a 5000 cP, ASTM D 6114, 1997). Para outras especificações de organismos rodoviários, como Caltrans e ADOT, a viscosidade aparente máxima é de 4000 cP, limitando desta forma, as percentagens de borracha a 16% e 17%. A percentagem de borracha de 20% não atende às especificações de viscosidade para tempos de digestão maiores que 60 minutos. Analogamente, o valor de 16% de borracha não satisfaz às especificações para um tempo de digestão de 45 minutos.

Outro facto a considerar resulta das temperaturas de 190 °C e de 200 °C serem demasiadamente elevadas para o aquecimento do CAP 50/70. Assim, entre as temperaturas avaliadas neste estudo, a temperatura adequada para produção de betume-borracha é a de 180 °C.

A evolução da viscosidade em função da percentagem de borracha para todos os betumes confeccionados (Figura 6.13), permite se definir dois tipos de betume os quais atendem às especificações, nomeadamente os produzidos com a percentagem de borracha de 17%, na temperatura de digestão de 180 °C e dois tempos de digestão: 60 e 90 minutos. Considerando estas duas possibilidades, foi realizada uma análise de microscopia por varrimento electrónico para avaliar o melhor arranjo e compatibilidade da estrutura morfológica destes dois betumes.

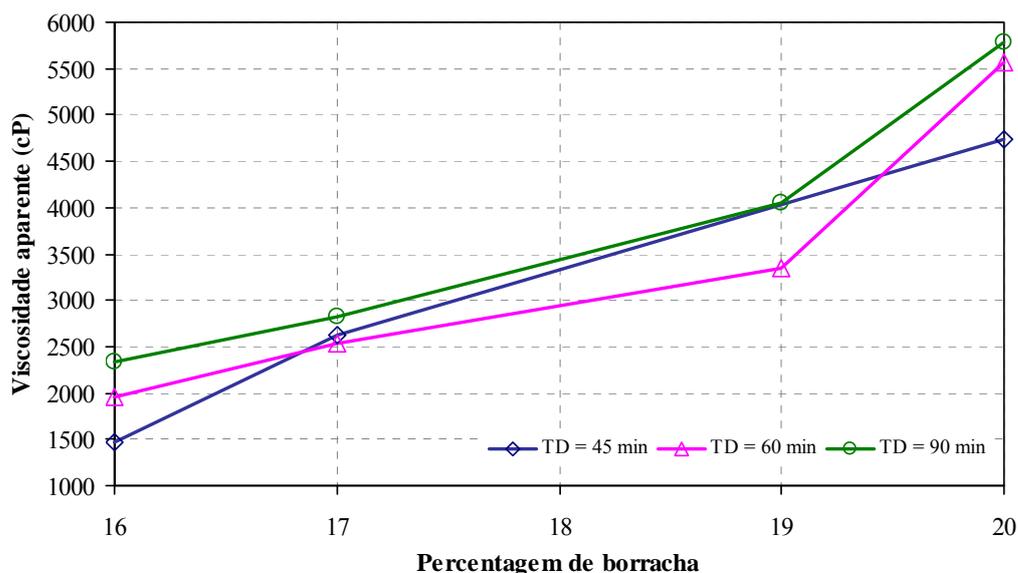


Figura 6.13 – Variação da viscosidade aparente em função da percentagem de borracha

### 6.2.3. Estudo da microscopia electrónica por varrimento

As propriedades dos sistemas betume-borracha podem apresentar-se compatíveis ou incompatíveis. A compatibilidade depende do tipo de borracha e do tipo de betume e está directamente relacionada com o desempenho que as misturas betuminosas preparadas com este ligante apresentarão em serviço. A incompatibilidade resulta em sistemas pobres no que se refere às propriedades mecânicas das misturas.

A análise da morfologia e da microestrutura dos betumes foi realizada através da microscopia electrónica por varrimento, empregando-se o Microscópio Electrónico de Varrimento (MEV) LEICA Cambridge S 360 (Figura 6.14). As amostras destinadas ao MEV foram inicialmente preparadas através de um recobrimento com ouro (Figura 6.15) e estavam isentas de humidade ou óleos.



Figura 6.14 – Microscópio Electrónico de Varrimento (MEV)



Figura 6.15 – Amostras de betume-borracha preparadas para o MEV

Tendo em conta que para o tempo de digestão ainda existem duas alternativas viáveis (60 e 90 minutos), foi realizada a microscopia por varrimento electrónico para estes e também para tempos de digestão inferiores (30 e 45 minutos) a fim de se verificar a estrutura formada com o betume e a borracha nestes tempos. A Figura 6.16 apresenta as micrografias aumentadas em 700 vezes para o betume-borracha (17% de borracha a 180 °C).

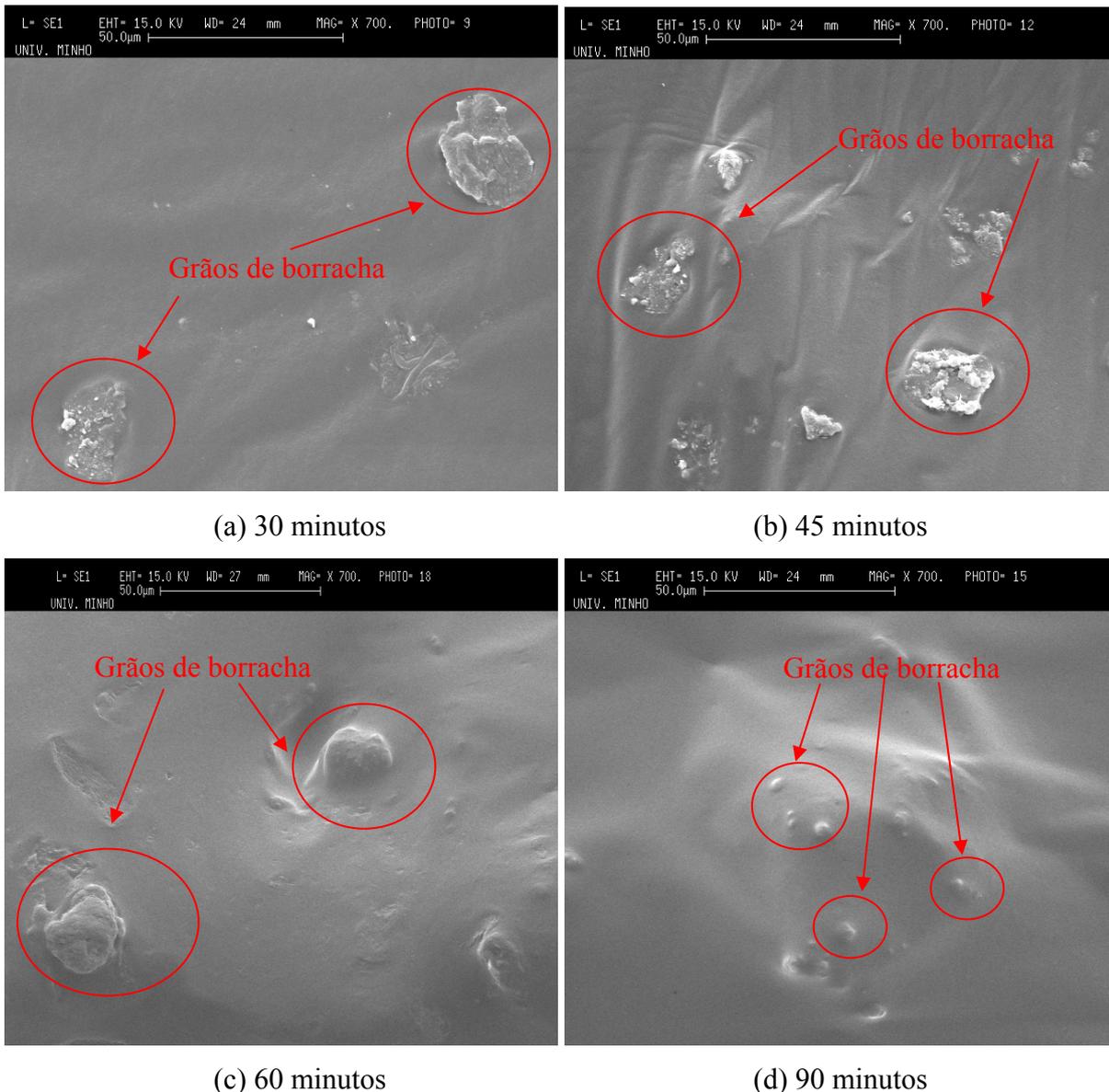


Figura 6.16 – Microestrutura do BBbB a diversos tempos de digestão

De acordo com a Figura 6.16, aos 30 e 45 minutos, os grãos de borracha ainda aparecem inteiros no betume, aparentando serem estes tempos insuficientes para a completa homogeneização do sistema betume e borracha. A partir dos 60 minutos de digestão, a borracha já se encontra integrada no betume, mas aos 90 minutos, o sistema se apresenta mais homogêneo. Assim, o tempo de digestão de 90 minutos mostra-se ideal para a produção do betume-borracha.

Somente a análise visual da estrutura microscópica dos materiais não fornece base para determinar o betume ideal, mas é uma ferramenta extra na verificação final do desempenho dos betumes-borracha.

Face ao exposto, e considerando as informações da revisão de literatura, a análise dos resultados levou à escolha da percentagem de borracha de 17 % com um tempo de digestão de 90 minutos para uma temperatura de 180 °C, como as características a serem adoptadas para a produção dos betumes-borracha *continuous blend*, sendo este então o betume-borracha otimizado na Fase 2. A nomenclatura adoptada para o betume otimizado nesta fase é BBbB (**B**etume **B**rasileiro com **b**orracha **B**rasileira).

A percentagem de borracha de 17% representa um valor intermediário entre a quantidade de borracha incorporada aos ligantes brasileiros do sistema *terminal blend*, BB15 (15% de borracha) e BB20 (20% de borracha).

O Quadro 6.1 apresenta o resumo das características deste ligante, através do qual pode verificar-se que o BBbB está enquadrado nas especificações ASTM D 6114 (1997).

Quadro 6.1 – Características do betume BBbB (17% de borracha, 90 minutos, 180 °C)

Ensaio	Norma	Especificação	Resultado
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)	ASTM D 5	25 a 75	26,0
Ponto de amolecimento <sup>(i)</sup> (°C)	ASTM D 36	54,4 mín.	65,0
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 175 °C	ASTM D 2196	1500 mín.	2829
Resiliência (%)	ASTM D 5329	20	40,0
RTFOT 163 °C, 85 minutos	ASTM D 2872		
Varição em massa (% de massa) máx.		-	0,3
Aumento do ponto de amolecimento (°C) máx.		-	8,5
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)		-	18,5
Penetração retida (%) mín.		-	71,1
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 175 °C		-	4800
Resiliência (%)		-	46,0
RTFOT 175 °C, 85 minutos	ASTM D 2872		
Varição em massa (% de massa) máx.		-	0,5
Aumento do ponto de amolecimento (°C) máx.		-	9,1
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)		-	14,5
Penetração retida (%) mín		-	55,8
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 175 °C		-	4830
Resiliência (%)		-	47,0

Observações referentes ao Quadro 6.1:

(i) Método anel e bola;

(ii) Viscosímetro Brookfield, veio 27, 20 rpm.

### 6.3. OPTIMIZAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS

A optimização das misturas betuminosas faz parte da Fase 3 da metodologia experimental deste estudo de investigação e engloba a formulação e a produção de misturas betuminosas com betume convencional (com CAP 50/70) e com betume-borracha dos tipos *terminal blend* e *continuous blend*. Nesta fase também foram realizados ensaios mecânicos (módulo de dinâmico, fadiga e deformação permanente), objectivando seleccionar as misturas de melhor de desempenho. A sequência experimental da Fase 3 foi efectuada de acordo com a Figura 5.1 (c).

#### 6.3.1. Formulação das misturas betuminosas

A determinação da percentagem óptima de betume e dos parâmetros volumétricos das misturas betuminosas foi realizada através da metodologia Marshall, de acordo com a norma ASTM D 1559 (1989), tendo sido aplicadas 75 pancadas em cada face dos provetes. Os parâmetros volumétricos medidos foram o VMA (vazios no agregado mineral), volume de vazios e a baridade aparente (massa específica aparente). Os resultados do ensaio Marshall foram a estabilidade Marshall (máxima carga para a qual ocorre a rotura do provete) e a deformação Marshall (deformação do provete na qual ocorre a rotura).

A determinação da baridade máxima teórica (BMT) foi realizada através da norma ASTM D 2041 (1995) utilizando-se um picnómetro a vácuo do tipo “F” (capacidade superior a 10 litros) como apresentado na Figura 6.17.

A baridade máxima teórica foi calculada de acordo com a Equação 6.1:

$$BMT = \left( \frac{A}{(A + F) - (G + H)} \right) \times \frac{d_w}{0,997} \quad (6.1)$$

onde:

BMT = baridade máxima teórica (g/cm<sup>3</sup>);

A = massa da amostra no ar (g);

F = massa do picnómetro cheio de água destilada à temperatura do ensaio (g);

$G$  = massa do picnómetro cheio de água destilada e amostra à temperatura do ensaio (g);

$H$  = factor de correcção devido à expansibilidade térmica do betume (g);

$d_w$  = densidade da água à temperatura do ensaio ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

0,9979 = massa específica da água à 25 °C ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).



Figura 6.17 – Picnómetro a vácuo tipo “F” para determinação da BMT

### 6.3.2. Misturas produzidas com betume-borracha *terminal blend*

Com o betume-borracha *terminal blend* foram produzidas duas misturas tipo *gap graded* e uma mistura densa. As granulometrias descontínuas (*gap graded*) foram as especificadas pelo Caltrans, tipo ARHM-GG mix (*Asphalt Rubber Hot Mix Gap Graded*), de acordo com o *Standard Special Provisions, SSP 39-400* (Caltrans, 2003), e pelo ADOT, ARAC (*Asphalt Rubber Asphaltic Concrete*) de acordo com o *ADOT Construction Manual, Section 414* (ADOT<sub>B</sub>, 2005). A granulometria densa utilizada foi a especificada pelo *Asphalt Institute* (AI), tipo IV, de acordo com o *The Asphalt Handbook Manual Series n° 4* (AI, 1989).

Para as misturas descontínuas *gap graded* foi utilizado o betume *terminal blend* BB20 (20% de borracha), e para a granulometria *dense graded*, o betume *terminal blend* BB15 (15% de borracha), considerando que as misturas do tipo *gap graded* necessitam ser produzidas com um betume mais viscoso para evitar o escorrimento da mistura.

Para cada tipo de mistura betuminosa com betume-borracha, cada organismo rodoviário especifica o intervalo dos valores de percentagem óptima de betume e de volume de vazios, conforme apresentado no Quadro 6.2.

Quadro 6.2 – Parâmetros especificados para as misturas betuminosas

Mistura	Percentagem óptima de betume (%)	Volume de vazios (%)
ADOT (ARAC)	7,5 a 8,5	5,5 ± 1,0
AI tipo IV	7,0	3,0 a 5,0
Caltrans (ARHM-GG)	7,0 a 9,0	4,0 a 6,0

O Quadro 6.3 apresenta a composição granulométrica (agregados e filer) utilizada para produção das misturas betuminosas, de acordo com cada tipo de granulometria. A percentagem de filer foi mantida igual para todas as misturas para não ser esta mais uma variável a ser analisada no comportamento do desempenho.

Quadro 6.3 – Composição das misturas com betume-borracha

Agregados	Caltrans	ADOT	AI
Brita 6/12 mm (%)	21	20	25
Brita 4/10 mm (%)	56	57	21
Pó 0/4 mm (%)	20	20	51
Filer calcário (%)	3	3	3

As misturas produzidas com os betumes BB15 e BB20 (tipo *terminal blend*) possuem a seguinte nomenclatura, de acordo com a granulometria:

- CBB20 (granulometria Caltrans e betume **BB20**);
- ABB20 (granulometria ADOT e betume **BB20**);
- IBB15 (granulometria AI e betume **BB15**).

As temperaturas de aquecimento dos materiais para a confecção da mistura e compactação, com base na viscosidade dos betumes-borracha, foram as seguintes (entre parêntesis estão as temperaturas especificadas pelo Greenbook (2000) e Caltrans (1999):

- betume-borracha: 180 °C (163 °C a 182 °C);
- agregados: 163 °C (143 °C a 163 °C);
- compactação: 160 °C (143 °C a 163 °C).

O Quadro 6.4 apresenta os resultados obtidos da formulação das misturas betuminosas com betume-borracha *terminal blend*, empregando-se a metodologia Marshall, (entre parêntesis estão anotados os limites especificados para cada mistura).

Quadro 6.4 – Resultados da formulação das misturas *terminal blend*

Mistura	Porcentagem óptima de betume (%)	Volume de vazios (%)
ABB20	7,5 (7,5 a 8,5)	6,0 (5,5 ± 1,0)
IBB15	6,0	5,0 (3,0 a 5,0)
CBB20	7,5 (7,0 a 9,0)	6,0 (3,0 a 6,0)

### 6.3.3. Misturas produzidas com betume-borracha *continuous blend*

As mesmas granulometrias adoptadas para produção de misturas com o betume-borracha *terminal blend* (Quadro 6.3) foram utilizadas para as misturas *continuous blend*. Os limites de percentagem óptima de betume para as misturas *continuous blend* são os mesmos especificados pelos organismos rodoviários, adoptados para as misturas *terminal blend* (Quadro 6.2).

As misturas produzidas com o betume optimizado na Fase 2 (17% de borracha em relação à massa do betume-borracha, tempo de digestão de 90 minutos a 180 °C e denominado BBbB), possuem as seguintes nomenclaturas:

- CBBbB (granulometria Caltrans e **B**etume **B**rasileiro com **b**orracha **B**rasileira);
- ABBbB (granulometria ADOT e **B**etume **B**rasileiro com **b**orracha **B**rasileira);
- IBBbB (granulometria AI e **B**etume **B**rasileiro com **b**orracha **B**rasileira).

A temperatura de aquecimento dos betumes-borracha do tipo *continuous blend* foi a mesma de produção, 180 °C. As temperaturas de aquecimento dos agregados de mistura de compactação foram as seguintes:

- agregados: 163 °C;
- betume-borracha: 180 °C;
- compactação: 160 °C.

Os resultados obtidos na formulação das misturas *continuous blend* são apresentados no Quadro 6.5, no qual entre parêntesis estão anotadas as especificações.

Quadro 6.5 – Resultados da formulação das misturas *continuous blend*

Mistura	Percentagem óptima de betume (%)	Volume de vazios (%)
ABBbB	7,5 (7,5 a 8,5)	6,0 (5,5 ± 1,0)
IBBbB	7,0	5,0 (3,0 a 5,0)
CBBbB	8,0 (7,0 a 9,0)	6,0 (4,0 a 6,0)

Relativamente aos Quadros 6.4 e 6.5, as percentagens de betume óptimas resultaram, em geral, superiores para as misturas *continuous blend*, para a mesma granulometria. Isto pode ser atribuído à forma de produção dos betumes, uma vez que o tempo de digestão do betume-borracha *terminal blend* é maior, os grãos de borracha estão melhor incorporados ao betume, não ocupando assim, espaço da mistura, fazendo com que a percentagem de betume seja menor. As percentagens obtidas estão enquadradas nas especificações.

#### 6.3.4. Mistura produzida com betume convencional

A mistura de granulometria densa foi produzida com betume convencional CAP 50/70 (BB); e especificada de acordo com o DNIT – ES 031 (2006). A nomenclatura adoptada para designar esta granulometria foi BBB (mistura **B**rasileira com **B**etume **B**rasileiro). O Quadro 6.6 apresenta a composição granulométrica da mistura convencional.

Quadro 6.6 – Composição granulométrica da mistura convencional

Agregados	BBB (DNIT Faixa “C”)
Brita 6/12 mm (%)	27
Brita 4/10 mm (%)	30
Pó 0/4 mm (%)	40
Filer calcário (%)	3

A norma DNIT – ES 031 (2006) especifica os seguintes limites para camadas de desgaste (rolamento):

- volume de vazios: 3 a 5%;

- relação betume/vazios (RBV): 75 a 82%;
- estabilidade mínima: 500 kgf (75 pancadas/face);
- vazios no agregado mineral mínimo (VMA): 15% (agregado com tamanho nominal de 19,1 mm).

A Figura 6.18 apresenta a relação da temperatura com a viscosidade para determinação das temperaturas de mistura e de compactação da mistura BBB.

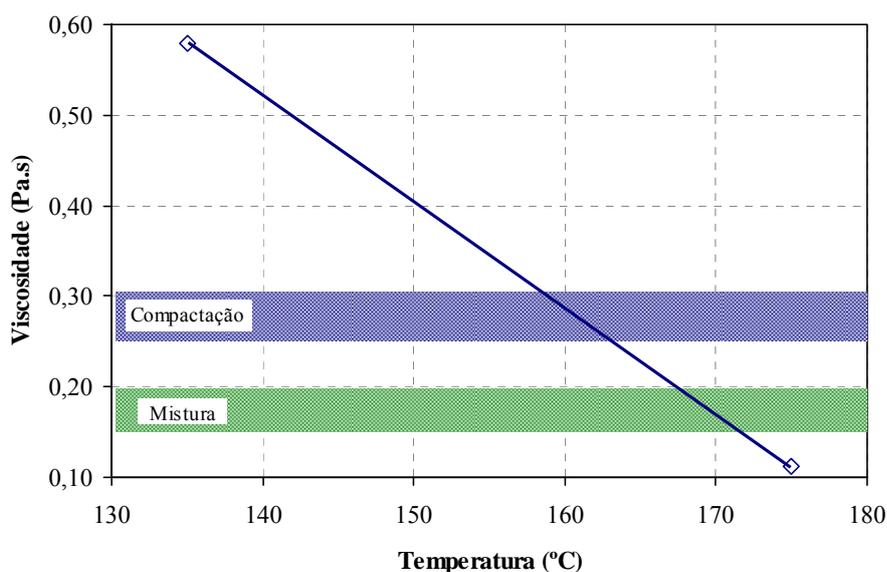


Figura 6.18 – Curva temperatura *versus* viscosidade do CAP 50/70

De acordo com os resultados da formulação Marshall, a percentagem óptima de betume obtida para a mistura convencional foi de 5,5% e o volume de vazios de 4,0%.

O AI (1989) recomenda as temperaturas de mistura e de compactação para misturas convencionais, de acordo com as seguintes gamas de viscosidade:  $0,17 \pm 0,02$  Pa.s e  $0,28 \pm 0,03$  Pa.s, respectivamente. Assim, de acordo com as viscosidades obtidas, as temperaturas de aquecimento dos materiais e de compactação foram as seguintes:

- agregados: 170 °C;
- betume convencional: 165 °C;
- mistura: 166 °C;
- compactação: 160 °C.

## 6.4. PRODUÇÃO DOS PROVETES PARA OS ENSAIOS DE DESEMPENHO

Após a formulação das misturas foram moldadas lajes (placas com dimensões 75 cm de comprimento, 49 cm de largura e 8 cm de espessura) para a obtenção de provetes para os ensaios de desempenho. O Quadro 6.7 apresenta as formulações das misturas estudadas.

Quadro 6.7 – Resultados da formulação das misturas

Mistura	Granulometria	Tipo de betume	Percentagem de betume (%)	Volume de vazios (%)	Baridade aparente (g/cm <sup>3</sup> )
ABB20	ADOT	<i>Terminal blend</i> , 20% de borracha	7,5	6,0	2,32
CBB20	Caltrans	<i>Terminal blend</i> , 20% de borracha	7,5	6,0	2,30
IBB15	AI	<i>Terminal blend</i> , 15% de borracha	6,0	5,0	2,31
ABBbB	ADOT	<i>Continuous blend</i> , 17% de borracha	7,5	6,0	2,15
CBBbB	Caltrans	<i>Continuous blend</i> , 17% de borracha	8,0	6,0	2,21
IBBbB	AI	<i>Continuous blend</i> , 17% de borracha	7,0	5,0	2,25
BBB	DNIT “C”	Convencional CAP 50/70	5,5	4,0	2,37

Para cada tipo de mistura betuminosa foram moldadas duas lajes, sendo uma para ensaios de módulo dinâmico e de fadiga e outra, para ensaio de deformação permanente.

A homogeneização dos materiais foi realizada em uma misturadora mecânica com capacidade de 50 kg em cada operação. Uma vez que cada laje necessita de 60 a 70 kg de material, a operação de mistura foi realizada em duas etapas (amassaduras).

O procedimento para a produção das misturas betuminosas consistiu nos seguintes passos:

- secagem dos agregados minerais em estufa nas temperaturas determinadas;
- pesagem dos agregados minerais e do betume (convencional ou com borracha) numa quantidade tal que a mistura final apresentasse, após a compactação, a baridade determinada no estudo de dosagem;
- colocação dos agregados minerais na misturadora e pré mistura durante 30 segundos;
- introdução do betume e mistura dos materiais durante 2 minutos (tempo necessário para o betume envolver completamente toda a superfície dos agregados) na misturadora;
- separação de 2,0 kg da mistura para realização do ensaio de baridade máxima teórica;
- compactação da mistura betuminosa.

A Figura 6.19 mostra os quatro passos do processo de produção das misturas na misturadora mecânica, realizado a cada amassadura: (a) após a colocação e pré-mistura dos agregados; (b) após a introdução do betume (c) início do processo de mistura; (d) mistura final ou amassadura completa (materiais misturados durante 2 minutos).



Figura 6.19 – Homogeneização dos materiais

Após a produção, as misturas betuminosas são colocadas em um molde metálico ( $75 \times 49 \times 8 \text{ cm}^3$ ) tendo a compactação sido realizada com um rolo liso de médio porte (modelo WACKER RS 800 com massa total de 861 kg). A compactação prosseguiu até se atingir a baridade de projecto obtida na dosagem Marshall para cada tipo de mistura.

O procedimento utilizado para a compactação das misturas betuminosas seguiu o preconizado pela norma AASHTO PP3 (1994), tendo em conta a obtenção da compactação mais próxima daquela que ocorre no pavimento. Após a compactação, as lajes permaneceram no molde até completo resfriamento.

A Figura 6.20 apresenta a sequência de compactação das misturas:

- (a) molde metálico rectangular preenchido com mistura solta;
- (b) rolo liso compactador;
- (c) mistura compactada (laje) no interior do molde.



(a) molde com mistura solta



(b) rolo liso compactador



(c) laje compactada no molde

Figura 6.20 – Sequência de compactação de uma mistura

Após a desmoldagem das lajes, foram obtidos os provetes para realização dos ensaios de desempenho. Para os ensaios de fadiga e de módulo dinâmico, foram serrados 9 provetes prismáticos com as seguintes dimensões médias: 381,0 mm de comprimento, 50,8 mm de altura e 63,5 mm de largura. Para o ensaio de deformação permanente, 8 provetes cilíndricos (carotes) com 15,0 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura foram extraídos através do emprego de um carateador (sonda rotativa).

A Figura 6.21 apresenta o esquema de obtenção dos provetes (foi produzida uma laje para cada conjunto de provetes), e a Figura 6.22 mostra a forma de obtenção dos provetes.

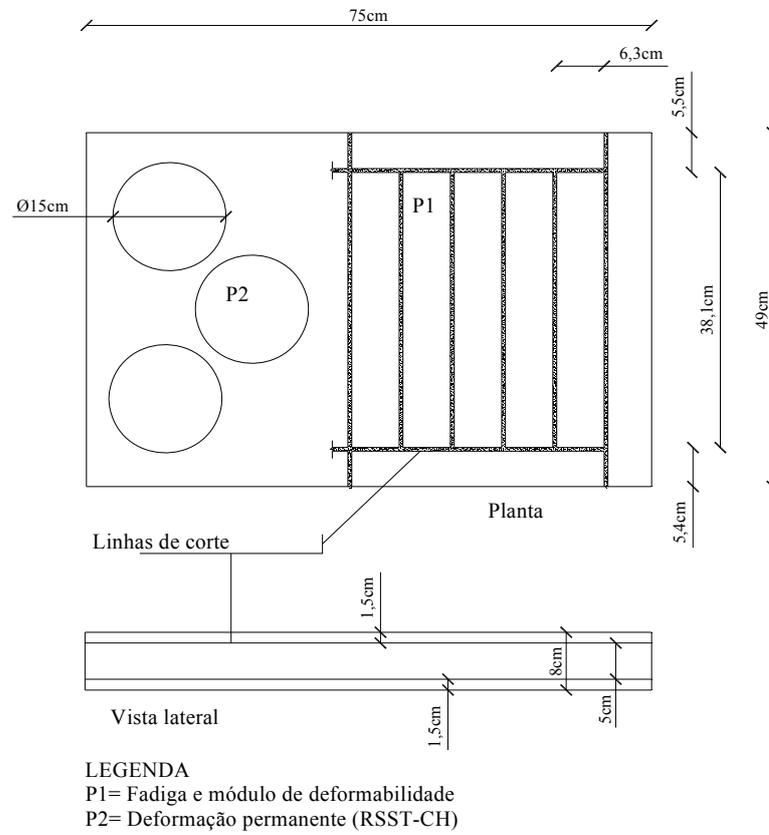


Figura 6.21 – Esquema de corte das lajes para obtenção de provetes



(a) disco de corte



(b) caroteador (sonda rotativa)

Figura 6.22 – Forma de obtenção dos provetes

As Figuras 6.23 e 6.24 apresentam os provetes viga e carote, respectivamente.

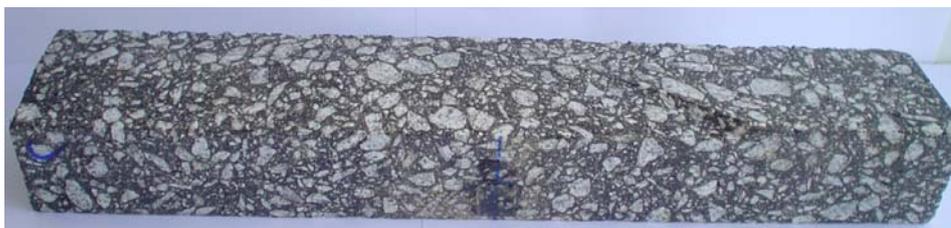


Figura 6.23 – Provede prismático (viga) para ensaios de fadiga e de módulo dinâmico



Figura 6.24 – Provede cilíndrico (carote) para ensaios de deformação permanente

Após a serragem e secagem em ambiente climatizado ( $20,0\text{ °C} \pm 1,0\text{ °C}$ ) foi feita a selecção dos provetes para serem ensaiados, constituindo amostras homogéneas, através da medição das dimensões e da baridade aparente de cada provete (metodologia da balança hidrostática).

## 6.5. ENSAIOS MECÂNICOS DE DESEMPENHO

Os ensaios mecânicos para a avaliação do desempenho das misturas betuminosas foram os seguintes: (i) módulo dinâmico; (ii) resistência à fadiga; (iii) módulo de corte; (vi) ensaio resistência à deformação permanente.

### 6.5.1. Ensaio de módulo dinâmico

A Figura 6.25 mostra o equipamento (modelo CS 7800) utilizado para a realização dos ensaios de módulo dinâmico e de fadiga, dentro da qual se encontra um dispositivo que permite a realização de ensaios de flexão alternada em 4 pontos.



Figura 6.25 – Equipamento servo-hidráulico para a realização dos ensaios de flexão alternada (modelo CS 7800)

A estrutura de carga é composta por um actuador vertical ligado a uma servo-válvula na extremidade do qual se encontra uma célula de carga. O dispositivo de flexão em 4 pontos encontra-se ligado inferiormente à estrutura de carga e superiormente à extremidade inferior do actuador vertical. A câmara climática permite o controlo de temperaturas desde os  $-20\text{ °C}$  até  $+70\text{ °C}$  com precisão de  $\pm 0,5\text{ °C}$ , sendo essencial para manter a temperatura constante durante todo o ensaio. O dispositivo de flexão em 4 pontos é apresentado na Figura 6.26.

A determinação do módulo dinâmico e do ângulo de fase foi realizada aplicando-se um carregamento sinusoidal alternado, correspondente a uma extensão máxima de tracção na base do provete de  $50 \times 10^{-6}$ . Os ensaios foram conduzidos em ordem decrescente de frequência tendo-se aplicado 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2 e 0,1 Hz, de acordo com o preconizado na norma ASTM 3497 (1995).

O número de ciclos de carga foi de 100 para as três primeiras frequências e de 10 para as restantes. Estes ensaios foram repetidos para 3 temperaturas: 15, 20 e 25 °C. Os sete ensaios para cada temperatura foram realizados sobre uma mesma viga, sendo que o reduzido número de ciclos de carga não provoca significativa redução da rigidez do material, podendo a mesma

viga ser utilizada para realização dos ensaios de fadiga. O ensaio de módulo dinâmico é realizado no mesmo dispositivo no qual são conduzidos os ensaios de fadiga.

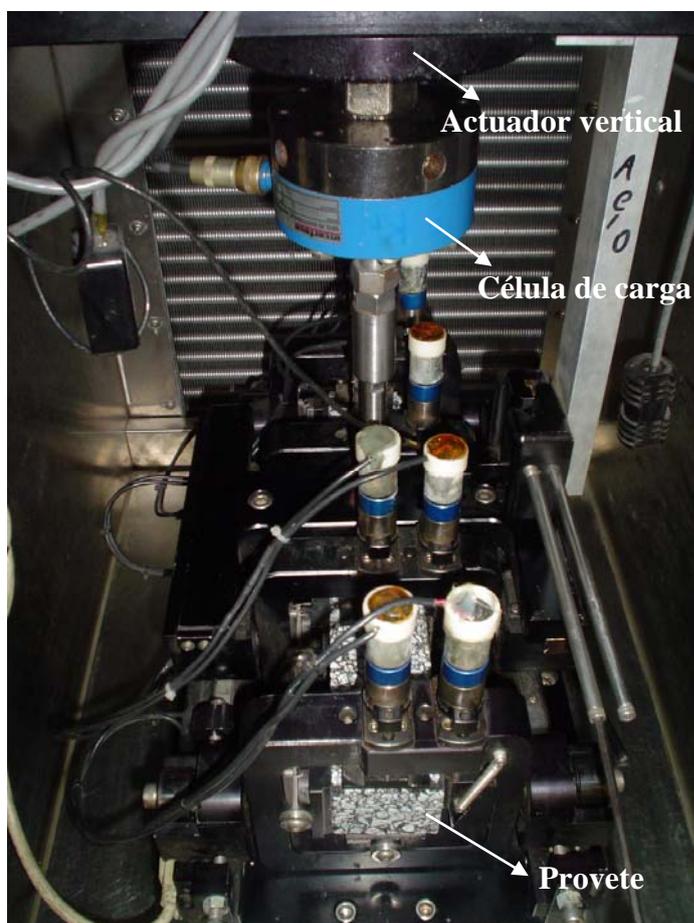
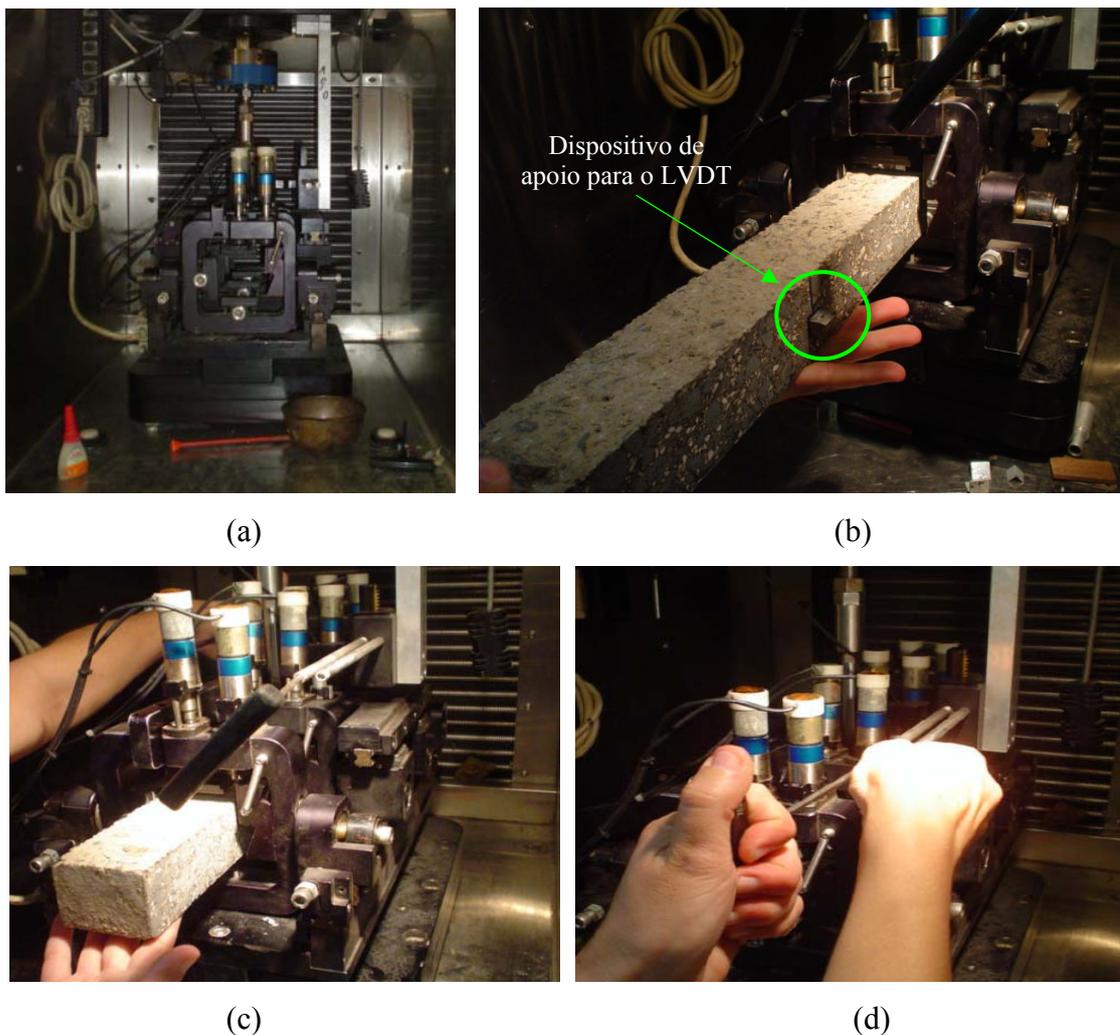


Figura 6.26 – Dispositivo de flexão alternada em 4 pontos

A Figura 6.27 apresenta a sequência de colocação do provete prismático no equipamento de flexão em 4 pontos para ensaios de fadiga e módulo, sendo em:

- (a) equipamento de flexão em 4 pontos;
- (b) introdução do provete e no detalhe mostrado o dispositivo colado no centro do provete, sobre o qual o LVDT estará apoiado para medição dos deslocamentos;
- (c) posicionamento do provete no equipamento;
- (d) ajuste do LVDT sobre o apoio.



(a) (b) (c) (d)  
 Figura 6.27 – Colocação do provete no equipamento

Os ensaios de fadiga foram realizados conforme preconiza a norma AASHTO TP8 (1994) (*Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending*).

Os provetes prismáticos, simplesmente apoiados nas extremidades, foram submetidos a um carregamento sinusoidal alternado em extensão controlada, num sistema de carregamento central em dois pontos, como o apresentado na Figura 6.28.

Neste ensaio, uma carga de intensidade  $F_0/2$  é aplicada nos terços médios do provete, de modo a induzir uma extensão de tracção predefinida. Para a avaliação da vida de fadiga, foram realizadas 3 repetições para cada um dos níveis de extensões seleccionados (200, 400 e 800  $\mu\text{m/m}$ ), à temperatura de 20 °C e frequência de 10 Hz.

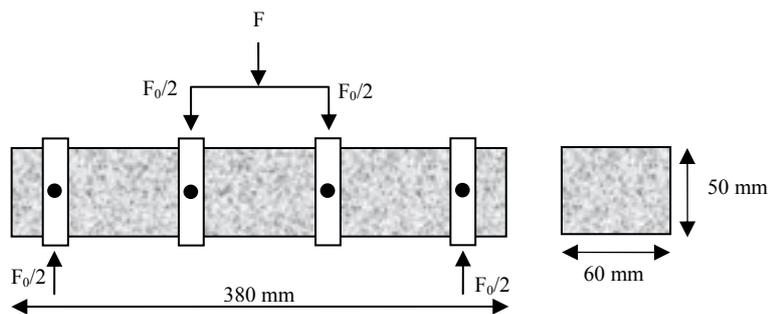


Figura 6.28 – Representação do carregamento aplicado no ensaio de flexão alternada em 4 pontos em provetes prismáticos

As Equações 6.2 e 6.3 representam a máxima tensão e extensão de tracção a partir dos resultados dos ensaios e as Equações 6.4 e 6.5 o módulo e o ângulo de fase, respectivamente, de acordo com a AASHTO TP8 (1994)<sup>2</sup>:

$$\sigma_{\text{tmax}} = \frac{0,357 \times F}{b \times h^2} \quad (6.2)$$

onde:

$\sigma_{\text{tmax}}$  = máxima tensão de tracção (Pa);

F = carga vertical total aplicada, ajustada para gerar no provete o nível de extensão seleccionado (N);

b = largura do provete (m);

h = altura do provete (m).

$$\epsilon_{\text{tmax}} = \frac{12 \times \delta_v \times h}{3 \times L^2 - 4 \times a^2} \quad (6.3)$$

onde:

$\epsilon_{\text{tmax}}$  = máxima extensão de tracção (m/m);

$\delta_v$  = máxima deflexão vertical no centro do provete, medida com o LVDT, a partir da carga F aplicada (m);

h = altura do provete (m);

L = comprimento do provete medido entre as reacções de apoio (m);

a = espaçamento entre os pontos de aplicação de carga (m).

<sup>2</sup> Esta norma é correspondente à SHRP M-009 (Standard Method of Test for Determining the Datigue Life of Compacted Bituminous Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending), based on SHRP Product 1019.

$$E = \frac{\sigma_{tm\acute{a}x}}{\epsilon_{tm\acute{a}x}} \tag{6.4}$$

$$\phi = 360 \times f \times s \tag{6.5}$$

onde:

E = módulo dinâmico (MPa);

φ = ângulo de fase (°);

f = frequência de aplicação da carga (Hz);

s = tempo de defasagem entre a aplicação de F e o deslocamento produzido no provete (s)

O Quadro 6.8 apresenta os valores do módulo dinâmico e do ângulo de fase obtidos para a frequência de 10 Hz à temperatura de 20 °C (temperatura na qual foram realizados os ensaios de fadiga, preconizada pela norma AASHTO TP8, 1994).

Quadro 6.8 – Módulo dinâmico e ângulo de fase (10 Hz; 20 °C)

Mistura	Granulometria	Percentagem de betume (%)	Volume de vazios (%)	Módulo dinâmico (MPa)	Ângulo de fase (°)
ABB20	<i>Gap graded</i>	7,5	6,0	4089	21
CBB20	<i>Gap graded</i>	7,5	6,0	4810	21
IBB15	<i>Dense graded</i>	6,0	5,0	5399	19
ABBbB	<i>Gap graded</i>	7,5	6,0	3809	21
CBBbB	<i>Gap graded</i>	8,0	6,0	4593	20
IBBbB	<i>Dense graded</i>	7,0	5,0	5014	18
BBB	<i>Dense graded</i>	5,5	4,0	6314	20

As curvas isotérmicas das misturas (representação do módulo dinâmico em função da frequência) e também o ângulo de fase em função da frequência são ilustrados graficamente nas Figuras 6.29 e 6.30 à temperatura de 20 °C.

Relativamente ao módulo de dinâmico, através da Figura 6.29 e Quadro 6.8, verifica-se, nas misturas com betume-borracha, que o aumento da percentagem de betume diminui o valor do módulo. Da mesma forma, quanto maior o volume de vazios na mistura, menor o valor do módulo de dinâmico. Assim, para efeitos de comparação entre os módulos, esta deve ser feita

entre as misturas com o mesmo ou similar volume de vazios. Este comportamento foi comum a todas as misturas betuminosas estudadas.

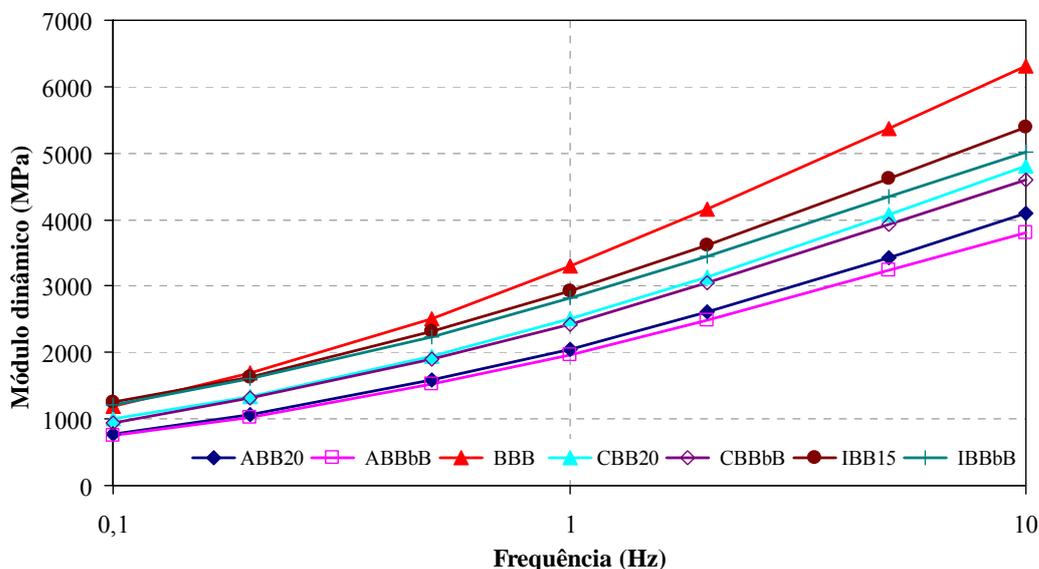


Figura 6.29 – Módulo dinâmico das misturas em função da frequência de aplicação de carga à temperatura de 20 °C

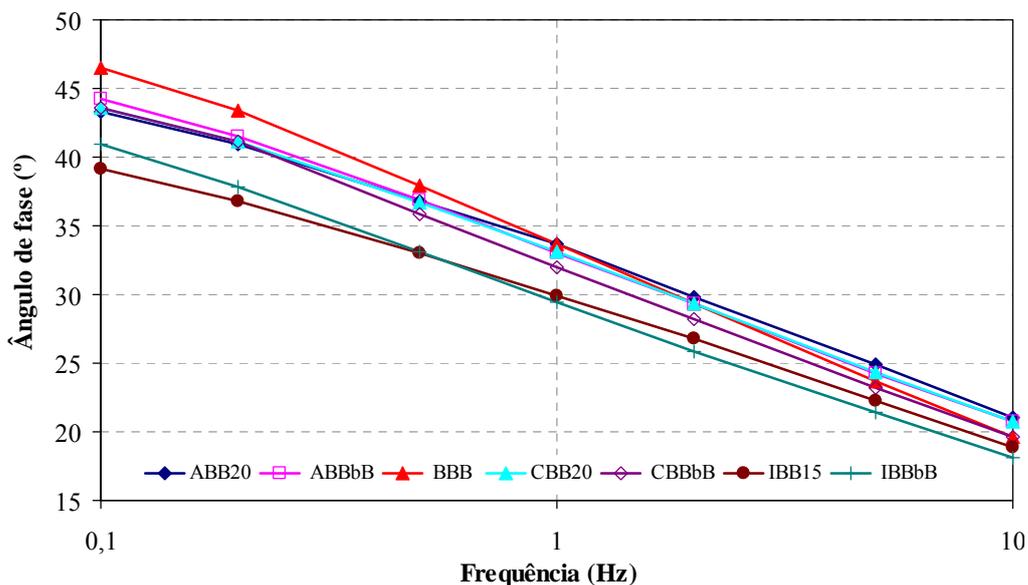


Figura 6.30 – Ângulo de fase das misturas em função da frequência de aplicação de carga à temperatura de 20 °C

De uma forma geral, observou-se que as misturas com betume-borracha apresentaram um módulo inferior ao da mistura convencional nestas condições de temperatura e frequência, o que demonstra que a incorporação da borracha granulada ao betume convencional aumenta a

flexibilidade das misturas. As misturas betuminosas de granulometria contínua (*dense graded*) são mais rígidas, ou seja, apresentam maiores valores para o módulo dinâmico do que as misturas de granulometria descontínua (*gap graded*). Outra observação importante relativa ao decréscimo do módulo dinâmico das misturas com betume-borracha em relação à mistura convencional é que o domínio do comportamento do módulo deixa de ser representado pelo betume convencional e passa a ser ditado pela borracha e suas características elásticas a partir do betume-borracha.

Quanto ao ângulo de fase, indicador das propriedades elásticas e viscosas dos materiais betuminosos, os resultados apresentaram-se semelhantes à exceção das misturas produzidas com a granulometria *dense graded* do AI, as quais demonstraram serem mais elásticas que as outras (menor ângulo de fase). Esta tendência foi observada tanto para baixas frequências quanto para frequências mais elevadas. Estes resultados mostram que a incorporação da borracha granulada melhora as propriedades elásticas das misturas betuminosas modificadas pela diminuição do ângulo de fase em relação à mistura convencional.

As Figuras 6.31 e 6.32 apresentam o módulo dinâmico e o ângulo de fase em função da frequência aplicada à temperatura de 25 °C (temperatura média anual da região de Florianópolis).

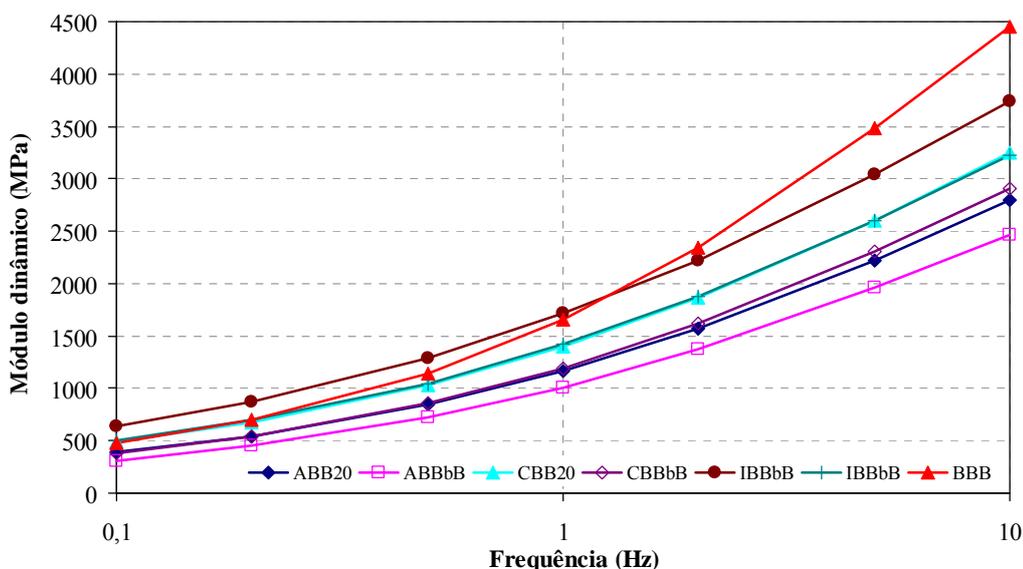


Figura 6.31 – Módulo dinâmico das misturas em função da frequência de aplicação de carga à temperatura de 25 °C

Para a temperatura de 25 °C, as misturas com betume-borracha *terminal blend* apresentam maiores valores de módulo dinâmico (excepção da mistura ABB20, e também a mistura IBbBB). Nesta situação, um módulo mais elevado é desejável tendo em conta o aparecimento de deformações permanentes. A mistura convencional BBB apresentou o maior módulo dinâmico.

De acordo com a Figura 6.32 fica evidente que para uma mesma granulometria e à 25 °C, as misturas com betume-borracha *terminal blend* apresentam menores ângulos de fase em relação às misturas com betume-borracha *continuous blend*, o que se traduz numa maior componente elástica. A mistura convencional BBB apresentou ângulos de fase mais elevados para todas as frequências aplicadas, indicando uma componente viscosa maior, com uma tendência a ser mais susceptível à acção da temperatura. Ainda é possível observar o bom comportamento das misturas produzidas com a granulometria AI em relação às demais.

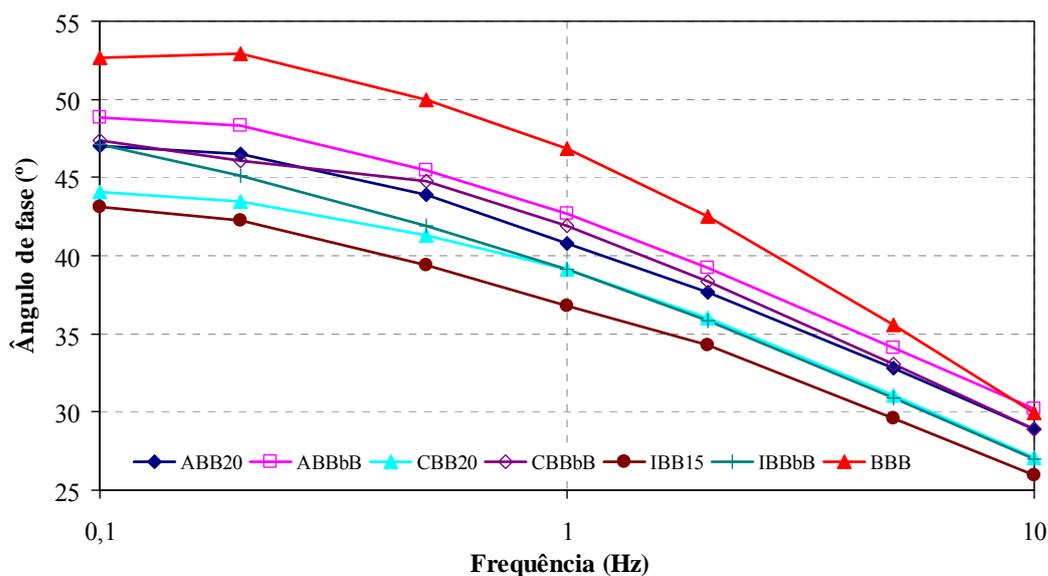


Figura 6.32 – Ângulo de fase das misturas em função da frequência de aplicação de carga à temperatura à 25 °C

As Figuras 6.33 e 6.34 mostram, respectivamente, o módulo dinâmico e o ângulo de fase em função da frequência aplicada à temperatura de 15 °C. De acordo com a Figura 6.33, as misturas com betume-borracha *continuous blend* apresentam menores valores de rigidez (excepção da mistura IBbBB). No caso das misturas com betume-borracha *terminal blend*, a ABB20 apresentou baixo módulo dinâmico em relação às outras misturas deste tipo. A

mistura convencional BBB apresentou-se a mais rígida, nesta temperatura, com o maior valor de módulo dinâmico, sendo assim mais susceptível ao fendilhamento a baixas temperaturas.

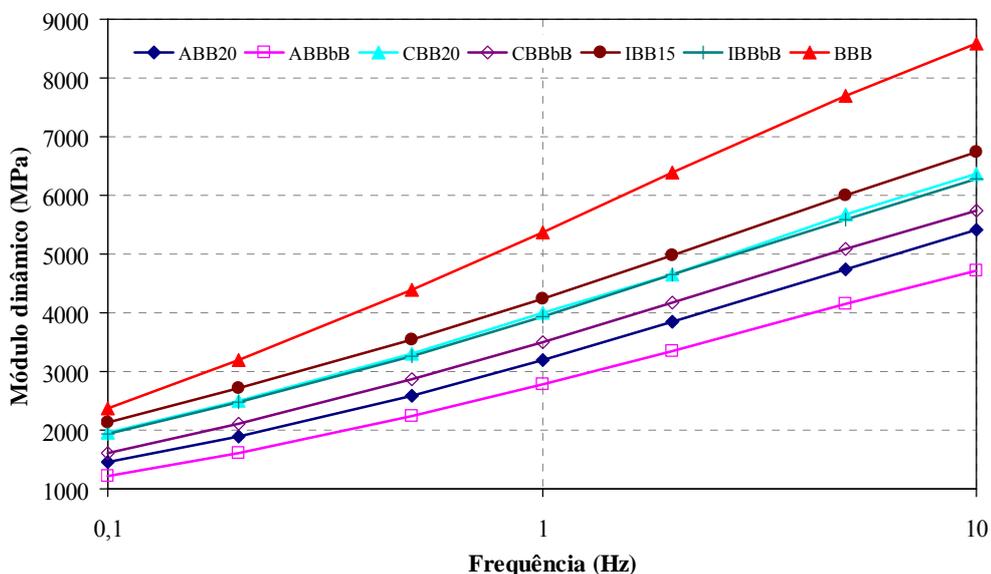


Figura 6.33 – Módulo dinâmico das misturas em função da frequência de aplicação de carga à temperatura de 15 °C

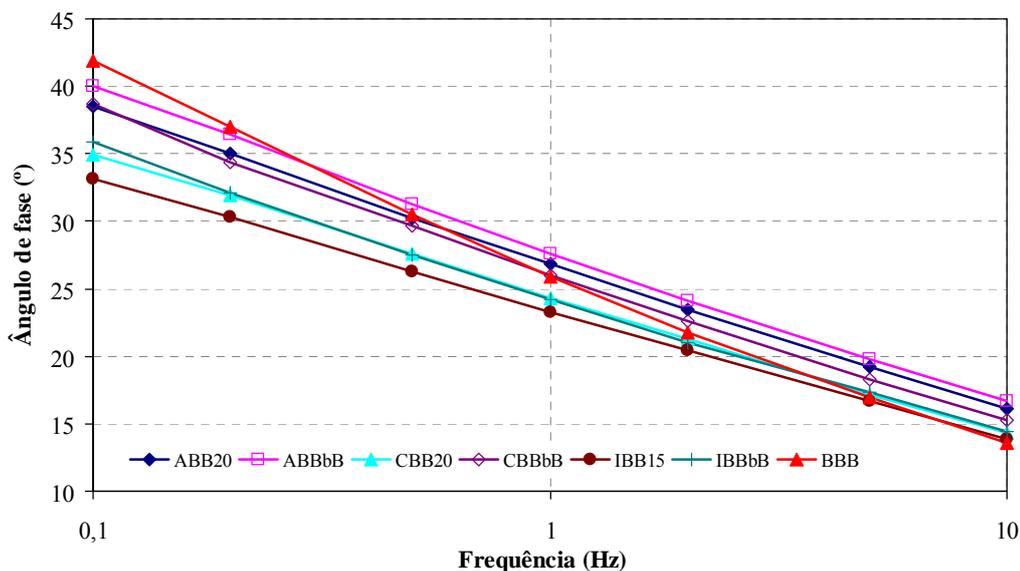


Figura 6.34 – Ângulo de fase das misturas em função da frequência de aplicação de carga à temperatura de 15 °C

Relativamente ao ângulo de fase, a tendência observada é similar em relação às temperaturas de 20 °C e 25 °C, no qual o melhor comportamento é devido às misturas com betume-borracha *terminal blend* e *continuous blend* com granulometria AI.

A análise do comportamento do módulo dinâmico e do ângulo de fase permite concluir que o módulo dinâmico aumenta com o aumento da frequência e diminui com o aumento da temperatura; enquanto que o ângulo de fase diminui com o aumento da frequência e aumenta com o aumento da temperatura. Uma granulometria densa influencia no aumento do módulo. Este comportamento foi evidenciado em todas as misturas estudadas e era o esperado de acordo com a literatura internacional.

### Curva de equivalência frequência-temperatura ou *master-curve*

No domínio da viscoelasticidade linear, através do princípio da equivalência frequência-temperatura, pode traçar-se o gráfico do módulo dinâmico em função da frequência, fazendo a translação da cada curva isotérmica de maneira a obter uma curva contínua na escala logarítmica. A Figura 6.35 apresenta a curva frequência-temperatura das misturas com betume-borracha e da mistura convencional para a temperatura de referência de 20 °C, obtida através da translação gráfica.

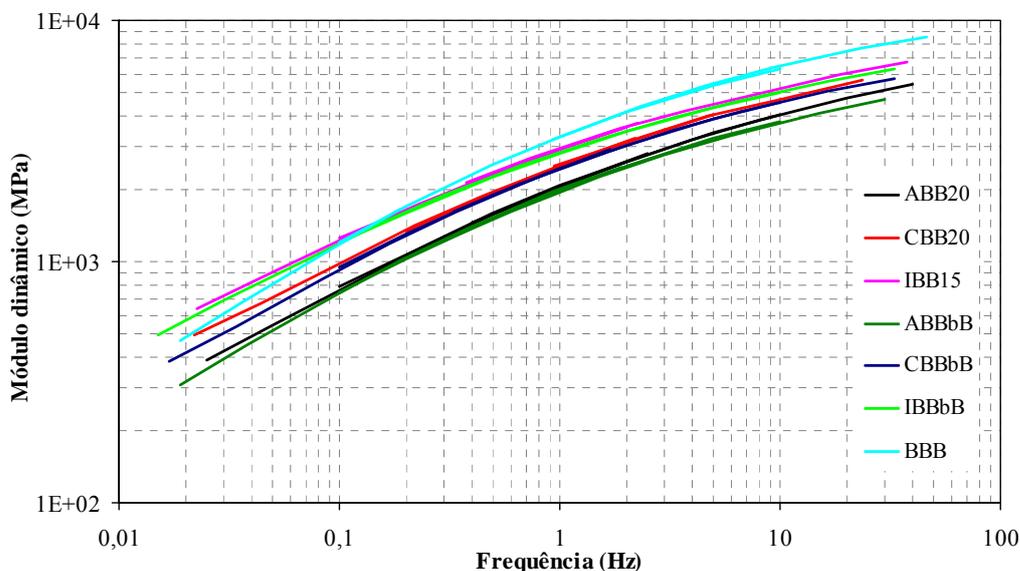


Figura 6.35 – Curvas de equivalência frequência-temperatura das misturas (referência 20 °C)

A *master-curve* caracteriza a viscoelasticidade da mistura betuminosa. Uma curva horizontal, representa uma mistura betuminosa com comportamento puramente elástico, enquanto que uma curva bem próximo da vertical, mostra o comportamento da mistura betuminosa muito susceptível às variações de temperatura e de frequência. A curva da mistura BBB apresenta a maior susceptibilidade térmica em relação às demais misturas. Isto pode ser melhor

observado, tomando-se parte das curvas entre as frequências de 1 a 10 Hz, como apresenta a Figura 6.36.

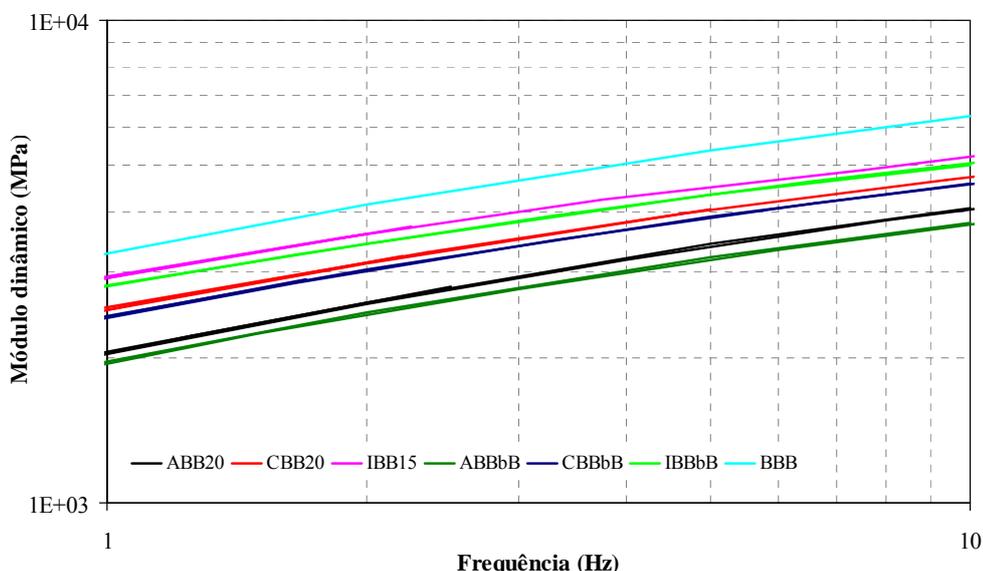


Figura 6.36 – Curvas de equivalência frequência-temperatura para frequências entre 1 e 10 Hz

### Espaço de Black

O Espaço de Black corresponde ao gráfico representado pelo ângulo de fase em função do módulo, como apresentado nas Figuras 6.37 a 6.43. Nestas curvas, a frequência é crescente da esquerda para a direita.

O Espaço de Black comporta no eixo das ordenadas, o ângulo de fase e nas abcissas o logaritmo do módulo dinâmico (norma do módulo complexo) para uma gama de temperaturas e frequências. Assim, quando a sobreposição é perfeita (depende das características intrínsecas de cada material, principalmente em misturas com betumes-borracha), cada valor de módulo corresponde a um valor do ângulo de fase.

Através do Espaço de Black é possível determinar certas particularidades das misturas estudadas, como avaliar o módulo e o ângulo de fase para uma gama de frequências tendo como referência uma temperatura. No domínio das baixas temperaturas e elevadas frequências, o módulo tende a um valor limite e o ângulo de fase diminui. Ao contrário, no domínio das elevadas temperaturas e baixas frequências, o módulo diminui e o ângulo de fase tende a um valor máximo.

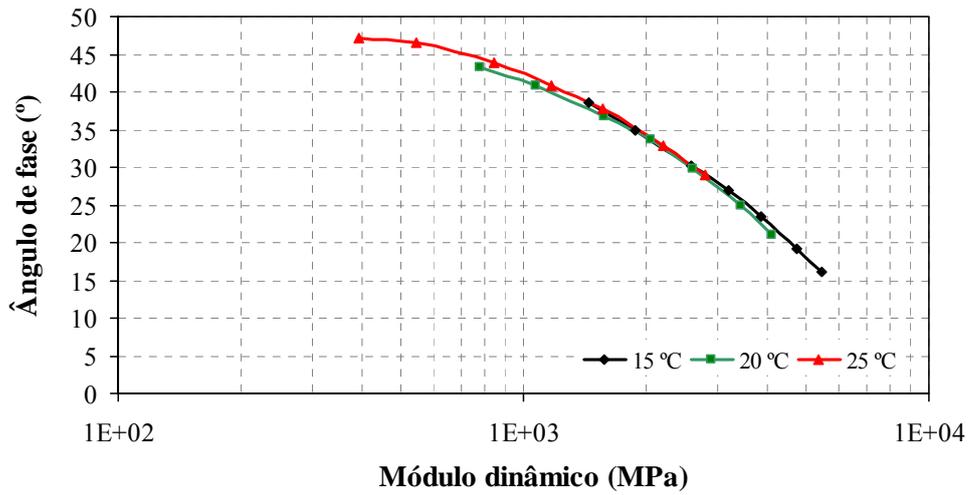


Figura 6.37 – Espaço de Black da mistura ABB20

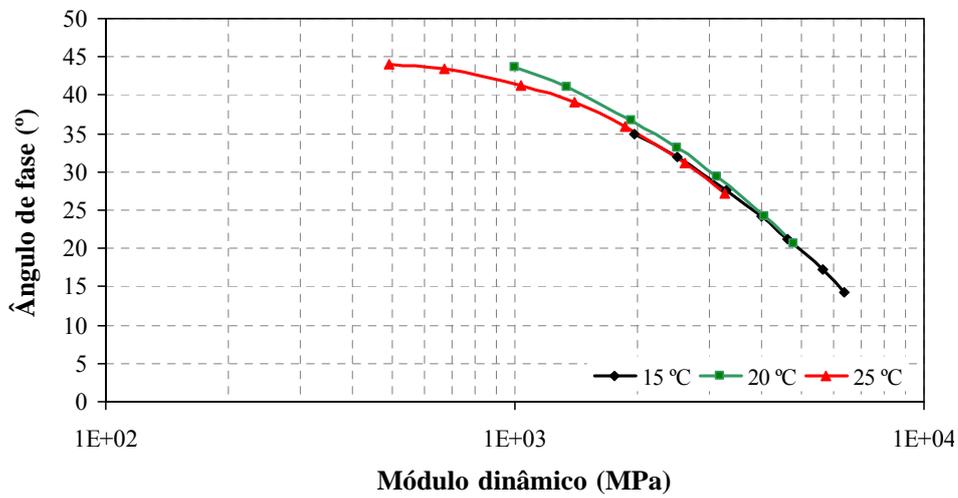


Figura 6.38 – Espaço de Black da mistura CBB20

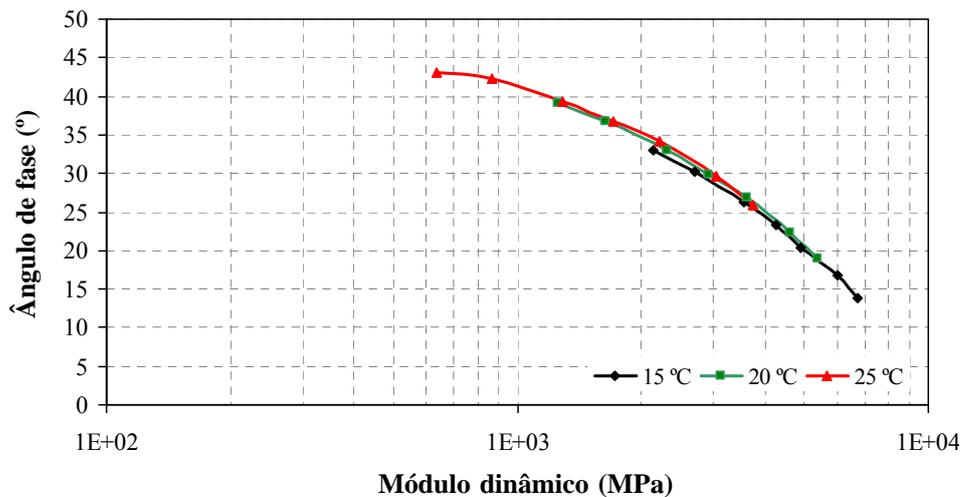


Figura 6.39 – Espaço de Black da mistura IBB15

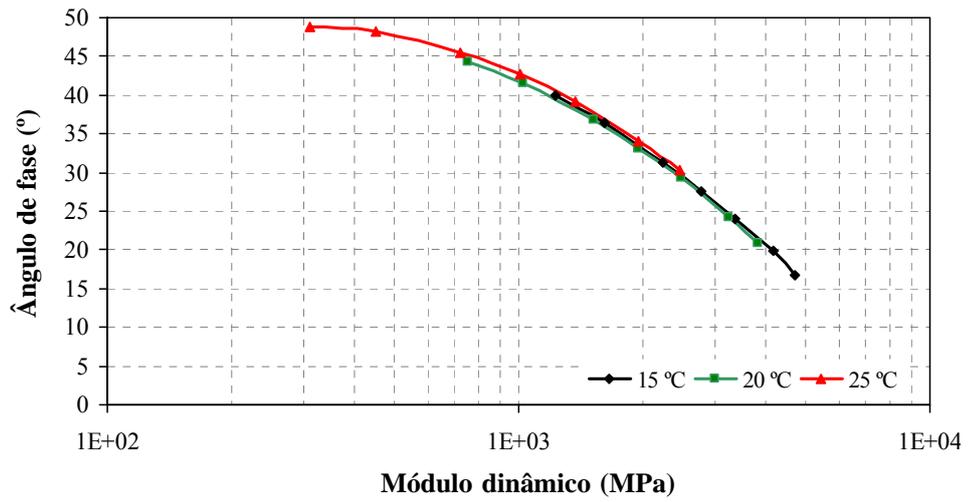


Figura 6.40 – Espaço de Black da mistura ABBbB

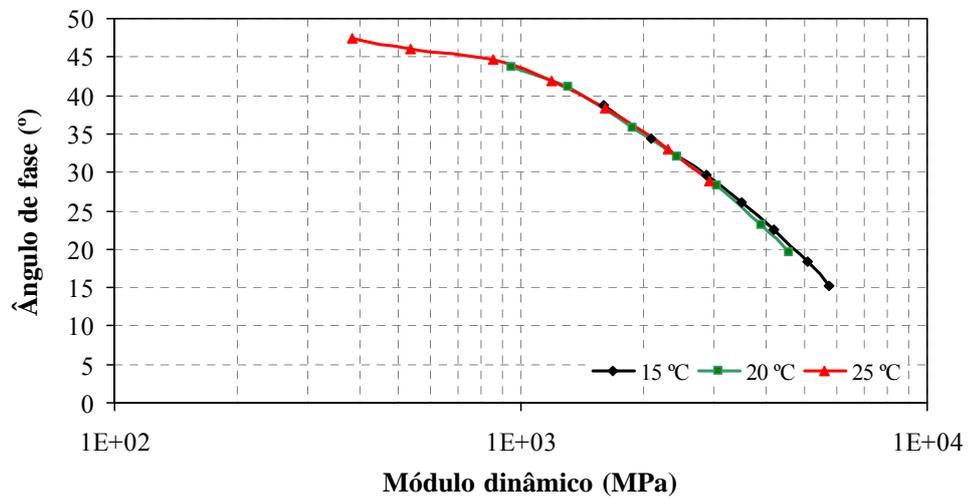


Figura 6.41 – Espaço de Black da mistura CBBbB

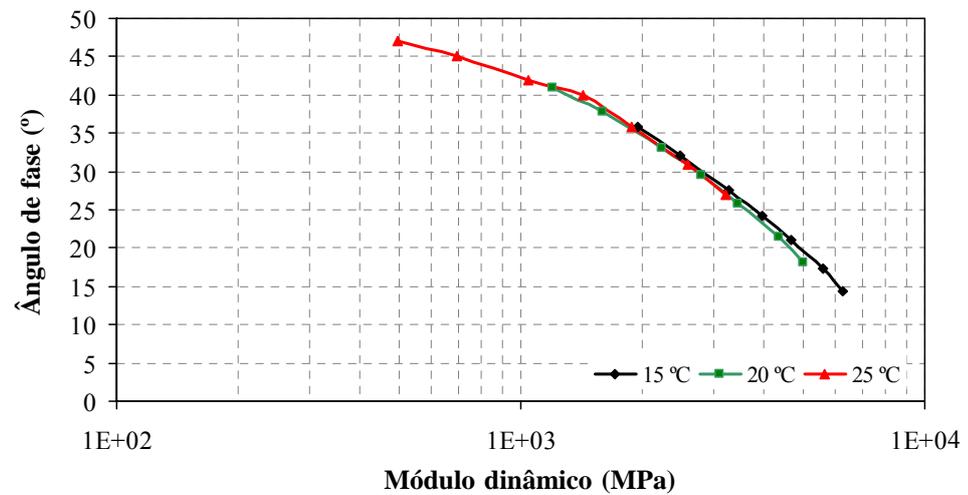


Figura 6.42 – Espaço de Black da mistura IBBbB

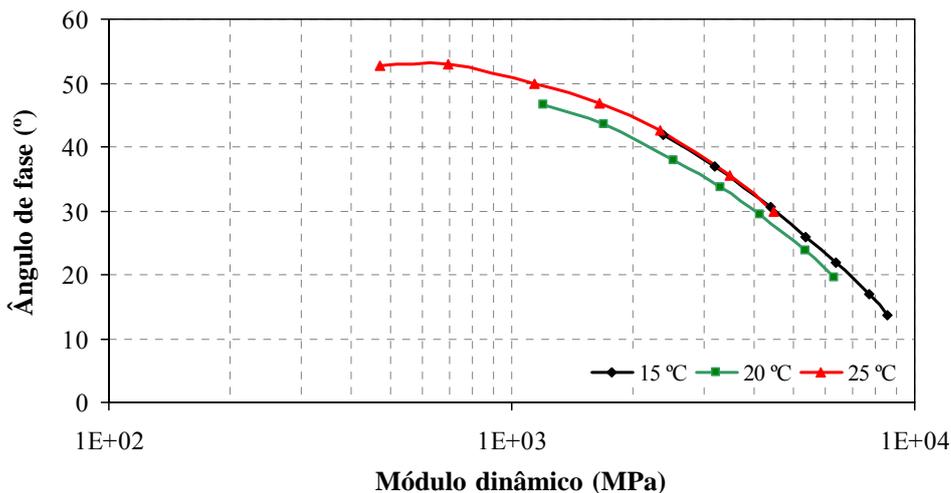


Figura 6.43 – Espaço de Black da mistura BBB (referência)

### Representação no plano Cole-Cole

O plano Cole-Cole é a representação gráfica da parte real ( $E_1$ ) e da parte imaginária ( $E_2$ ) do módulo complexo. A parte imaginária ( $E_2$ ) do módulo complexo representa a energia perdida por atrito interno do material, ou seja, o comportamento viscoso irreversível, enquanto que a parte real ( $E_1$ ) representa a energia armazenada. As Figuras de 6.44 a 6.50 ilustram a representação no plano Cole-Cole das misturas estudadas.

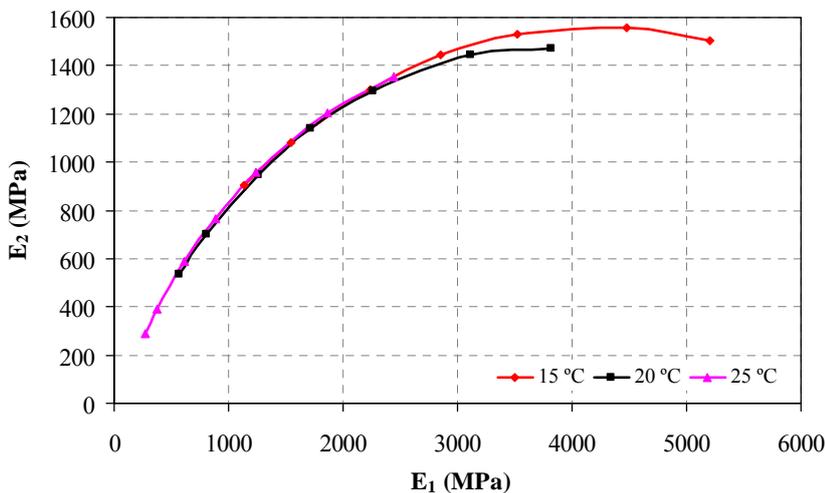


Figura 6.44 – Representação Cole-Cole da mistura ABB20

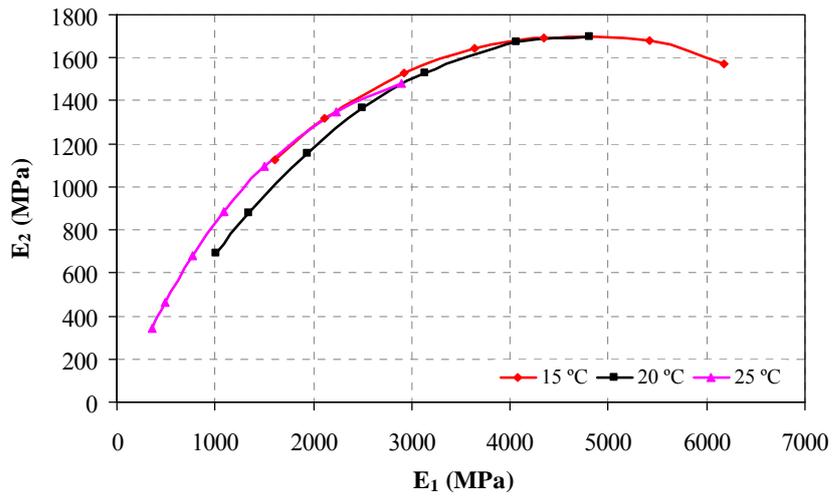


Figura 6.45 – Representação Cole-Cole da mistura CBB20

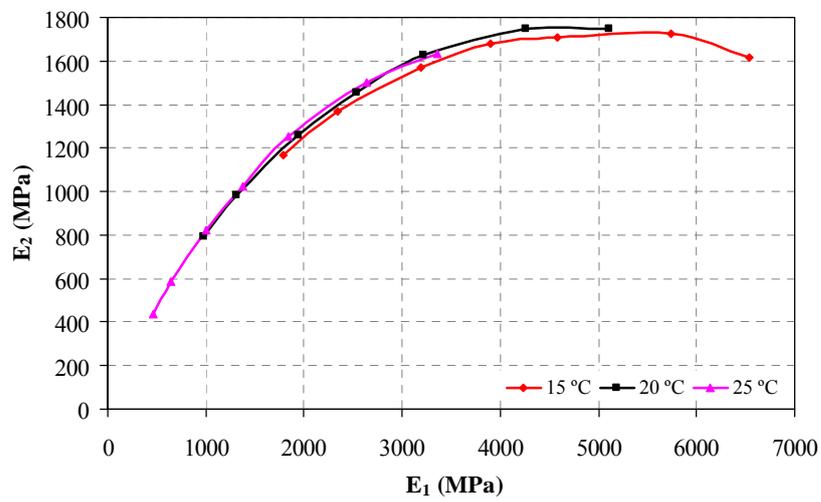


Figura 6.46 – Representação Cole-Cole da mistura IBB15

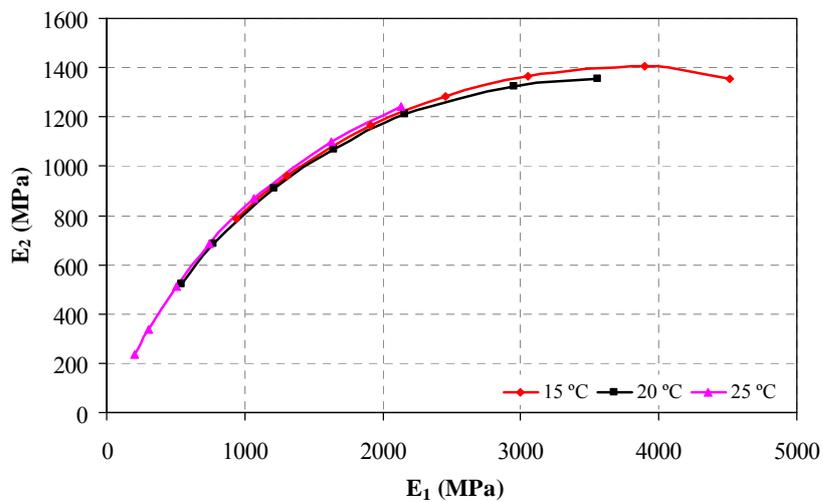


Figura 6.47 – Representação Cole-Cole da mistura ABBbB

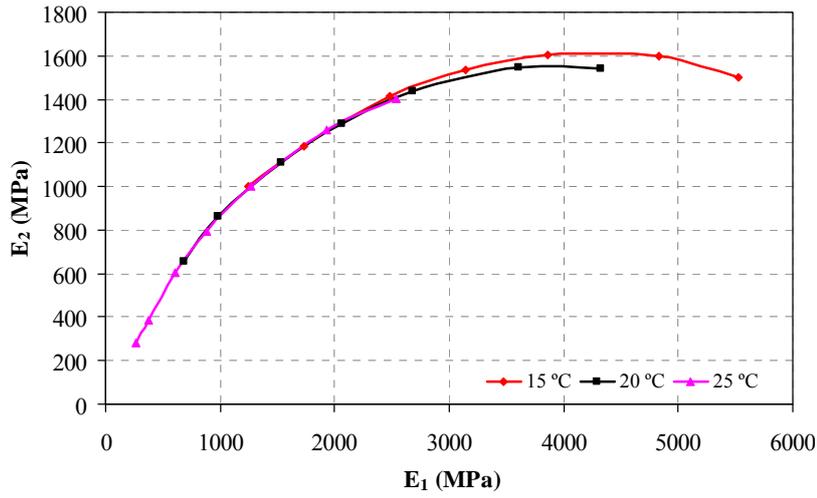


Figura 6.48 – Representação Cole-Cole da mistura CBBbB

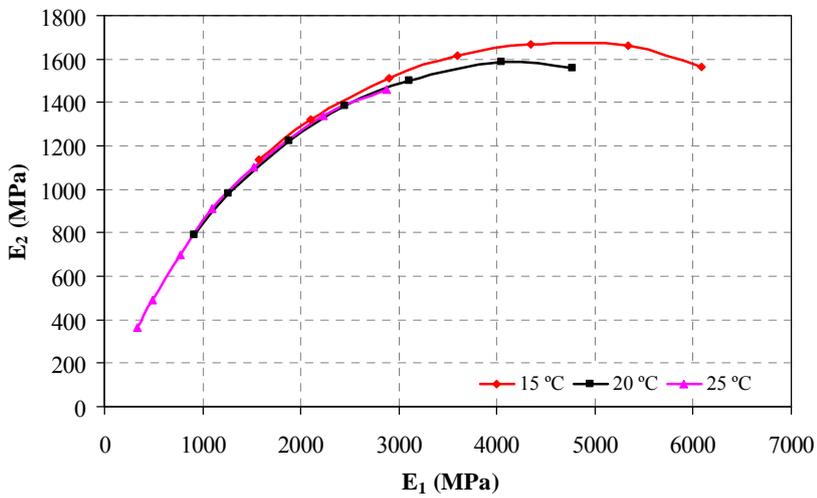


Figura 6.49 – Representação Cole-Cole da mistura IBbBb

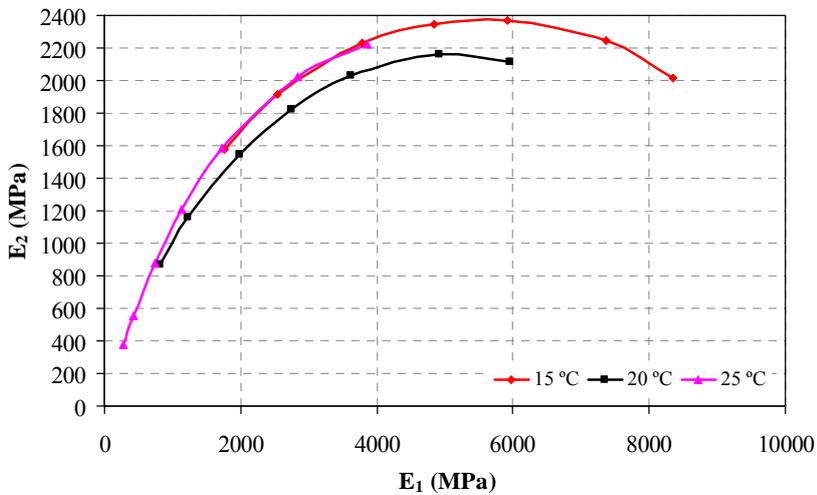


Figura 6.50 – Representação Cole-Cole da mistura BBB (referência)

Para todas as misturas, independente do tipo de betume, o formato da curva é a mesma, em arco de semi-círculo. A principal diferença entre elas reside no declive obtido, no qual pode avaliar-se o módulo real ( $E_1$ ) e o imaginário ( $E_2$ ) e compará-los. A maior inclinação, determinada pela recta a partir da origem até o valor máximo de  $E_2$ , fornece uma indicação da mistura com a tendência do pior comportamento à fadiga na temperatura determinada, ou seja, onde for maior o módulo imaginário ( $E_2$ ), indicando um comportamento menos elástico.

Relativamente às misturas estudadas, os mais elevados valores de módulo imaginário foram obtidos nas temperaturas de 15 °C e 20 °C, indicando que a energia perdida seria maior a cada aplicação de carga e, conseqüentemente, um desempenho inferior à fadiga. Os ensaios de fadiga foram realizados na temperatura de 20 °C, tendo em conta este indicativo e também em concordância com o preconizado na norma AASHTO TP8 (1994). Dentre as misturas estudadas, a de referência BBB obteria uma resistência à fadiga inferior.

### 6.5.2. Ensaio de fadiga

Nos ensaios de fadiga, realizados em extensão controlada, os resultados são expressos em termos do número de ciclos que produz uma redução de 50% na rigidez inicial da mistura, representada pelo módulo dinâmico inicial.

A determinação das leis de fadiga corresponde a um ajuste de uma função de potência  $N = a \times (1/\varepsilon_i)^b$  aos resultados obtidos nos ensaios. Os parâmetros obtidos são apresentados no Quadro 6.9, considerando a extensão expressa em  $10^{-6}$ , verificando-se um bom ajuste para todas as misturas. A Figura 6.51 apresenta as curvas de fadiga das misturas estudadas.

Quadro 6.9 – Parâmetros experimentais obtidos para as leis de fadiga

Parâmetro	ABB20	CBB20	IBB15	ABBbB	CBBbB	IBBbB	BBB
a	$6,578 \times 10^{11}$	$4,761 \times 10^{10}$	$4,966 \times 10^{13}$	$5,193 \times 10^{15}$	$6,426 \times 10^{14}$	$3,715 \times 10^{16}$	$1,185 \times 10^{15}$
b	2,708	2,285	3,315	4,249	3,807	4,427	4,037
R <sup>2</sup>	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,98	0,99

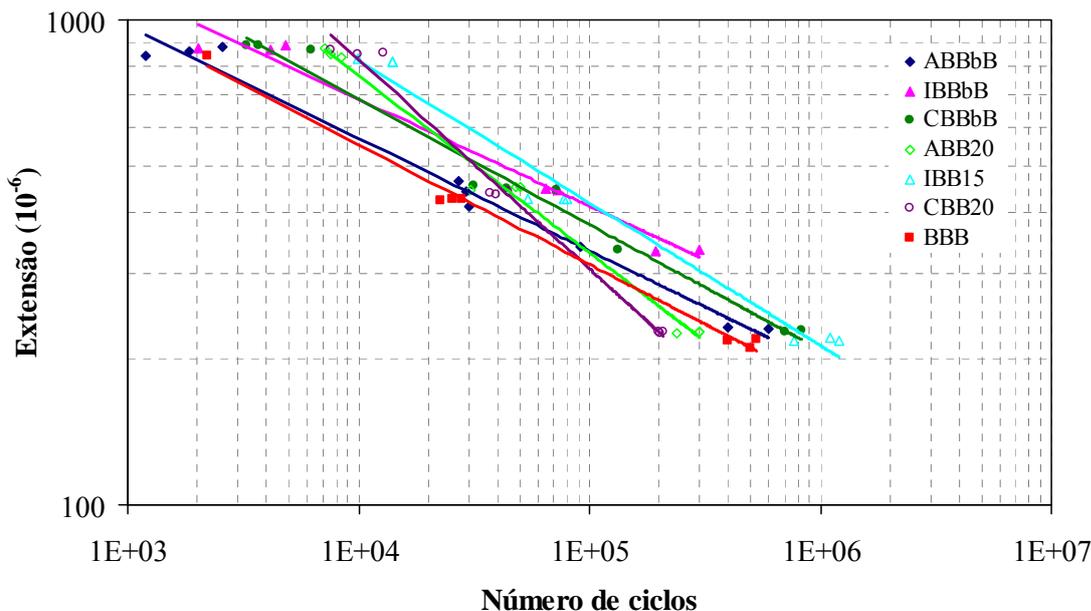


Figura 6.51 – Curvas de fadiga das misturas estudadas

Os resultados apresentados na Figura 6.51 permitem concluir que para níveis de extensão superiores a 200, todas as misturas com betume-borracha apresentaram uma resistência à fadiga superior que a mistura convencional (BBB). A mistura ABBbB obteve um comportamento muito similar à mistura BBB. As misturas de granulometria contínua do *Asphalt Institute*, independente do tipo de betume-borracha utilizado e a mistura *gap graded* Caltrans com betume-borracha *continuous blend* (CBBbB) apresentaram uma maior resistência à fadiga em relação às demais, para todos os níveis de extensão. As misturas *gap graded* Caltrans e ADOT com betume *terminal blend* (CBB20 e ABB20, respectivamente), apresentaram uma reduzida resistência à fadiga a baixos níveis de extensão quando comparadas com as outras e também com a mistura de referência (BBB).

Além do facto de que a mistura *gap graded* ADOT (ABBbB) com betume-borracha *continuous blend* ter apresentado pouca melhoria de resistência à fadiga em relação à mistura BBB, os resultados obtidos para as misturas betuminosas com betume-borracha apresentaram-se insatisfatórios em relação aos encontrados na literatura internacional (Sousa *et al.*, 1999; Visser & Verhaeghe, 2000, Shatnawi & Long, 2000; Antunes *et al.*, 2000; Gallego *et al.*, 2000; Shatnawi & Holleran, 2003; Dantas Neto, 2004), nas quais constatou-se que a resistência à fadiga tende a ser pelo menos e cinco a dez vezes superior às misturas convencionais.

### 6.5.3. Ensaio de deformação permanente

A determinação da resistência à deformação permanente foi realizada através do ensaio de corte simples a altura constante RSST-CH (*Repeated Simple Shear Test at Constant Height*) Procedimento A, padronizado pela AASHTO TP7-01. Este ensaio é realizado sobre provetes cilíndricos com 15 cm de diâmetro por 5 cm de espessura, aplicando-se, repetidamente, um esforço de corte de 70 kPa durante 0,6 s seguido de um período de repouso de 0,1 s.

Após a obtenção dos provetes, o primeiro procedimento é a colagem dos mesmos aos pratos do equipamento em uma prensa em que garante o paralelismo dos dois pratos colados ao provete, como ilustra a Figura 6.52 (a), e em (b) é mostrado o provete colado.



(a) provete na prensa de colagem

(b) provete colado

Figura 6.52 – Provetes colados para ensaio de módulo de corte e de deformação permanente

O equipamento utilizado (modelo CS 75005) para realização do ensaio RSST-CH é apresentado na Figura 6.53. O ensaio RSST-CH é realizado utilizando dois actuadores mecânicos, um horizontal e outro vertical, conforme esquema mostrado na Figura 6.54. O actuador horizontal controla a magnitude das tensões de corte aplicadas enquanto que o actuador vertical garante que o provete, ensaiado sob tensão controlada, mantenha a altura constante durante o ensaio. Neste ensaio foram realizadas oito repetições para cada mistura.



Figura 6.53 – Equipamento para execução do ensaio RSST-CH (modelo CS 75005)

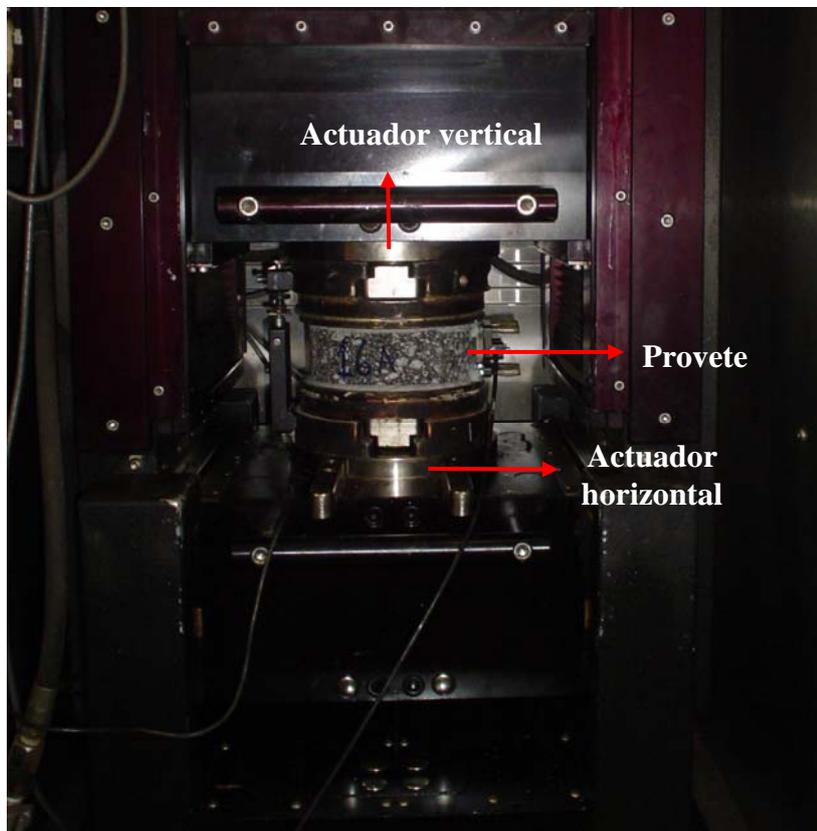


Figura 6.54 – Conjunto provete e pratos montados no equipamento – ensaio RSST-CH

### Módulo de corte

A determinação do módulo de corte das misturas betuminosas foi efectuada de acordo com a norma TP7 (AASHTO, 2001), no mesmo equipamento do ensaio RSST-CH. No ensaio de módulo de corte é aplicado um carregamento horizontal de corte, sinusoidal, em controlo de deformação, para uma extensão de  $100 \times 10^{-6}$ . Os ensaios foram realizados a 60 °C e às frequências de 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2 e 0,1 Hz. A Figura 6.55 apresenta a variação do módulo de corte em função da frequência aplicada.

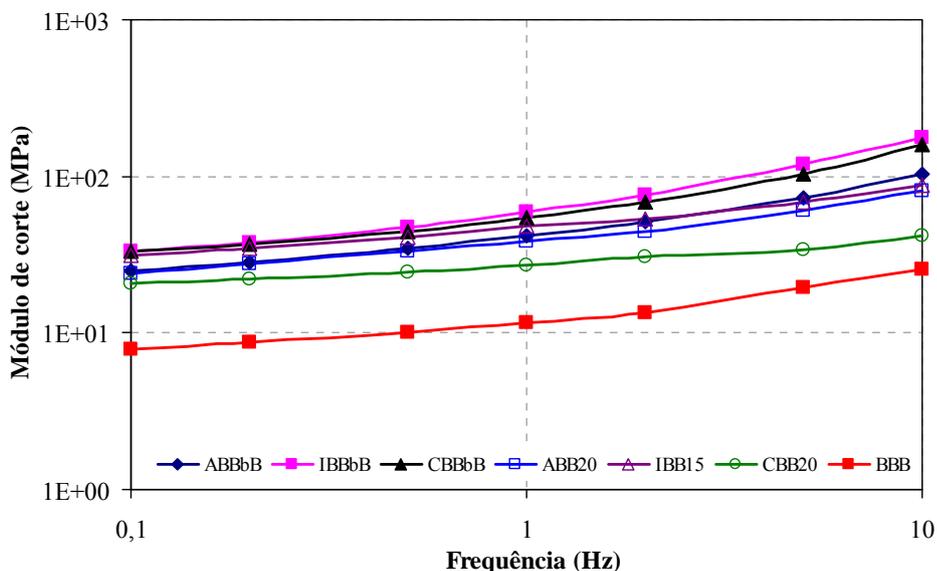


Figura 6.55 – Módulo de corte das misturas betuminosas a 60 °C

De acordo com a Figura 6.55, observa-se que para frequências mais baixas, o comportamento das misturas é muito semelhante, enquanto que para frequências mais elevadas existe maior variação do módulo de corte. Para 10 Hz verifica-se que o módulo possui valores mais elevados para as duas das misturas com betume-borracha *continuous blend* (IBBbB e CBBbB). Valores semelhantes de módulo, a 10 Hz, foram obtidos para as misturas descontínuas com granulometria ADOT (ABB20 e ABBbB) e também para a mistura AI com betume-borracha do tipo *terminal blend* (IBB15). A mistura que apresentou, em qualquer frequência, o menor valor de módulo de corte foi a mistura *gap graded* Caltrans com betume *terminal blend* (CBB20).

Em geral, as misturas com elevada percentagem de betume são mais sensíveis à variação de frequência de aplicação de cargas a elevadas temperaturas. No entanto, este facto não foi

constatado neste estudo. Isto pode ser explicado devido ao facto de que o betume-borracha confere às misturas uma maior resistência à aplicação de cargas.

Outros aspectos que influenciam o valor do módulo de corte estão associados à granulometria e ao volume de vazios da mistura. O módulo de corte diminui, em geral, para uma granulometria mais grossa e para um volume de vazios mais elevado. No caso das misturas deste estudo, uma granulometria *gap graded* apresentou um módulo mais elevado, factor devido ao betume-borracha utilizado. Outro aspecto que deve ser realçado é que as misturas com maior percentagem de borracha apresentaram um módulo mais elevado e também a mistura produzida com o betume-borracha *terminal blend* BB15.

### **Deformação permanente**

A resistência à deformação permanente das misturas foi avaliada utilizando-se o mesmo provete no qual foi realizado o ensaio de módulo de corte. O resultado do ensaio consiste em medir a deformação permanente de corte acumulada ao longo do ensaio e relacionando-se com o número de eixos que a produz. Os ensaios foram conduzidos à temperatura de 60 °C.

A Figura 6.56 apresenta os resultados de deformação permanente, relacionando o ESAL (eixos simples de 80 kN) estimado que geraria uma rodeira de 12,7 mm nas misturas. Os valores de ESAL foram obtidos através da Equação 3.45. Dependendo da especificação, a profundidade das rodeiras pode ser superior a 12,7 mm, como por exemplo, 20,0 mm. Assim, para as misturas estudadas, os valores de ESAL também podem ser estimados para a profundidade de 20,0 mm, como apresenta a Figura 6.57.

De acordo com os resultados da resistência à deformação permanente (Figuras 6.56 e 6.57) pode observar-se que a mistura produzida com o betume convencional CAP 50/70 (BBB) apresentou um desempenho inferior quando comparada às misturas com betume-borracha, indicando maior susceptibilidade destas misturas no que se refere à resistência à deformação permanente. Estes resultados são satisfatórios, considerando que a percentagem de betume utilizada na produção das misturas betuminosas com betume-borracha foi consideravelmente superior àquela utilizada na produção da mistura convencional.

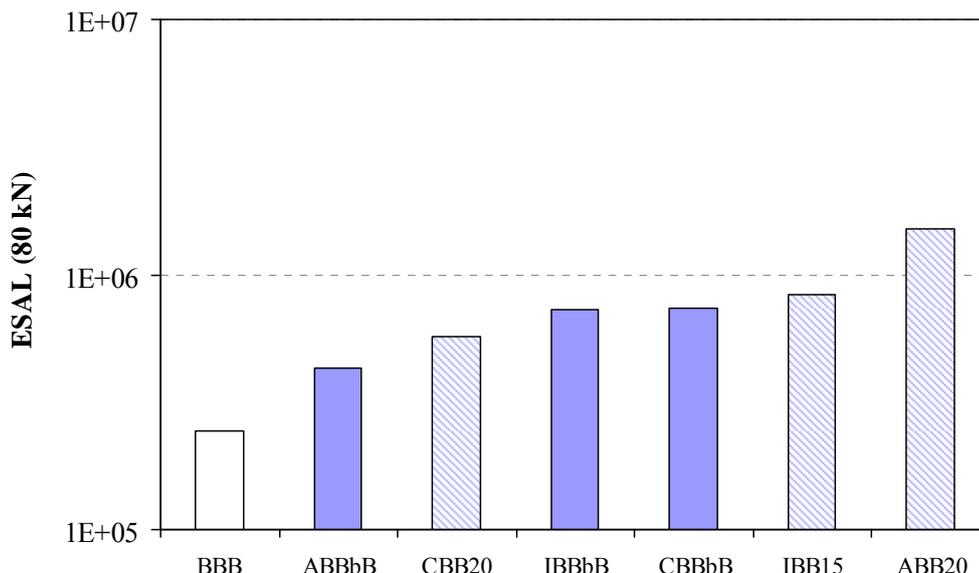


Figura 6.56 – ESAL que origina uma rodeira de 12,7 mm nas misturas betuminosas a 60 °C

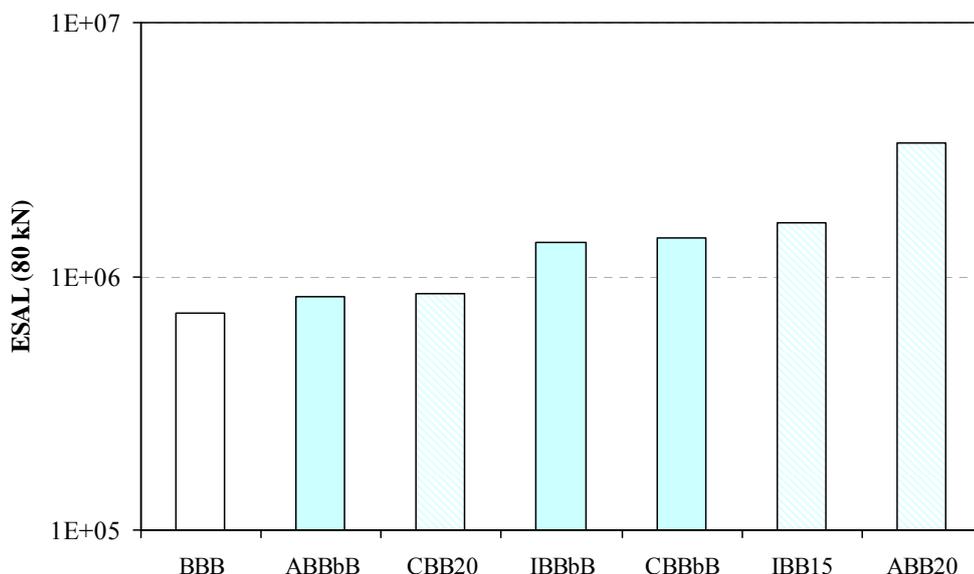


Figura 6.57 – ESAL que origina uma rodeira de 20,0 mm nas misturas betuminosas a 60 °C

Relativamente ao tipo de betume-borracha utilizado, pode afirmar-se que as misturas produzidas com betumes do tipo *terminal blend* apresentaram um desempenho superior em relação às outras, com excepção da mistura Caltrans.

A melhoria no comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas produzidas com betume-borracha comparativamente à mistura com betume convencional pode ser explicada também pela elevada recuperação elástica apresentada pelos betumes BB15, BB20 e BBbB em relação ao betume convencional CAP 50/70.

## 6.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de fadiga, obtidos na Fase 3, para as misturas com betume-borracha (*terminal blend e continuous blend*) e para a mistura convencional não foram considerados conclusivos, principalmente porque o desempenho entre as misturas foi muito semelhante e a resistência à fadiga atingida para as misturas com betume-borracha foi considerada reduzida comparativamente aos valores encontrados na literatura. Além disto, não foi possível identificar uma mistura betuminosa com desempenho distintamente superior às demais no respeitante a este critério.

Considerando os resultados de desempenho obtidos, presumiu-se que a qualidade dos materiais brasileiros teria resultado no baixo desempenho apresentado pelas misturas. Desta forma, com o objectivo de avaliar a qualidade dos materiais brasileiros empregues na optimização do betume-borracha, realizou-se um estudo detalhado em que foram utilizados materiais (betume convencional e borracha granulada de pneus) de proveniência portuguesa para produção de novas misturas betuminosas.

## 6.7. MISTURAS COM BETUMES PORTUGUESES

Nesta segunda parte do estudo de optimização de betume-borracha e das misturas betuminosas foram incorporados ao trabalho novos materiais, no qual variou-se o tipo de betume e de borracha, objectivando a produção de novos betumes-borracha e misturas betuminosas, para posteriormente, comparar o desempenho obtido com as misturas anteriormente produzidas e ensaiadas. A granulometria escolhida para este estudo foi a *gap graded* do Caltrans por ser largamente utilizada com bom desempenho em reabilitação de pavimentos em diversos países, por promover o contacto grão-a-grão resultando em um bom desempenho em relação à deformação permanente.

A borracha ambiente brasileira e o betume convencional brasileiro CAP 50/70 foram utilizados em conjunto com os seguintes materiais portugueses para produção de betumes-borracha *continuous blend*:

- betumes convencionais PEN 50/70 (BG) e PEN 35/50 (BC), classificados por penetração;
- borracha portuguesa (bP), obtida no processo criogénico.

As misturas produzidas foram as seguintes (entre parêntesis está a nomenclatura adoptada):

- granulometria Caltrans, betume brasileiro **BB** e borracha portuguesa **bP** (CBBbP);
- granulometria Caltrans, betume português **BG** e borracha portuguesa **bP** (CBGbP);
- granulometria Caltrans, betume português **BG** e borracha brasileira **bB** (CBGbB);
- granulometria Caltrans, betume português **BC** e borracha portuguesa **bP** (CBCbP);
- granulometria Caltrans, betume português **BC** e borracha brasileira **bB** (CBCbB).

### 6.7.1. Caracterização dos materiais

#### Betumes convencionais PEN 50/70 e PEN 35/50

Os Quadros 6.10 e 6.11 apresentam os resultados dos ensaios de caracterização dos betumes convencionais BC e BG, com as especificações prescritas pelo LNEC (1997).

Quadro 6.10 – Características do betume BG (PEN 50/70)

Ensaio	Norma	Especificação	Resultado
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)	ASTM D 5	50 -70	52,5
Ponto de amolecimento <sup>(i)</sup> (°C)	ASTM D 36	46-54	48
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 175 °C	ASTM D 2196	-	112,0
Resiliência (%)	ASTM D 5329	-	0
RTFOT 163 °C, 85 minutos			
Varição em massa (% de massa) máx.	ASTM D 2872	0,5	0,2
Aumento do ponto de amolecimento (°C) máx.		11	9,8
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)		-	25,7
Penetração retida (%) mín.		50	49

Observações referentes ao Quadro 6.10:

(i) Método anel e bola;

(ii) Viscosímetro Brookfield, veio 27, 20 rpm.

Quadro 6.11 – Características do betume BC (PEN 35/50)

Ensaio	Norma	Especificação	Resultado
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)	ASTM D 5	35-50	33
Ponto de amolecimento <sup>(i)</sup> (°C)	ASTM D 36	50-58	52,7
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 175 °C	ASTM D 2196	-	175
Resiliência (%)	ASTM D 5329	-	9
RTFOT 163 °C, 85 minutos	ASTM D 2872		
Varição em massa (% de massa) máx.		0,5	0,2
Aumento do ponto de amolecimento (°C) máx.		11	0,5
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)		-	27,7
Penetração retida (%) mín.		53	84

Observações referentes ao Quadro 6.11:

(i) Método anel e bola;

(ii) Viscosímetro Brookfield, veio 27, 20 rpm.

A penetração do betume BC (33x0,1 mm) apresentou-se ligeiramente abaixo dos valores especificados, o que significa que este betume é mais rígido que o especificado para a sua classificação. O resultado obtido para a resiliência deste betume também foi superior ao especificado por alguns organismos, como por exemplo o Caltrans (0% a 4%). A penetração retida obtida para o betume BG mostrou-se pouco abaixo do valor especificado, indicando uma acelerada perda de voláteis durante o envelhecimento. Ainda assim, considerou-se que os betumes BC e BG se encontram dentro das especificações vigentes.

### Borracha criogénica

Em Portugal, a borracha mais utilizada em betume-borracha é oriunda do processo criogénico. De acordo com as especificações do fabricante, o processo de redução da borracha criogénica é feito a -90 °C com azoto líquido, sem fricção (impacto instantâneo) e por este motivo a desvulcanização não ocorre nas cadeias poliméricas, preservando assim as características elásticas iniciais da borracha. Esta borracha possui um tamanho nominal entre 0,18 mm a 0,6 mm.

A análise granulométrica foi realizada de acordo com a norma ASTM C 136, 1996 (adaptada com as recomendações do Greenbook (2000), *Crumb Rubber Modifier (CRM) Gradations – Section 203-11.2.3.1*, na qual também foram determinados os teores de fibras têxteis e de partículas metálicas e permitiu concluir que esta se encontra enquadrada na granulometria da borracha tipo “B” do ADOT (ADOT<sub>A</sub>, 2005).

O Quadro 6.12 apresenta os resultados obtidos da caracterização da borracha portuguesa. O valor da superfície específica foi calculado de acordo com a Equação 5.1. Os resultados obtidos para os teores em água e de fibras mostram que esta borracha satisfaz as especificações ASTM D 6114, 1997 (Quadro 5.4).

Quadro 6.12 – Características da borracha criogénica

Propriedades físicas	Borracha criogénica
Teor em água (%)	0,2
Teor de fibras têxteis (%)	-
Teor de fibras metálicas (%)	-
Outros contaminantes	-
Superfície específica (m <sup>2</sup> /kg)	13,61

### Betume-borracha produzido

A percentagem de borracha, o tempo de digestão e a temperatura de fabrico utilizadas para todos os novos betumes foram as mesmas obtidas na optimização do betume-borracha BBbB (CAP 50/70 e borracha brasileira), ou seja, 17% de borracha com tempo de digestão de 90 minutos e temperatura de 180 °C, possibilitando assim um estudo comparativo.

A utilização de um betume mais duro (PEN 35/50) em relação aos outros dois (PEN 50/70 e CAP 50/70) objectivou avaliar a influência dos resultados diante do uso de um betume mais consistente.

Face ao exposto, assumindo-se, para todos os betumes-borracha, a mesma percentagem de borracha, o mesmo tempo e temperatura de digestão, pôde estabelecer-se um estudo comparativo entre os materiais, sem desvirtuar do foco principal do trabalho que é a verificação do desempenho de materiais de procedência brasileira.

Neste estudo, foram produzidos os seguintes betumes-borracha (entre parêntesis encontram-se as nomenclaturas adoptadas):

- betume CAP 50/70 **BB** e borracha portuguesa **bP** (BBbP);
- betume PEN 50/70 **BG** e borracha brasileira **bB** (BGbB);
- betume PEN 50/70 **BG** e borracha portuguesa **bP** (BGbP);

- betume PEN 35/50 **BC** e borracha brasileira **bB** (BCbB);
- betume PEN 35/50 **BC** e borracha portuguesa **bP** (BCbP).

O Quadro 6.13 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização dos novos betumes-borracha produzidos. As especificações seguidas para estes betumes são as prescritas pela ASTM D 6114 (1997).

Quadro 6.13 – Características dos betumes

Ensaio	Norma	Especif.	BBbP	BGbB	BGbP	BCbB	BCbP
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)	ASTM D 5	25 a 75	36,7	31,8	26,7	19,7	16,8
Ponto de amolecimento <sup>(i)</sup> (°C)	ASTM D 36	54,4 mín.	55,4	62,5	61,9	69,9	73,3
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 175 °C	ASTM D 2196	1500 mín.	1588	2579	1821	4058	2246
Resiliência (%)	ASTM D 5329	20	40	20	16	52	49
RTFOT 163 °C, 85 minutos	ASTM D 2872						
Varição em massa (% de massa) máx.		-	0,3	0,1	0	0,2	0,9
Aumento do PA (°C) máx.		-	14,7	4,7	0,4	17,1	11,2
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)		-	21,8	31,8	26,7	19,5	15,5
Penetração retida (%) mín		-	59,4	100	86,1	99,0	92,2
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 175 °C		-	1675	4473	575	8813	3925
Resiliência (%)		-	47	40	32	52	56
RTFOT 175 °C, 85 minutos	ASTM D 2872						
Varição em massa (% de massa) máx.		-	0,5	0,1	0,2	0,2	0,4
Aumento do PA (°C) máx.		-	16,2	5,7	0,3	16,4	16,6
Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm)		-	18,3	32,2	26,7	21,1	14,0
Penetração retida (%) mín.		-	50	101,3	82	107,1	83,3
Viscosidade aparente <sup>(ii)</sup> (cP) a 175 °C		-	1112	3375	625	9200	4150
Resiliência (%)		-	40	41	29	43	45

Observações referentes ao Quadro 6.13:

(i) Método anel e bola;

(ii) Viscosímetro Brookfield, veio 27, 20 rpm;

(iii) PA – Ponto de amolecimento.

De acordo com os resultados obtidos verificou-se que a incorporação da borracha, independente do tipo, diminuiu a penetração e aumentou o ponto de amolecimento e aumentou também a resiliência em relação aos betumes convencionais (Quadros 5.9, 6.10 e 6.11).

Após o ensaio de envelhecimento, os betumes-borracha apresentaram um aumento no ponto de amolecimento e uma redução da penetração, excepto quando o ligante base foi o betume português PEN 50/70. Em todos os casos houve perda de massa, factor atribuído à perda de voláteis durante o processo de envelhecimento. O betume BCbP apresentou uma perda de massa mais elevada em relação aos outros betumes, o que pode estar associado à compatibilidade deste betume com a borracha. As viscosidades dos betumes-borracha aumentaram após o ensaio RTFOT, com excepção do BGbP.

### 6.7.2. Análise da influência do tipo de borracha na modificação dos betumes

#### Comparação entre a borracha ambiente e a borracha criogénica

A Figura 6.58 apresenta as curvas granulométricas das borrachas ambiente e criogénica e o fuso granulométrico da borracha tipo B da especificação ADOT (ADOT<sub>A</sub>, 2005).

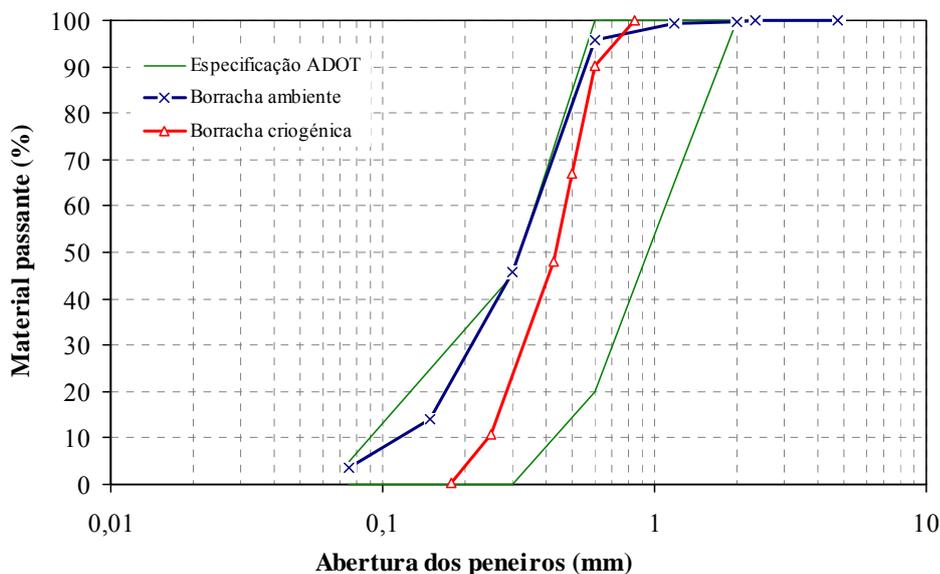


Figura 6.58 – Curvas granulométricas das borrachas estudadas e fuso granulométrico ADOT

Relativamente à curva granulométrica, as duas borrachas estão ajustadas ao fuso granulométrico especificado pelo ADOT (Quadro 5.5), verificando-se que a borracha proveniente do processo ambiente se enquadrou no limite superior do fuso especificado.

Através da granulometria, foi possível observar também que a borracha ambiente é mais fina que a borracha criogénica o que comprova os valores obtidos para a superfície específica das duas borrachas (ambiente:  $19,27 \text{ m}^2/\text{kg}$  e criogénica:  $13,61 \text{ m}^2/\text{kg}$ ). As aparências visuais das borrachas estudadas são mostradas na Figura 6.59.



(a) criogénica (bP)

(b) ambiente (bB)

Figura 6.59 – Aparência das borrachas criogénica e ambiente

A análise da morfologia das borrachas foi realizada através da microscopia por varrimento electrónico (MEV), com o mesmo equipamento utilizado para o betume-borracha.

As amostras destinadas ao MEV estavam isentas de humidade ou óleos e receberam uma preparação especial denominada recobrimento com ouro. Através da microscopia electrónica por varrimento foi realizada a comparação entre as superfícies dos grãos dos dois tipos de borracha utilizadas nesta investigação com aumentos de 50, 700 e 1600 vezes. As Figuras 6.60 e 6.61 apresentam a estrutura e a morfologia dos grãos da borracha moída no processo ambiente e no processo criogénico, respectivamente, para uma ampliação de 50 vezes.

As Figuras 6.62 e 6.63 exibem a mesma superfície das borrachas, ambiente e criogénica, com uma ampliação de 700 vezes, enquanto que as Figuras 6.64 e 6.65 mostram as morfologias com uma ampliação de 1600 vezes, respectivamente.

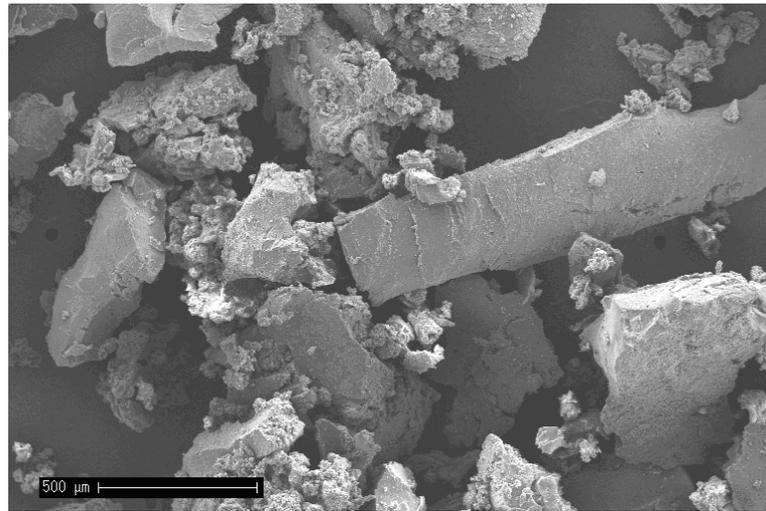


Figura 6.60 – MEV da borracha ambiente com uma ampliação de 50 vezes

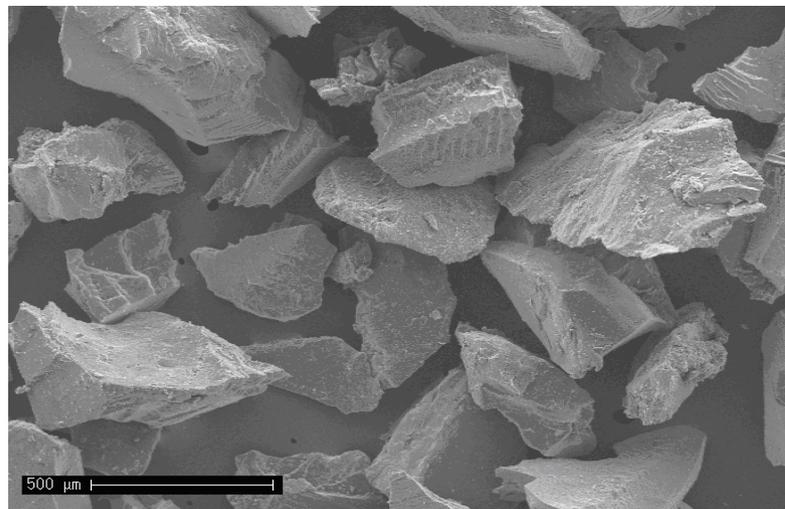


Figura 6.61 – MEV da borracha criogénica com uma ampliação de 50 vezes

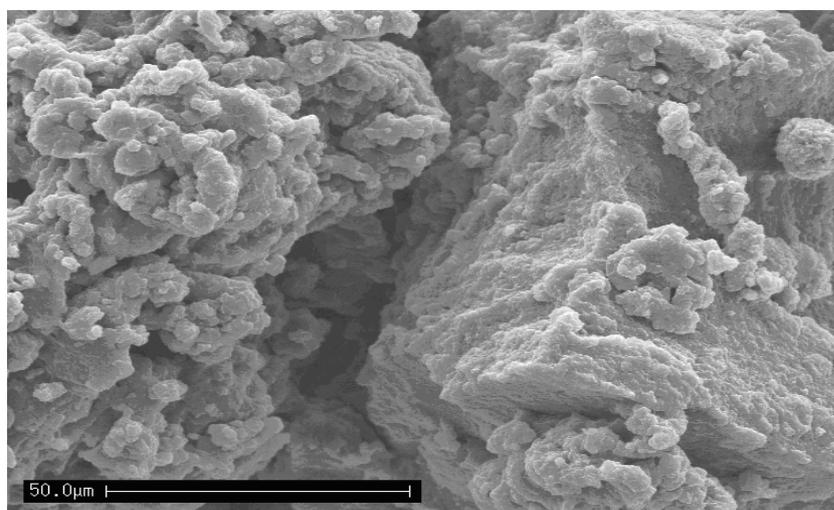


Figura 6.62 – MEV da borracha ambiente com uma ampliação de 700 vezes

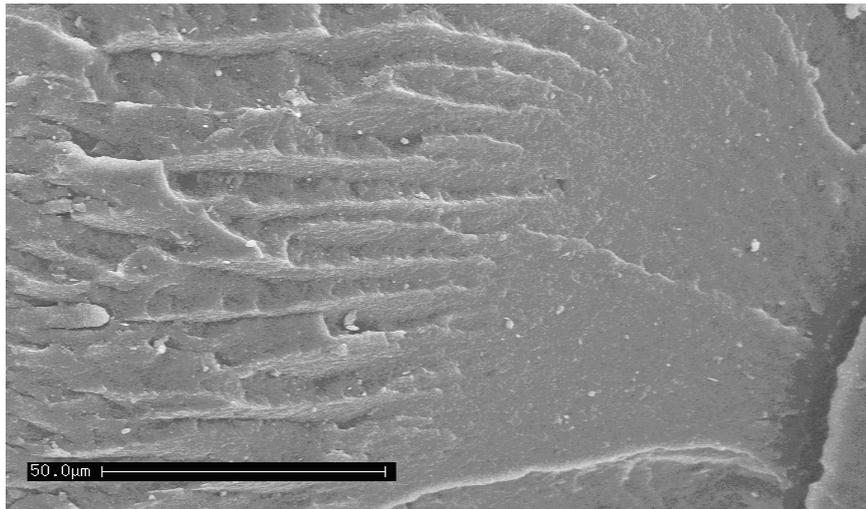


Figura 6.63 – MEV da borracha criogénica com uma ampliação de 700 vezes

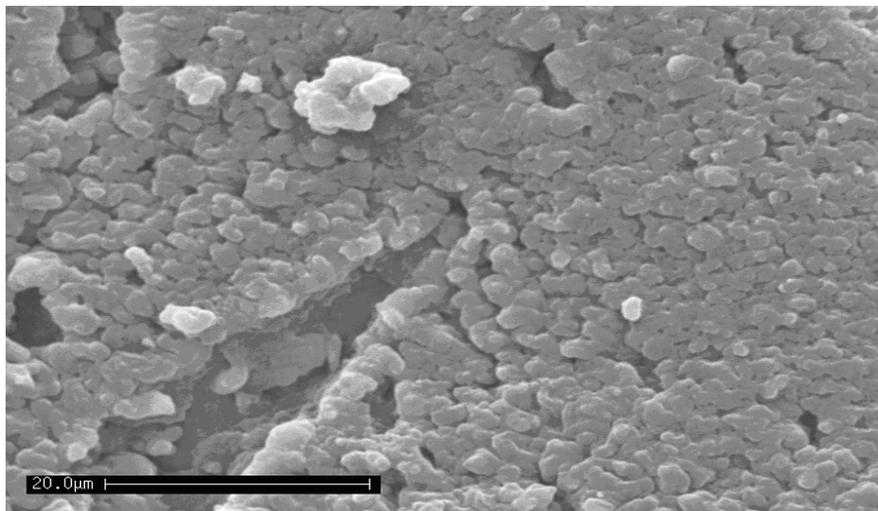


Figura 6.64 – MEV da borracha ambiente com aumento de 1600 vezes

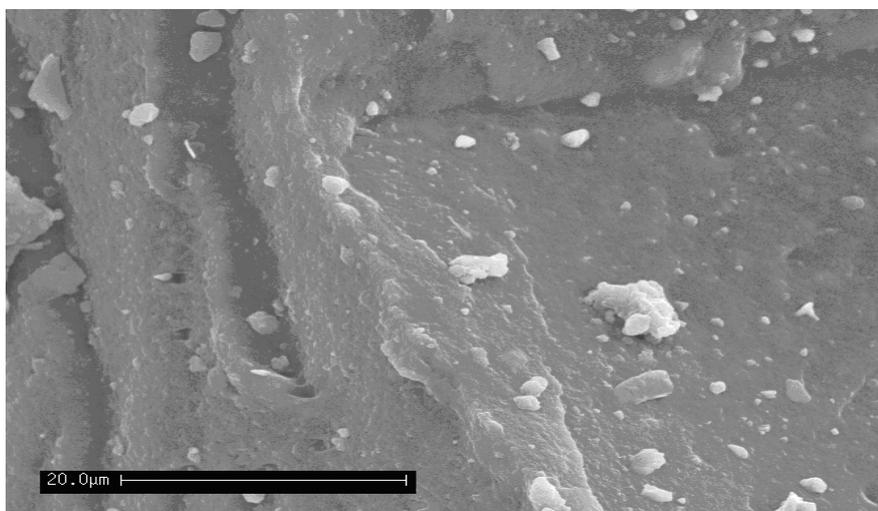


Figura 6.65 – MEV da borracha criogénica com aumento de 1600 vezes

A partir destas micrografias da superfície dos grãos de borracha (Figuras 6.60 a 6.65) foi possível observar que o processo de obtenção da borracha de pneus influencia a morfologia final dos grãos. Consequentemente, o tipo de morfologia e estrutura dos grãos de borracha influencia a superfície específica que, por conseguinte, actua no processo de interacção entre o betume e a borracha.

A análise da superfície da borracha moída através do processo ambiente apresentou uma estrutura irregular com diversos tamanhos e formas, tendo observado-se ainda a ocorrência de aglomerados, nos quais as partículas menores estão aderidas entre si, com aparência esponjosa, com uma grande superfície específica. Por outro lado, a superfície da borracha criogénica apresenta uma estrutura dos grãos uniforme e regular, com textura lisa, apresentando uma superfície específica inferior à borracha ambiente.

Estas constatações estão de acordo com as observadas por Roberts *et al.* (1989). De acordo com os autores, no betume-borracha produzido com a borracha ambiente, a borracha reage mais rapidamente com o betume justamente pelo facto da sua estrutura morfológica ser irregular, sendo que a morfologia regular e lisa apresentada pela borracha criogénica é indesejável para a produção de betumes-borracha. Roberts *et al.* (1989) acrescentam, ainda, que a borracha criogénica possui menor elasticidade recuperável quando comparada à borracha ambiente.

Foi realizada, também, a análise por difracção de raio-X para os dois tipos de borracha (Figuras 6.66 e 6.67). O emprego desta técnica resultou na identificação da composição química de cada amostra na região observada.

A composição elementar da superfície das duas borrachas é semelhante, tendo em conta que ambas são provenientes de pneus usados de carros e de camiões. No entanto, a borracha proveniente do processo criogénico apresenta uma quantidade superior do elemento carbono. Este facto pode não estar associado ao processo de moagem, mas sim da proveniência (Brasil e Portugal), do tipo de pneus (camião ou carro) e da composição dos pneus.

Uma variedade de componentes químicos como o zinco e o ferro estão presentes em diferentes concentrações na borracha de pneus, como apresentou a análise por difracção de raio-X.

O elemento silício é utilizado na produção de ligas metálicas, como por exemplo, o aço. Este elemento é encontrado na superfície das amostras devido a presença de pequenos fragmentos de aço dos pneus não removidos durante o processo de moagem, mas imperceptíveis no ensaio de granulometria.

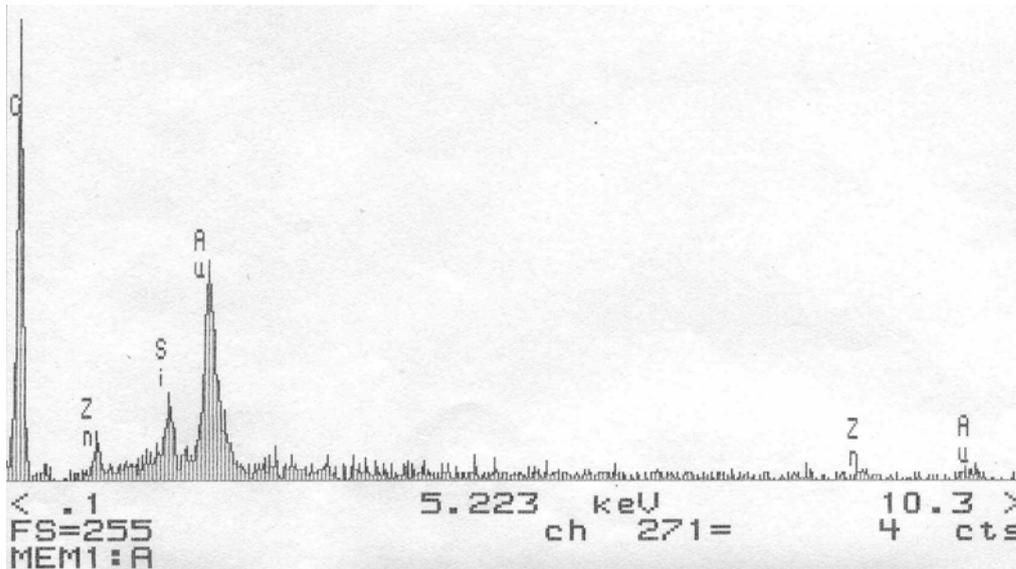


Figura 6.66 – Análise por difracção de raio-X da borracha ambiente

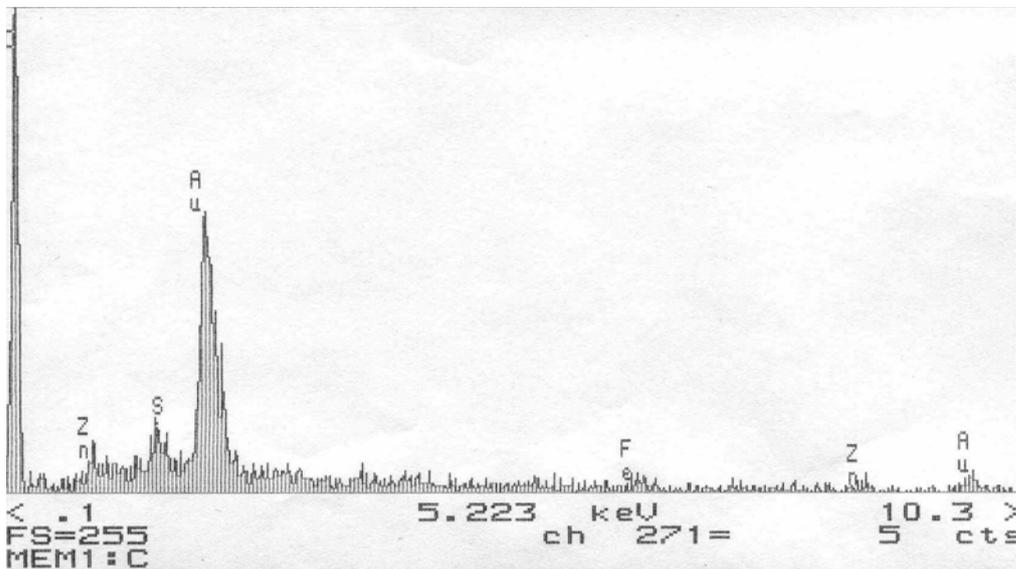


Figura 6.67 – Análise por difracção de raio-X da borracha criogénica

### 6.7.3. Estudo comparativo entre os betumes convencionais

A Figura 6.68 ilustra a comparação dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos betumes convencionais CAP 50/70 (BB), PEN 50/70 (BG) e PEN 35/50 (BC), (Quadros 5.9, 6.10 e 6.11).

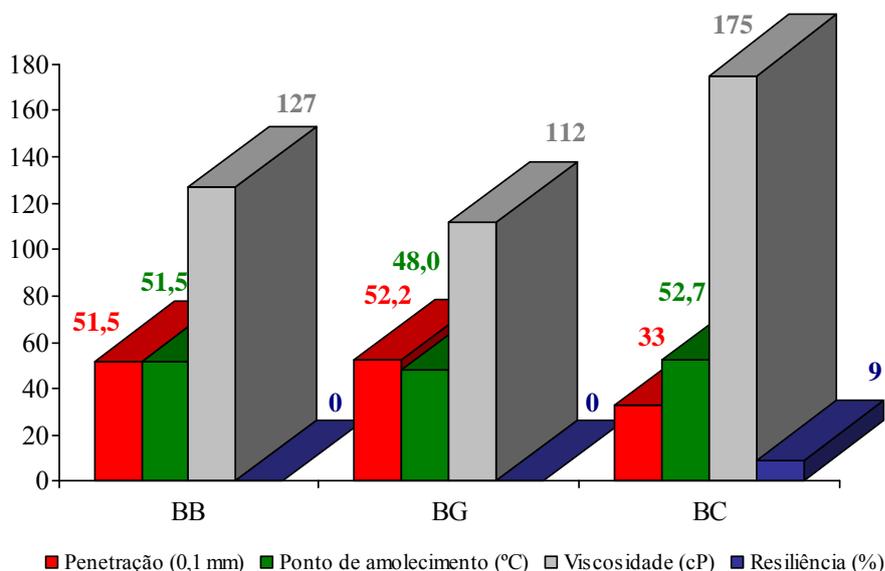


Figura 6.68 – Comparação entre os betumes convencionais

A partir dos ensaios de caracterização verificou-se que o betume convencional BC apresentou valores mais elevados de resiliência e ponto de amolecimento em comparação aos demais, o que reflecte melhores propriedades quanto à recuperação elástica e resistência às deformações permanentes. Este betume é mais rígido que os outros dois e apresentou também uma viscosidade mais elevada.

Os ensaios de envelhecimento através do RTFOT (Quadros 5.9, 6.10 e 6.11), mostraram que os betumes BB e BG apresentaram uma penetração retida inferior ao betume BC. O betume BG obteve um grande aumento do ponto de amolecimento (9,8 °C) após o RTFOT em relação ao betume BB (4,3 °C). No caso do betume BC, este aumento foi de apenas 0,5 °C. No entanto, este betume não pode ser directamente comparado aos demais porque possui outra classificação (PEN 35/50).

Desta forma, comparativamente, para os betumes BB e BG, com a mesma classificação, foi observado que o betume BB possui propriedades superiores ao betume BG tendo em conta os

resultados obtidos nos ensaios e, portanto, uma tendência para um melhor desempenho para a produção de betumes-borracha.

O betume BG também apresentou uma menor susceptibilidade térmica em relação aos demais, tendo em conta a comparação entre os índices de penetração de cada betume. O índice de susceptibilidade térmica (IS) foi calculado através da Equação 3.4, para o qual os betumes convencionais obtiveram os seguintes resultados: (i) -0,76 para o BB; (ii) -1,60 para o BG; (iii) -1,42 para o BC.

A caracterização reológica dos betumes convencionais foi realizada através do reômetro *Reologica StressTech HR*. Para os betumes convencionais foram realizados varrimentos a 19 frequências entre 0,01 Hz e 10 Hz, a uma temperatura de ensaio de 180 °C, simulando as condições de produção do betume-borracha e produção das misturas betuminosas. No ensaio foram medidos os seguintes parâmetros: (i) módulo de rigidez  $G'$  (correspondente à resposta elástica do material); (ii) módulo dissipativo  $G''$  (correspondente à resposta viscosa do material); (iii) ângulo de fase ( $\delta$ ). A Figura 6.69 apresenta, graficamente, os valores da viscosidade em função da tensão de corte aplicada para todos os betumes.

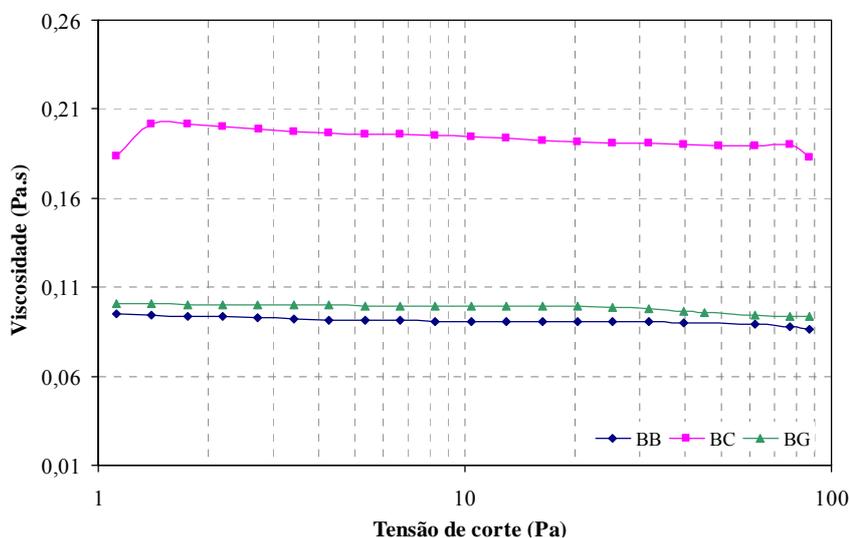


Figura 6.69 – Relação entre a tensão de corte e a viscosidade

De acordo com a Figura 6.69, os betumes BB (CAP 50/70) e BG (PEN 50/70) apresentaram valores semelhantes de viscosidade em função da tensão aplicada, mas inferiores em relação ao betume BC (PEN 35/50). Este comportamento foi coerente tendo em conta que os betumes BB e BG correspondem a um PEN 50/70, e o betume BC, correspondente a um betume

PEN 35/50, mais duro. Outro facto observado foi que com o aumento da tensão de corte, o comportamento de todos os betumes permaneceu constante, de modo que a tensão de corte não influencia a viscosidade, a elevadas temperaturas (180 °C).

A Figura 6.70 apresenta o módulo de rigidez  $G'$  e o módulo dissipativo  $G''$  em função da frequência para os três betumes convencionais estudados.

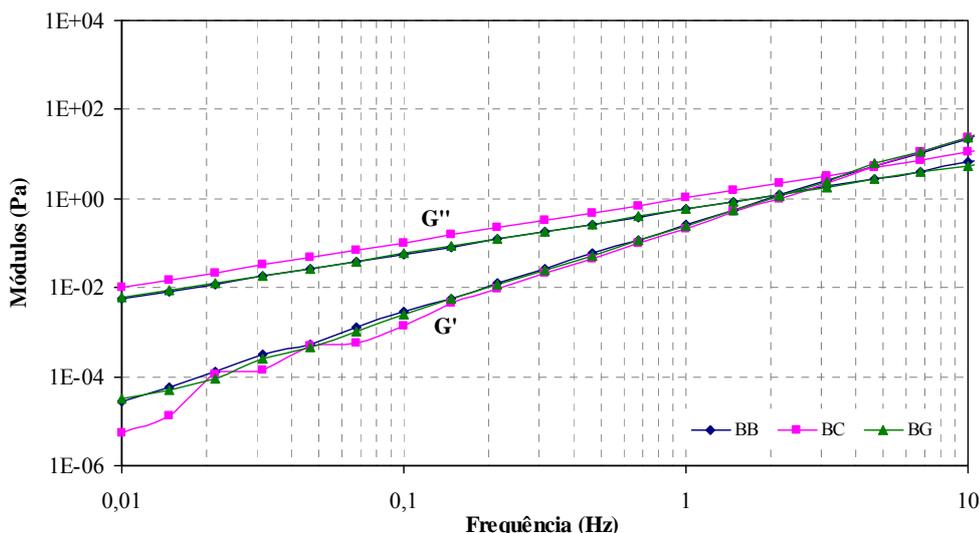


Figura 6.70 – Módulos  $G'$  e  $G''$  dos betumes em função da frequência (180 °C)

A análise da Figura 6.70 mostrou que os betumes apresentaram um comportamento semelhante para o módulo de rigidez  $G'$ , o que indica uma mesma resposta elástica. Quanto ao módulo dissipativo  $G''$ , o betume BC apresentou os valores um pouco mais elevados em relação aos outros dois, que se traduz numa componente viscosa maior.

A Figura 6.71 apresenta a relação entre o módulo complexo e do ângulo de fase em função da frequência. Nesta figura pode observar-se que o ângulo de fase em função da frequência aplicada é semelhante para os betumes com mesma penetração (CAP 50/70 e PEN 50/70), sendo que o betume PEN 35/50, o ângulo de fase mostrou-se superior, confirmando uma maior componente viscosa em relação aos outros dois betumes.

A elevadas temperaturas, na qual os ensaios foram realizados, não foi possível prever o comportamento dos betumes relativamente à resistência à fadiga e à deformação permanente através de  $G^* \cdot \sin \delta$  e  $G^* / \sin \delta$ , respectivamente. Na tentativa de obter um indicativo de

comportamento, relacionou-se  $G^* \cdot \text{sen} \delta$  e  $G^* / \text{sen} \delta$  em função da frequência, como apresentado nas Figuras 6.72 e 6.73 para os betumes convencionais BB, BG e BC.

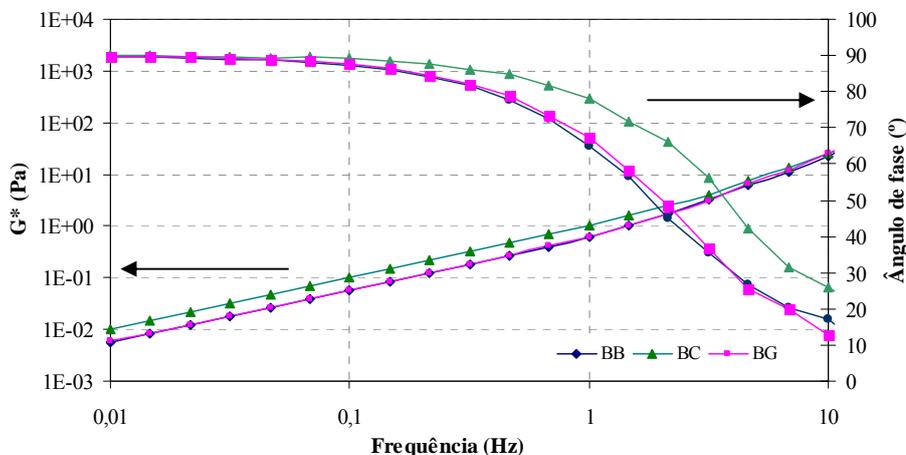


Figura 6.71 – Módulos  $G^*$  e ângulo de fase dos betumes em função da frequência (180 °C)

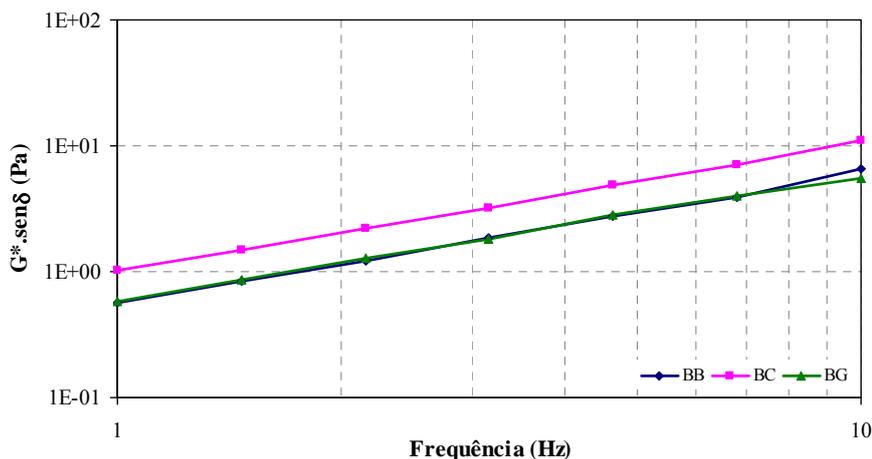


Figura 6.72 –  $G^* \cdot \text{sen} \delta$  em função da frequência aplicada (180 °C)

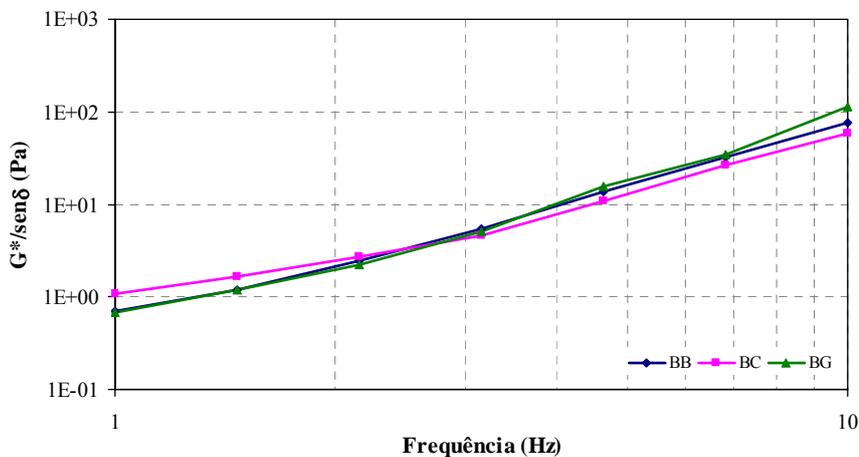


Figura 6.73 –  $G^* / \text{sen} \delta$  em função da frequência aplicada (180 °C)

Um mínimo valor de  $G^* \cdot \sin \delta$  pode predizer um melhor desempenho à fadiga. A Figura 6.72 mostrou que os betumes BB e BG podem ter a maior resistência à fadiga e o betume BC um desempenho inferior. Analogamente, um maior valor de  $G^* / \sin \delta$  caracteriza um melhor desempenho à deformação permanente. À temperatura de ensaio, de acordo com a Figura 6.73, os betumes obtiveram um desempenho semelhante, com uma pequena tendência a um melhor desempenho para o betume BG.

### 6.7.4. Estudo comparativo dos betumes-borracha

#### Comparação das características

Após a comparação entre as características dos betumes convencionais foi realizada a análise dos resultados dos betumes-borracha produzidos com os diversos materiais. A Figura 6.74 apresenta os resultados obtidos para as características dos betumes, nomeadamente, a penetração, o ponto de amolecimento (método anel e bola), a resiliência e a viscosidade aparente (viscosímetro Brookfield).

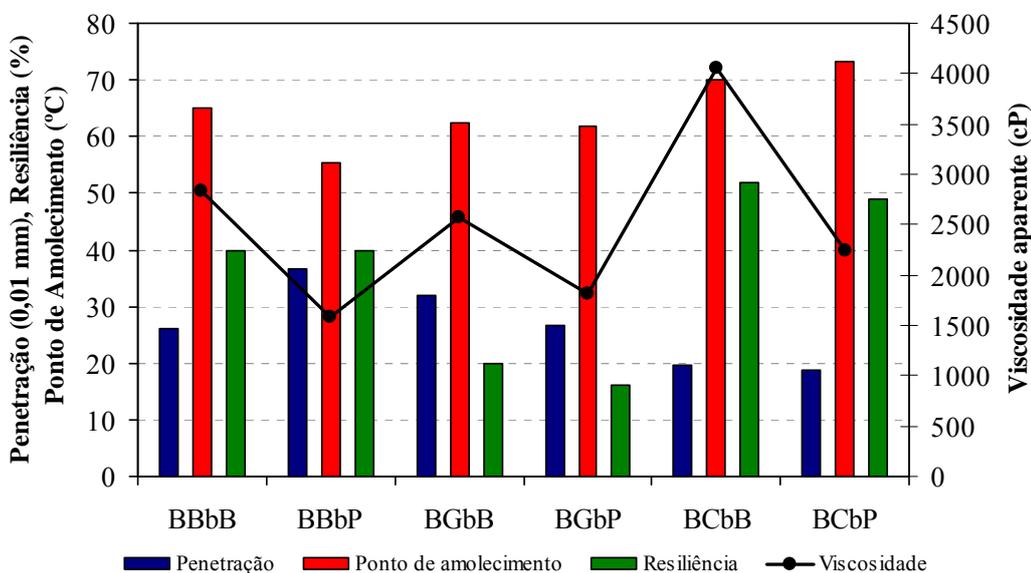


Figura 6.74 – Características dos betumes-borracha

Com base na Figura 6.74 resultaram as seguintes observações:

- os betumes-borracha produzidos com o betume convencional BC (PEN 35/50) obtiveram um menor valor de penetração em relação aos outros, independentemente do tipo de borracha adicionada;
- o valor da penetração aumentou quando a borracha criogénica foi adicionada ao betume BB em comparação com a adição da borracha ambiente;
- o ponto de amolecimento dos betumes-borracha produzidos com o betume BC foi mais elevado em relação aos demais, sendo que a adição da borracha do tipo criogénica a este betume fez aumentar mais o ponto de amolecimento que a incorporação da borracha ambiente;
- a adição da borracha ambiente ao betume BB elevou o ponto de amolecimento em quase 10 °C em comparação com a borracha criogénica;
- o ponto de amolecimento foi semelhante na modificação do betume BG com a incorporação das borrachas criogénica e ambiente;
- os valores da resiliência foram iguais para os betumes-borracha produzidos com o betume BB, independente da borracha adicionada;
- no caso dos betumes-borracha produzidos com o betume BG, a adição da borracha ambiente elevou o valor da resiliência em 50% em relação à adição da borracha criogénica;
- os betumes-borracha com o betume base BC obtiveram os valores mais elevados de resiliência em relação aos outros betumes-borracha, e a adição da borracha ambiente resultou num valor de resiliência mais elevado do que com a borracha criogénica;
- a incorporação da borracha ambiente resultou em valores de viscosidade mais elevados em todos os tipos de betumes-borracha em comparação com a incorporação da borracha criogénica;
- os betumes-borracha que foram produzidos com os betumes convencionais BG e BB e a borracha criogénica obtiveram valores de viscosidade próximos ao limite inferior especificado pela ASTM 6114, 1997 (1500 cP).

No respeitante à comparação das características dos betumes, pode afirmar-se que o betume mais rígido (BC) produziu betumes-borracha mais rígidos e com menor susceptibilidade térmica a elevadas temperaturas em comparação aos betumes BB e BG. O ponto de amolecimento elevado indica um bom comportamento a elevadas temperaturas.

Relativamente à viscosidade pôde observar-se que a utilização de uma borracha com maior superfície específica (borracha brasileira ambiente) aumentou os valores das viscosidades, ou seja, com a diminuição da superfície específica da borracha pode diminuir-se a viscosidade e aumentar a percentagem de borracha incorporada. No entanto, a diminuição da superfície específica faz com que a área de contacto entre a borracha e o betume convencional seja menor e isto diminui o nível de interacção entre estes materiais. Todos estes factores estão associados ao grau de modificação obtido, a ser comentado no estudo da microscopia destes betumes, e dependem ainda das fracções leves dos betumes.

O aumento da resiliência foi observado para todos os betumes-borracha em relação aos seus betumes base convencionais e está relacionada à presença da borracha que possui grande capacidade de recuperação elástica. A resiliência apresenta-se mais elevada com a presença da borracha ambiente, mais propícia à absorção das fracções leves dos betumes. O aumento da resiliência está relacionado com o acréscimo da capacidade de recuperação elástica.

A susceptibilidade térmica de um betume convencional pode ser expressada através do índice de susceptibilidade térmica (IS) que relaciona os parâmetros penetração e ponto de amolecimento definidos nos ensaios. Para os betumes-borracha também foi aplicada esta relação na tentativa de se obter um indicativo da susceptibilidade térmica, a ser posteriormente verificado através dos ensaios de desempenho. O índice de susceptibilidade térmica foi calculado através da Equação 3.4 e os valores estão apresentados no Quadro 6.14.

Quadro 6.14 – Valores do índice de susceptibilidade térmica dos betumes-borracha

Betume-borracha	BBbB	BBbP	BGbB	BGbP	BCbB	BCbP
IS	0,49	-0,62	0,47	0,01	0,75	0,98

Os betumes-borracha produzidos com o betume convencional BC apresentaram uma menor susceptibilidade térmica em relação aos outros betumes. Isto deve-se ao facto deste ser um betume mais rígido que os betumes BB e BG e portanto, menos sensível à temperatura.

Relativamente aos betumes com a mesma classificação, BG e BB, pode verificar-se que a modificação com a borracha ambiente produziu betumes-borracha menos susceptíveis à temperatura, tendo em conta a maior absorção dos voláteis que este tipo de borracha proporciona. O valor negativo do IS encontrado para o betume BBbP pode ser um indicativo

de que o betume BB e a borracha criogénica incorporada neste estudo não se mostram compatíveis, pois apenas ocorreu uma insignificante melhoria do IS do betume convencional BB (-0,76) em relação ao betume-borracha BBbP (-0,62).

O Quadro 6.15 apresenta os resultados do ensaio de envelhecimento RTFOT para os betumes-borracha.

Quadro 6.15 – Características dos betumes-borracha após o envelhecimento

Ensaio	Norma	BBbB	BBbP	BGbB	BGbP	BCbB	BCbP
RTFOT 163 °C, 85 minutos	ASTM D 2872						
Varição em massa (% de massa)		0,3	0,3	0,1	0	0,2	0,9
Aumento do ponto de amolecimento (°C)		8,5	14,7	4,7	0,4	17,1	11,2
Resiliência (%)		46	47	40	32	52	56
Penetração retida (%)		71,1	59,4	100	86,1	99,0	92,2
RTFOT 175 °C, 85 minutos							
Varição em massa (% de massa)		0,5	0,5	0,1	0,2	0,2	0,4
Aumento do ponto de amolecimento (°C)		9,1	16,2	5,7	0,3	16,4	16,6
Resiliência (%)		47	40	41	29	43	45
Penetração retida (%)		55,8	50,0	101,3	82,0	107,1	83,3

O envelhecimento através do RTFOT foi realizado a duas temperaturas, 163 °C, de acordo com a norma e 175 °C, para verificar o comportamento em temperaturas próximas ao fabrico do betume. Os betumes-borracha apresentaram uma pequena perda de massa, sendo que este valor foi maior para o betume-borracha BCbP, que pode ser um indicativo de perda de voláteis mais acentuada pela parcela destes componentes que não interagiu com a borracha.

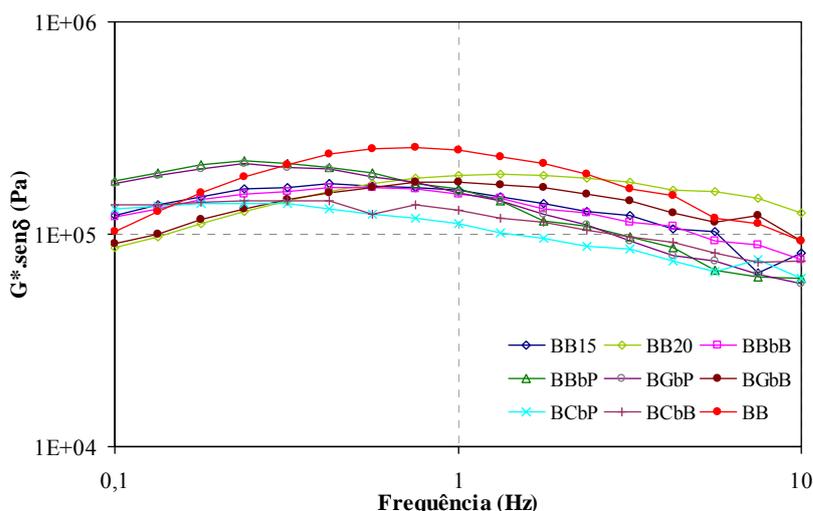
Relativamente ao aumento do ponto de amolecimento, a 163 °C, os betumes-borracha BBbP e BCbB obtiveram valores mais elevados em relação aos demais, devido à evaporação dos voláteis no processo de envelhecimento. No ensaio a 175 °C, além destes betumes, o BBbP apresenta um elevado aumento deste parâmetro. O aumento da resiliência após o ensaio RTFOT pode ser um indicativo de que durante a produção das misturas na central ocorrerá ainda uma maior interação entre a borracha e o betume, como constatado por Morilha Jr. (2004). Assim, pode concluir-se que os betumes-borracha produzem misturas betuminosas mais flexíveis mesmo após o envelhecimento a que ficam submetidas durante a produção, espalhamento e compactação.

Os elevados valores obtidos de penetração retida indicaram que os betumes-borracha produzidos demonstraram ser mais resistentes ao envelhecimento, mas uma penetração mais elevada que a obtida no betume não envelhecido mostra que está ocorrendo a despolimerização devido ao aumento da temperatura. De acordo com a *European Standard EN 12591, Bitumen and Bituminous Binders – Specifications for Paving Grade Bitumens*, (1999), a penetração retida deverá ser maior ou igual a 60, valor muito inferior aos obtidos, a excepção dos betumes BBbP e BBbB, que estão no limite especificado.

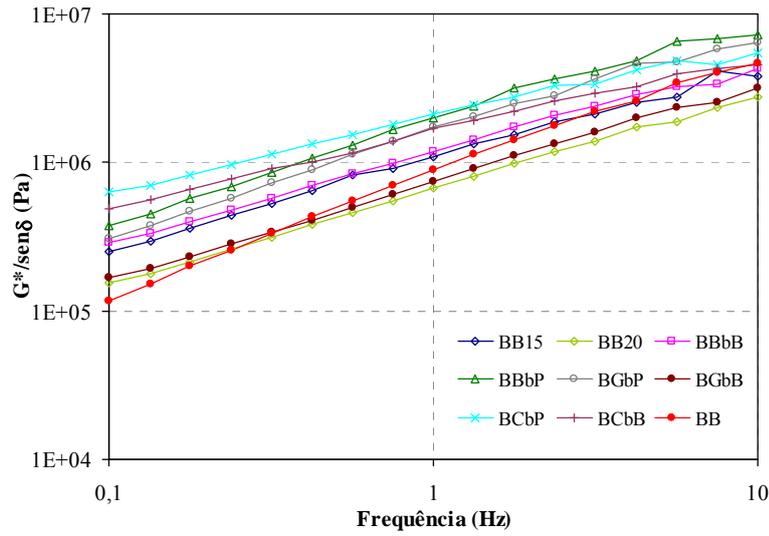
### Reologia

Para os betumes-borracha foi realizada uma análise do comportamento reológico, expresso em termos de  $G^* \cdot \text{sen} \delta$  e  $G^*/\text{sen} \delta$  e do ângulo de fase em função da frequência aplicada, de modo a prever o desempenho das misturas betuminosas quanto à fadiga e deformação permanente.

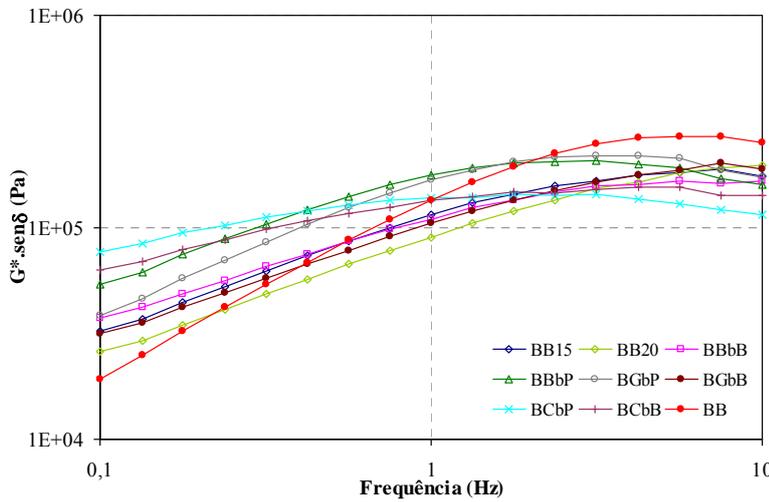
A análise reológica dos betumes-borracha foi realizada com varrimentos de 25 frequências entre 0,01 Hz e 100 Hz, às temperaturas de serviço (20, 30, 40, 50 e 60 °C). Os resultados dos ensaios de reologia com o betume convencional CAP 50/70 também são apresentados. As Figuras 6.75 a 6.84 apresentam os resultados obtidos de  $G^* \cdot \text{sen} \delta$  e  $G^*/\text{sen} \delta$  para as misturas nas frequências de 0,01 a 10 Hz, para cada temperatura de ensaio.



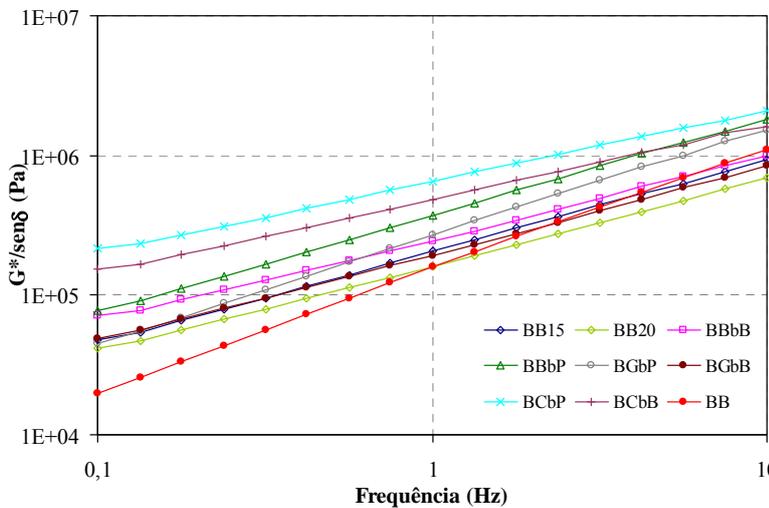
Figuras 6.75 –  $G^* \cdot \text{sen} \delta$  em função da frequência aplicada na temperatura de 20 °C



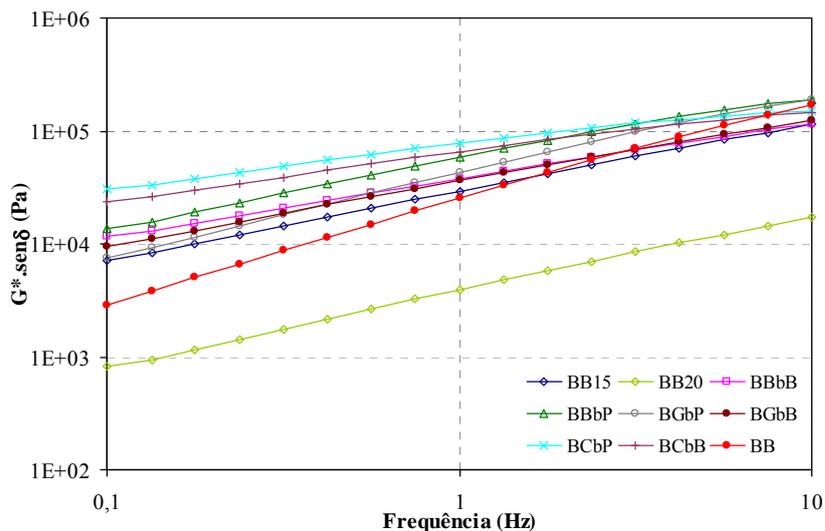
Figuras 6.76 –  $G^*/\text{sen}\delta$  em função da frequência aplicada na temperatura de 20 °C



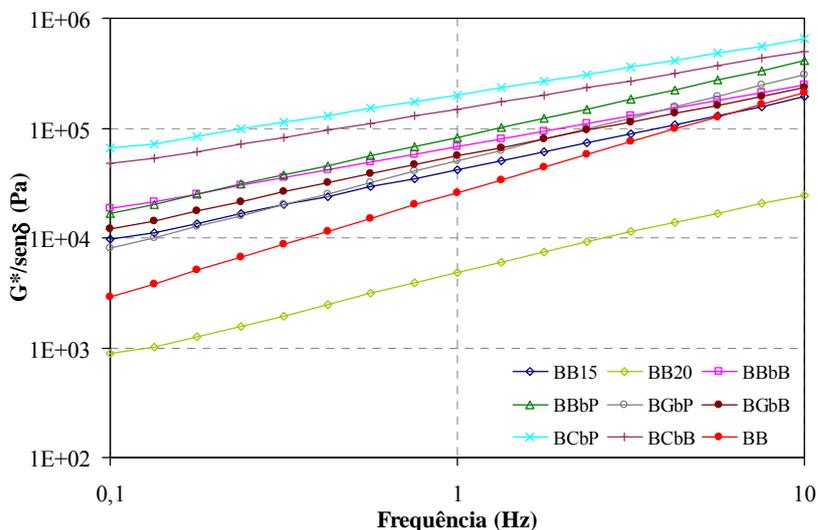
Figuras 6.77 –  $G^* \cdot \text{sen}\delta$  em função da frequência aplicada na temperatura de 30 °C



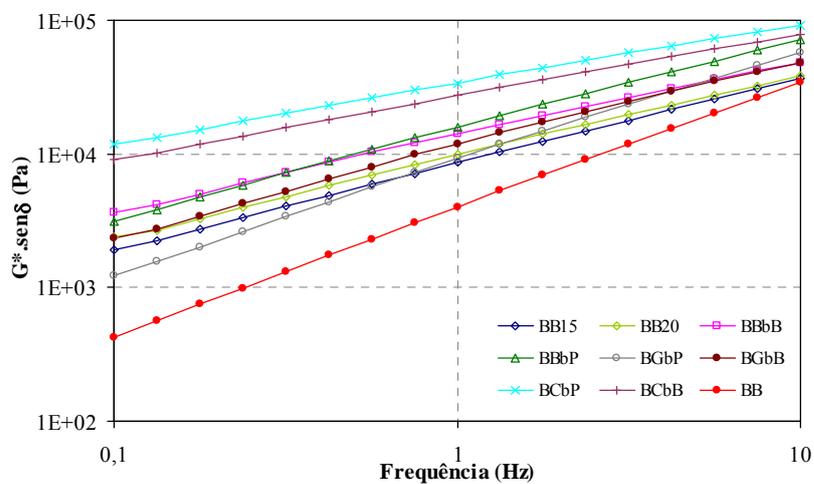
Figuras 6.78 –  $G^*/\text{sen}\delta$  em função da frequência aplicada na temperatura de 30 °C



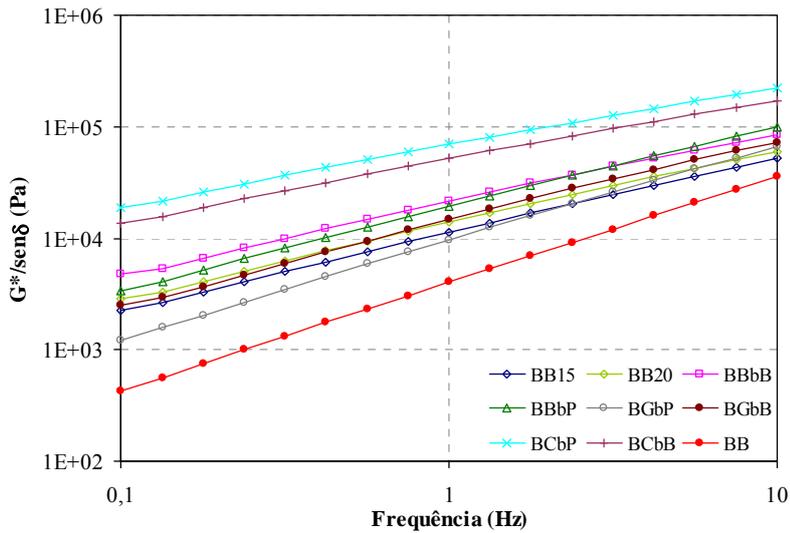
Figuras 6.79 –  $G^* \cdot \text{sen}\delta$  em função da frequência aplicada na temperatura de 40 °C



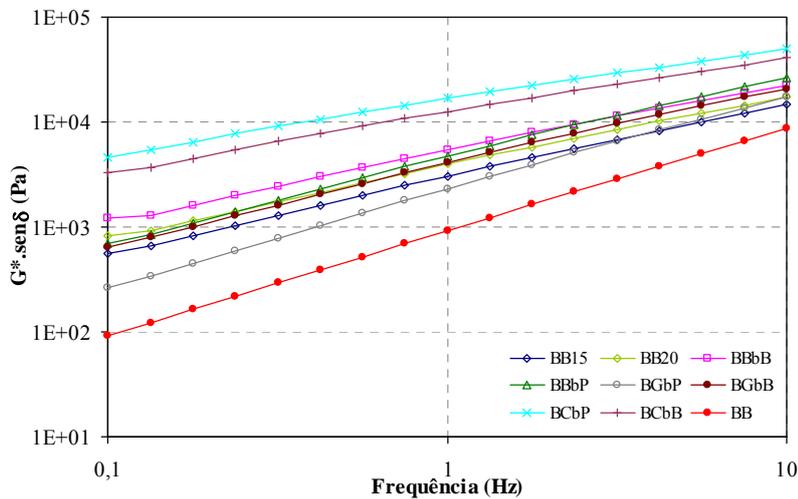
Figuras 6.80 –  $G^*/\text{sen}\delta$  em função da frequência aplicada na temperatura de 40 °C



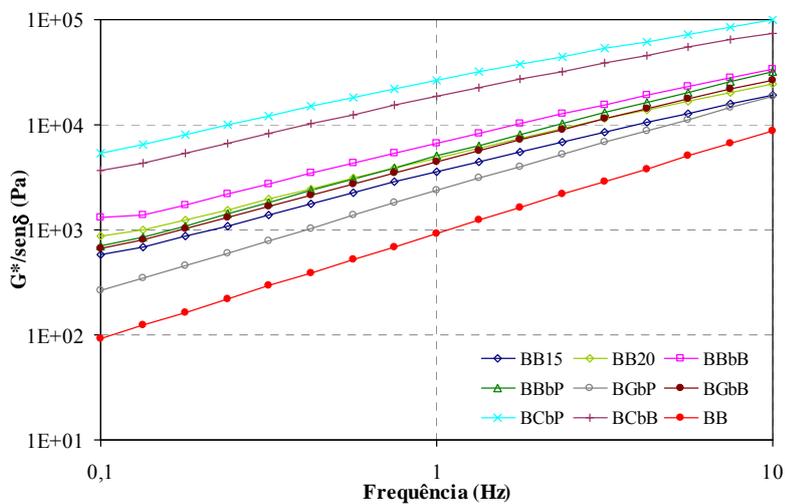
Figuras 6.81 –  $G^* \cdot \text{sen}\delta$  em função da frequência aplicada na temperatura de 50 °C



Figuras 6.82 –  $G^*/\text{sen}\delta$  em função da frequência aplicada na temperatura de 50 °C



Figuras 6.83 –  $G^*. \text{sen}\delta$  em função da frequência aplicada na temperatura de 60 °C



Figuras 6.84 –  $G^*/\text{sen}\delta$  em função da frequência aplicada na temperatura de 60 °C

A partir dos resultados da reologia, parâmetros  $G^*\text{sen}\delta$  e  $G^*/\text{sen}\delta$  (Figuras 6.75 a 6.84), pode-se fazer uma previsão do comportamento das misturas betuminosas, relativamente à fadiga e deformação permanente:

- de acordo com a Figura 6.75, à temperatura de 20 °C e para a frequência de 10 Hz, às quais são realizados os ensaios de fadiga em misturas betuminosas, o betume convencional CAP 50/70 e o betume-borracha BGbB obteriam um desempenho inferior em relação aos restantes betumes-borracha. O betume-borracha BB-20 nestas condições de frequência e temperatura também teria um fraco desempenho, mas para frequências mais baixas, o comportamento poderia ser satisfatório. O betume com melhor desempenho seria o BCbP;
- à temperatura de 30 °C, em termos de comportamento à fadiga com relação ao parâmetro  $G^*\text{sen}\delta$  (Figura 6.77), houve igualmente uma tendência de um pior comportamento do betume CAP 50/70;
- a análise da previsão em relação à deformação permanente à temperatura de 60 °C (na qual foram realizados os ensaios de deformação permanente), de acordo com a Figura 6.84, o betume convencional obteria o pior desempenho e os betumes-borracha produzidos com o betume convencional mais rígido (BCbP e BCbB), o melhor;
- para temperaturas de 50 °C (Figura 6.82), a mesma observação se verifica.

Os valores obtidos nos ensaios de reologia necessitam ser comparados aos resultados de desempenho mecânico através dos ensaios de fadiga e de deformação permanente com as misturas betuminosas. Além do betume, a granulometria da mistura, como também a percentagem de betume e volume de vazios têm influência directa no desempenho mecânico. A reologia, neste caso, está a ser utilizada como uma ferramenta de modo a auxiliar a previsão de comportamento, que necessita ainda da comparação de desempenho.

Para cada betume estudado, foi possível obter, através de translação gráfica, a curva de equivalência frequência-temperatura (*master curve*), em varrimentos de frequência de 0,01 a 100 Hz para a temperatura de referência de 20 °C, apresentadas nas Figuras 6.85 a 6.93, recorrendo a medições às temperaturas de 20, 30, 40, 50 e 60 °C. Nestas figuras, além da *master curve*, apresentam-se também as curvas para 30, 40, 50 e 60 °C.

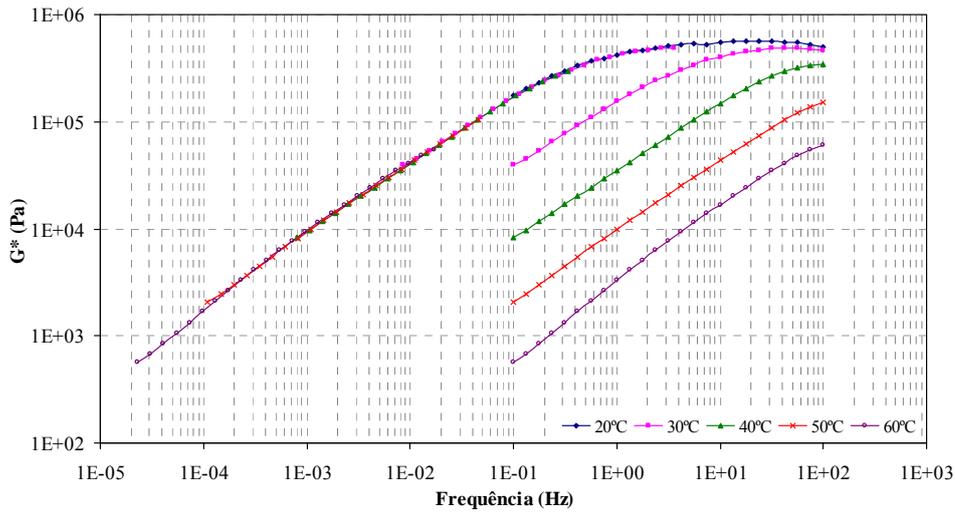


Figura 6.85 – Curva de equivalência frequência-temperatura do BB15

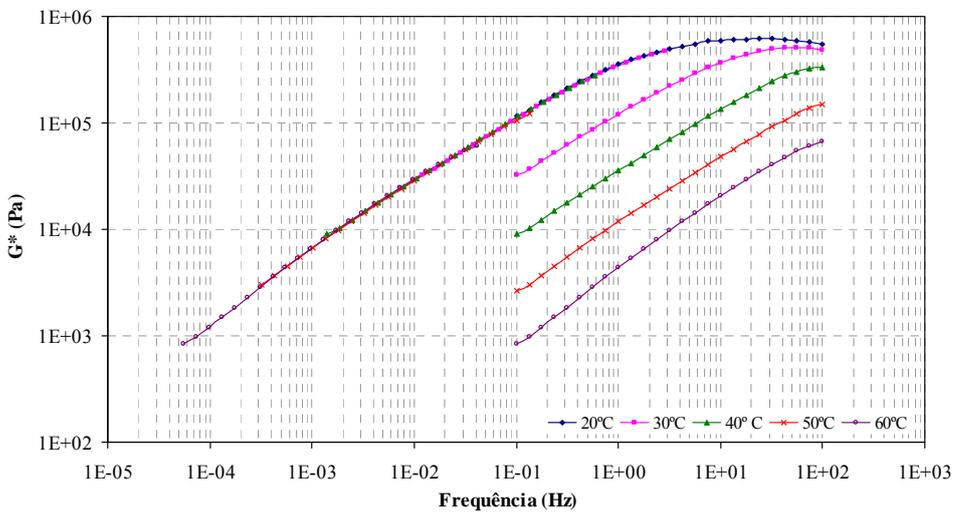


Figura 6.86 – Curva de equivalência frequência-temperatura do BB20

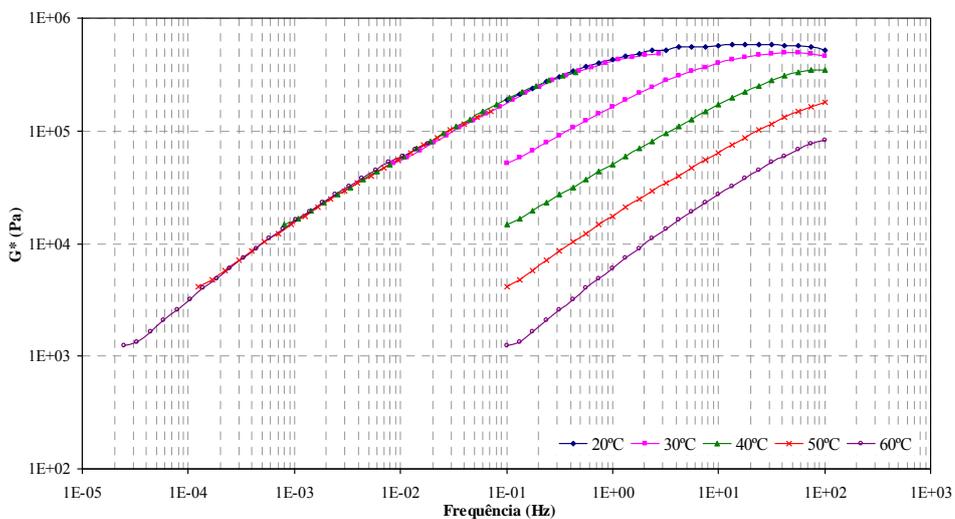


Figura 6.87 – Curva de equivalência frequência-temperatura do BBbB

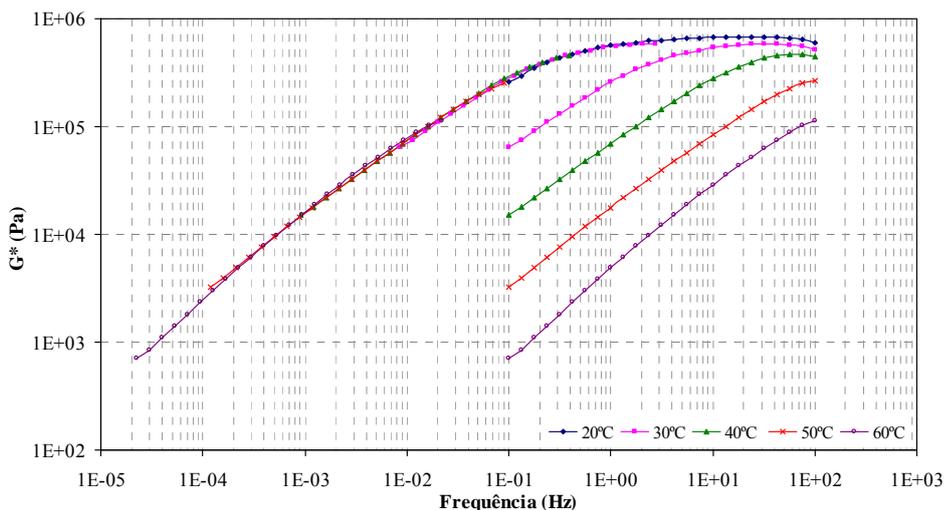


Figura 6.88 – Curva de equivalência frequência-temperatura do BBbP

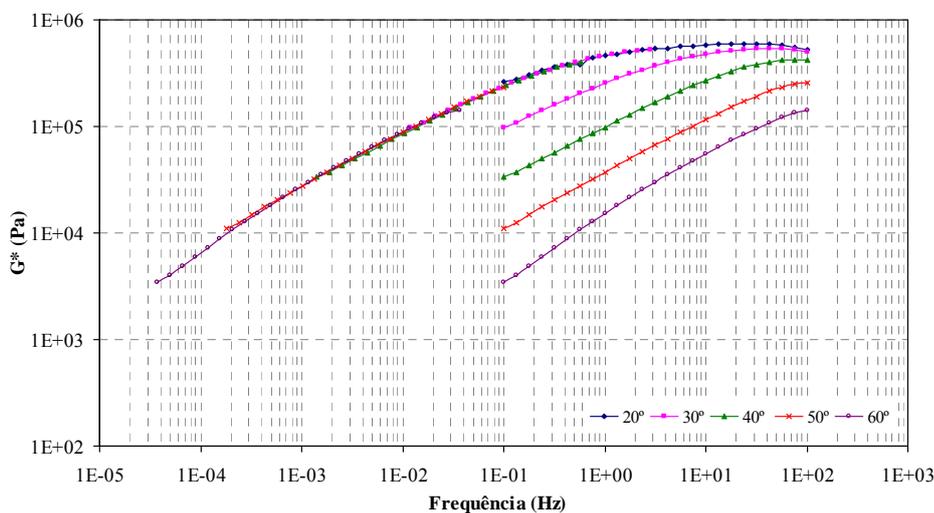


Figura 6.89 – Curva de equivalência frequência-temperatura do BCbB

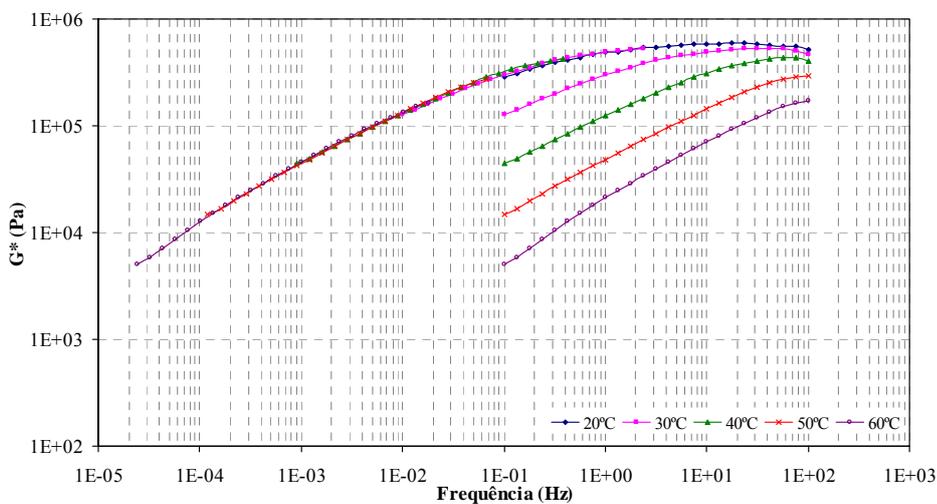


Figura 6.90 – Curva de equivalência frequência-temperatura do BCbP

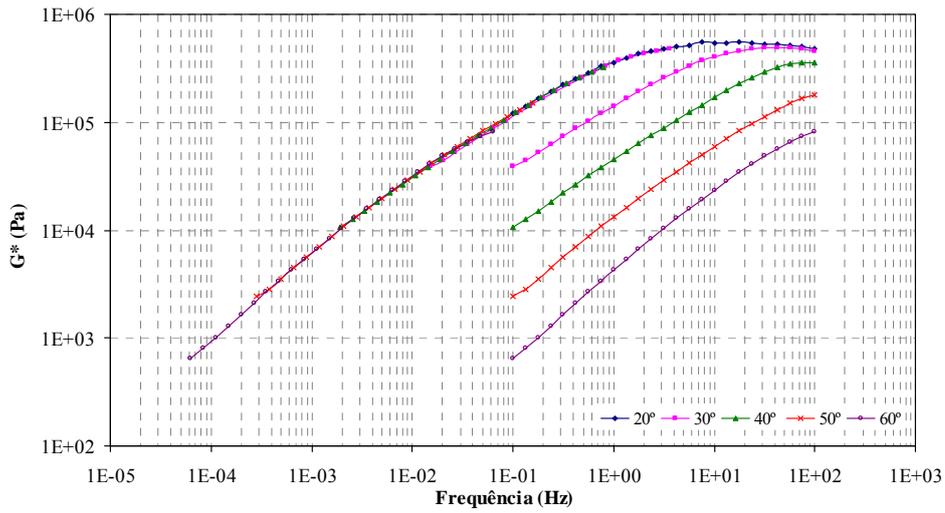


Figura 6.91 – Curva de equivalência frequência-temperatura do BgB

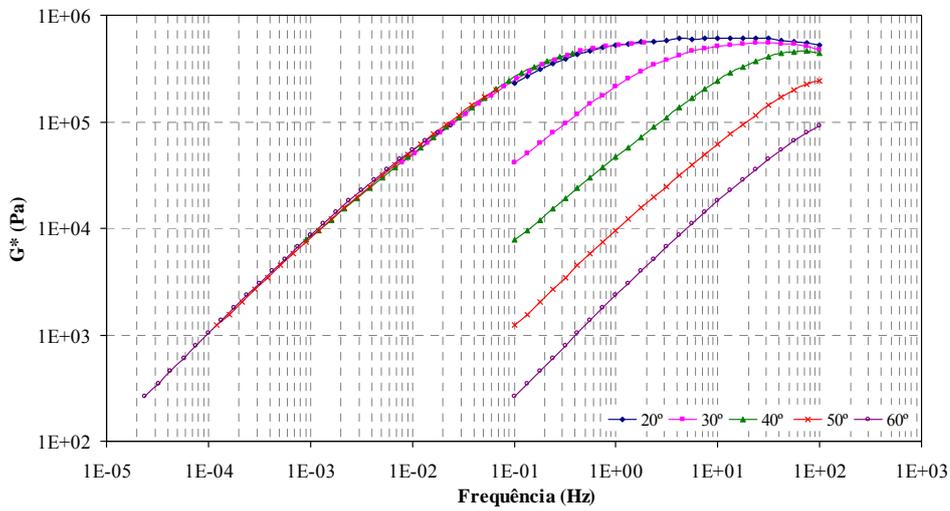


Figura 6.92 – Curva de equivalência frequência-temperatura do BgP

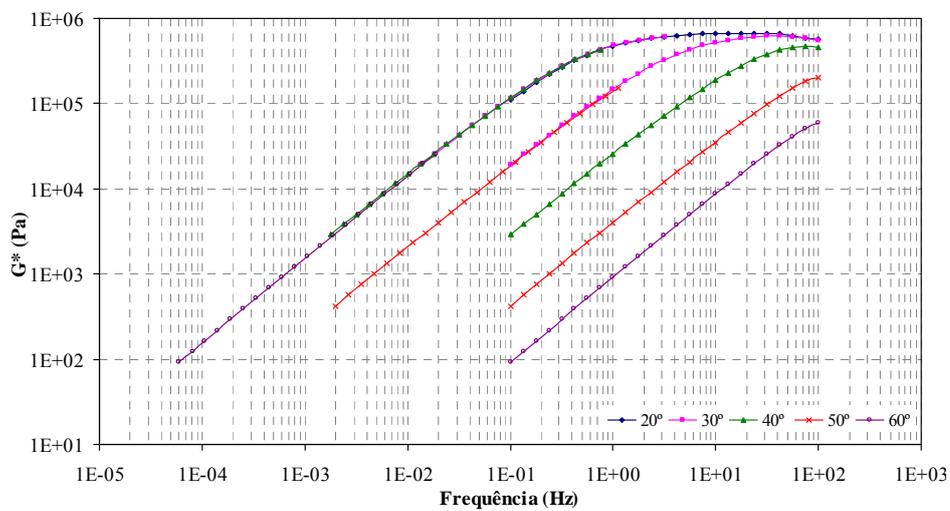


Figura 6.93 – Curva de equivalência frequência-temperatura do BB (CAP 50/70)

A análise das *master curves* pode ser realizada com maior clareza quando as curvas de todos os betumes são analisadas em conjunto, como apresenta a Figura 6.94.

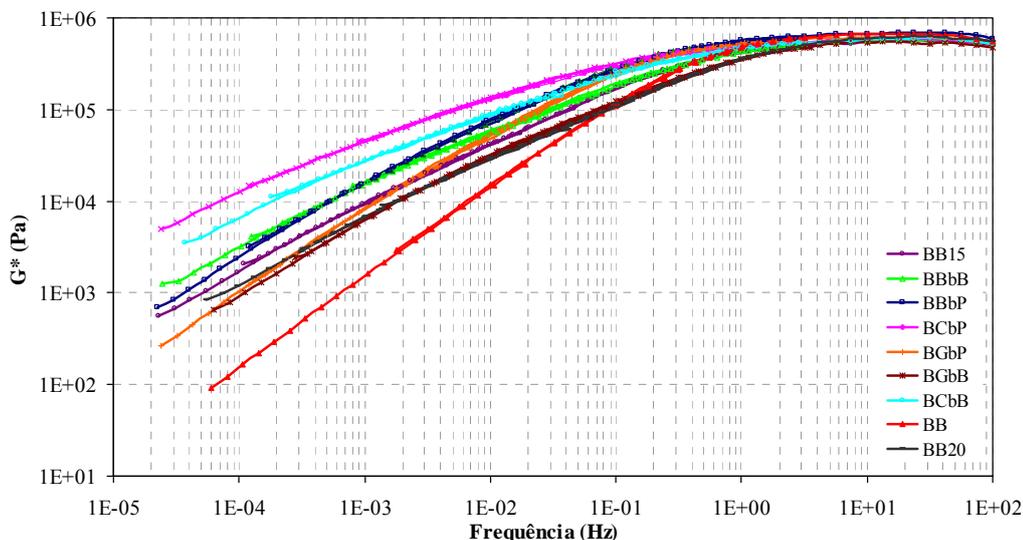


Figura 6.94 – Curva de equivalência frequência-temperatura de todos os betumes

A partir de frequências inferiores a 10 Hz, observa-se que as curvas possuem inclinações diferentes e que a curva do betume convencional CAP 50/70 apresenta menores valores de módulo complexo, enquanto que o betume BCbP exibe valores mais elevados. Para frequências mais elevadas, superiores a 10 Hz, as curvas são semelhantes. Através da Figura 6.95, pode observar-se este comportamento, isolando-se o intervalo de frequência de 1 a 10 Hz.

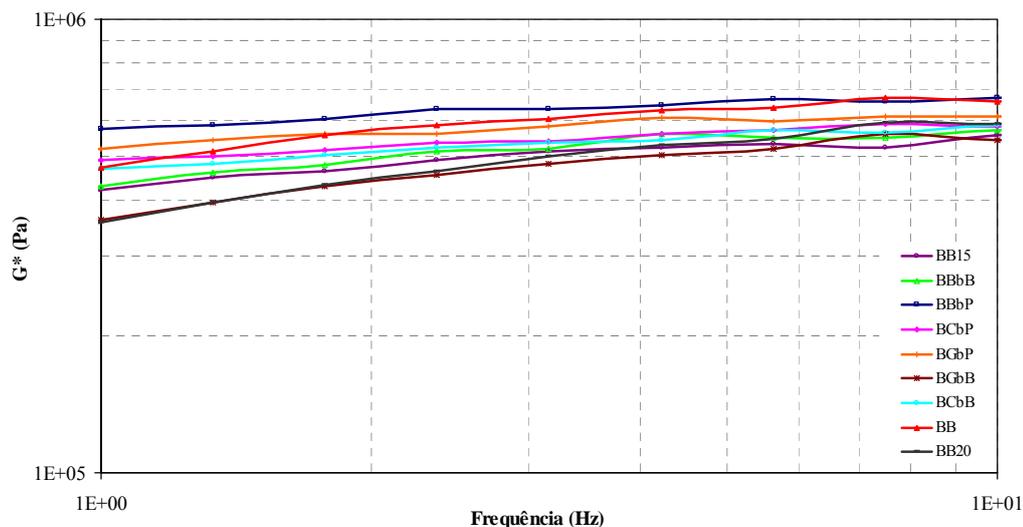


Figura 6.95 – Curva de equivalência frequência-temperatura dos betumes para frequências de 1 a 10 Hz

### Microscopia por varrimento electrónico

A microscopia por varrimento electrónico, com o Microscópio Electrónico de Varrimento (MEV) LEICA Cambridge S 360, teve como objectivo verificar a compatibilidade e a microestrutura dos betumes-borracha. As Figuras 6.96 a 6.103 apresentam a microestrutura dos betumes-borracha (com aumentos de 100, 700 e 1600 vezes).

Na Figura 6.96, pode observar-se que os grãos de borracha sofreram redução de tamanho e estão incorporados ao betume em (b), formando um sistema betume-borracha homogéneo. Em (c), pequenos grãos de borracha são visualizados na mistura. Na Figura 6.97 (a) foram observadas “bolhas de ar” no betume-borracha. A borracha e o betume encontram-se integrados, embora são ainda passíveis de visualização em (c) grãos de borracha maiores.

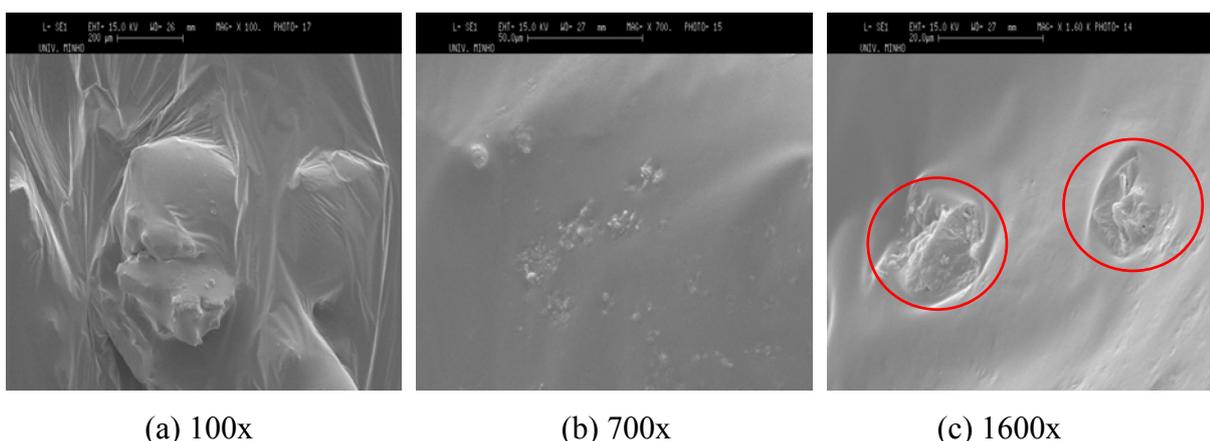


Figura 6.96 – Microestrutura do betume-borracha *continuous blend* BBbB

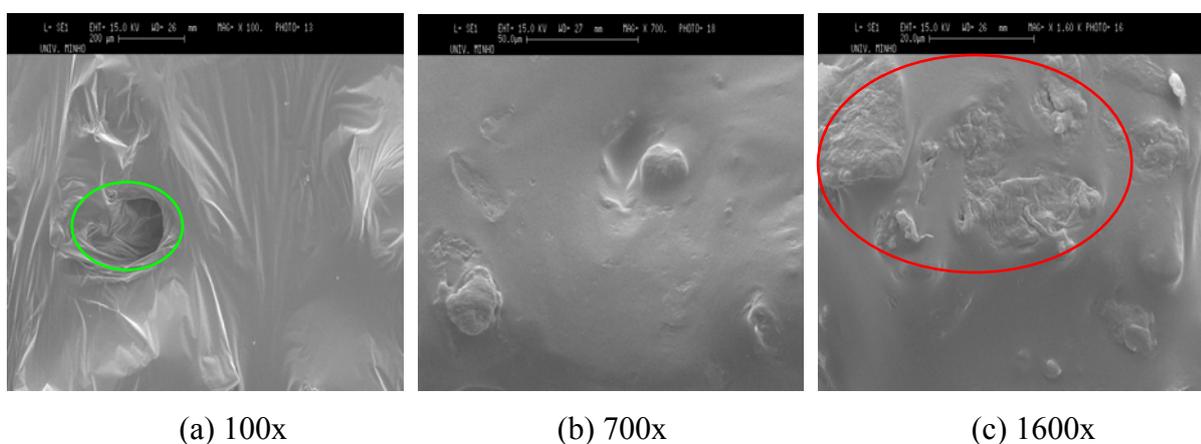


Figura 6.97 – Microestrutura do betume-borracha *continuous blend* BBbP

Para ambos os betumes, BBbB e BBbP, os sistemas mostram-se compatíveis. Os grãos de borracha são visíveis nos dois sistemas, mas foi possível observar que a borracha ambiente interagiu mais intensamente com o betume CAP 50/70 (BBbB) do que a borracha criogénica (BBbP). Também é importante salientar que esta análise depende da amostra e de uma forma geral, as duas borrachas estão bem dissolvidas no betume.

Apesar da compatibilidade dos dois sistemas, no betume BGbB foram observados, mesmo após 90 minutos de digestão, certa quantidade de grãos de borracha esponjosos na mistura (Figura 6.98). Apesar da borracha ambiente interagir mais facilmente com o betume em função da sua textura, esta interacção depende também do tipo de betume. O betume PEN 50/70 reagiu mais facilmente com a borracha criogénica (Figura 6.99), o que pode significar um sistema mais compatível com este tipo de borracha em relação à borracha criogénica.

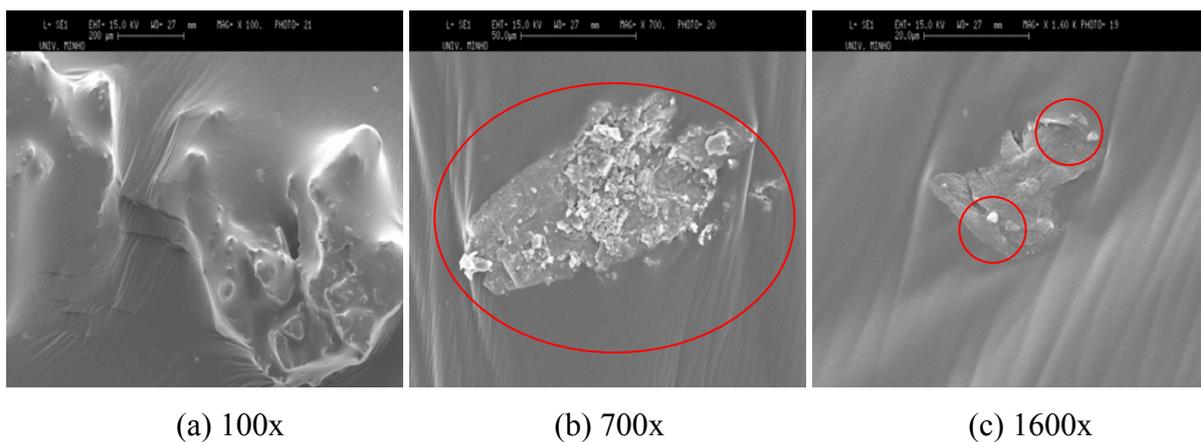


Figura 6.98 – Microestrutura do betume-borracha *continuous blend* BGbB

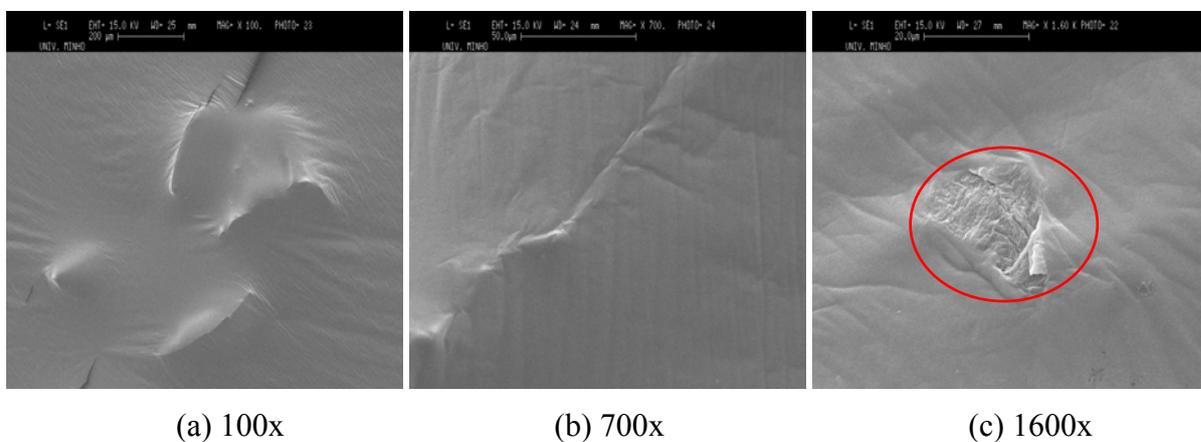


Figura 6.99 – Microestrutura do betume-borracha *continuous blend* BGbP

No caso do betume PEN 35/50, as duas borrachas apresentaram-se bem incorporadas a este betume. Na Figura 6.100, observou-se a completa integração da borracha ambiente com o betume na amostra, e também foram visualizadas pequenas fibras dos pneus. Para a borracha criogénica e o betume PEN 35/50, Figura 6.101, a borracha criogénica também se apresentou completamente dissolvidas na massa de betume.

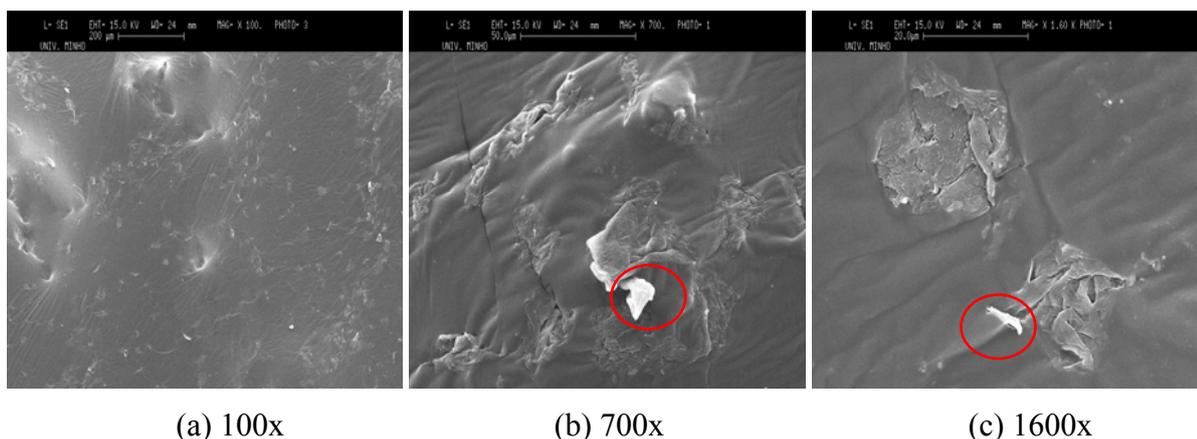


Figura 6.100 – Microestrutura do betume-borracha *continuous blend* BCbB

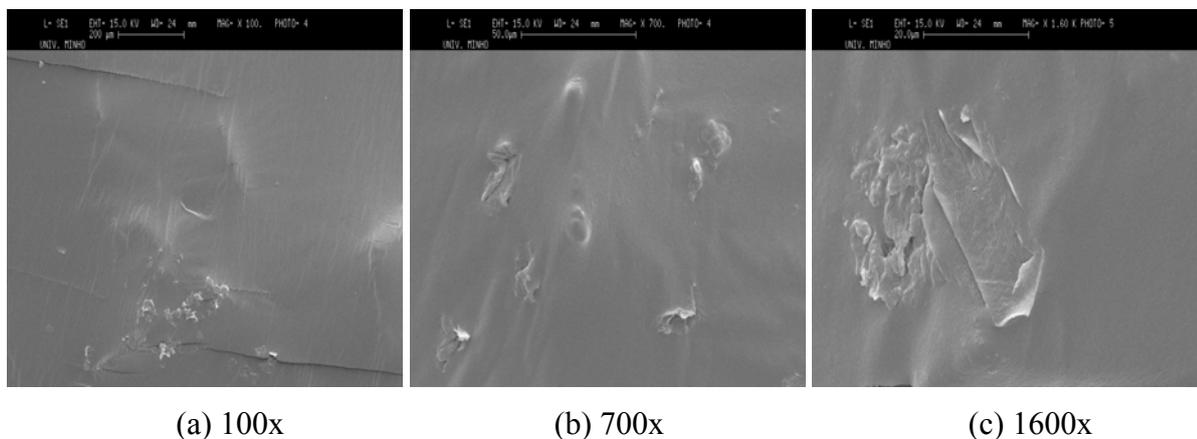


Figura 6.101 – Microestrutura do betume-borracha *continuous blend* BCbP

Os betumes BB20 e BB15, provenientes do sistema *terminal blend* e utilizando borracha ambiente como agente modificador, foram produzidos em ambientes controlados de pressão e temperatura, ou seja, com um controlo de qualidade superior ao *continuous blend* obtido em laboratório.

No betume-borracha BB15 (Figura 6.102), observou-se a completa homogeneidade do sistema, enquanto que no betume-borracha BB20 (Figura 6.103), foi possível visualizar

pequenos grãos de borracha. Com base na análise visual, a percentagem de 15% de borracha mostrou apresentar melhor compatibilidade na modificação do betume que a percentagem de 20%.

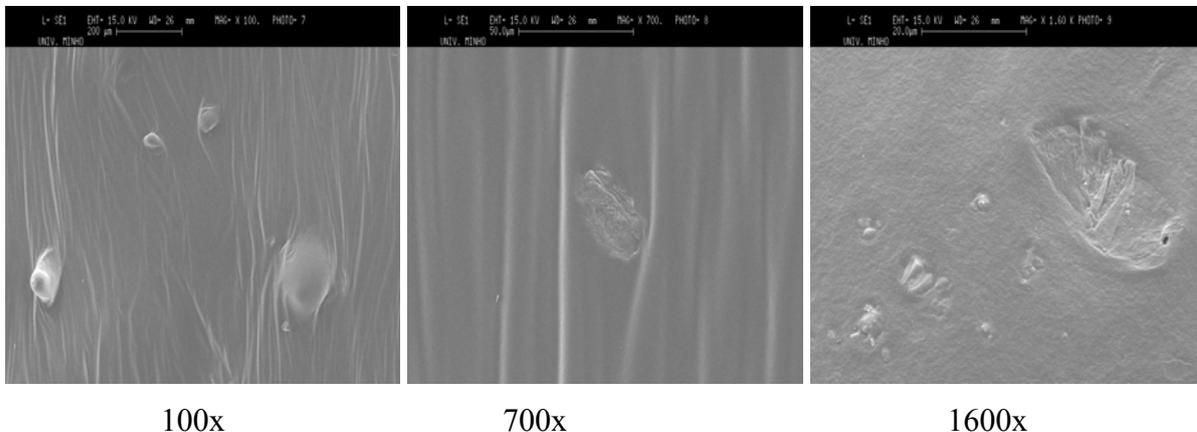


Figura 6.102 – Microestrutura do betume-borracha *terminal blend* BB15

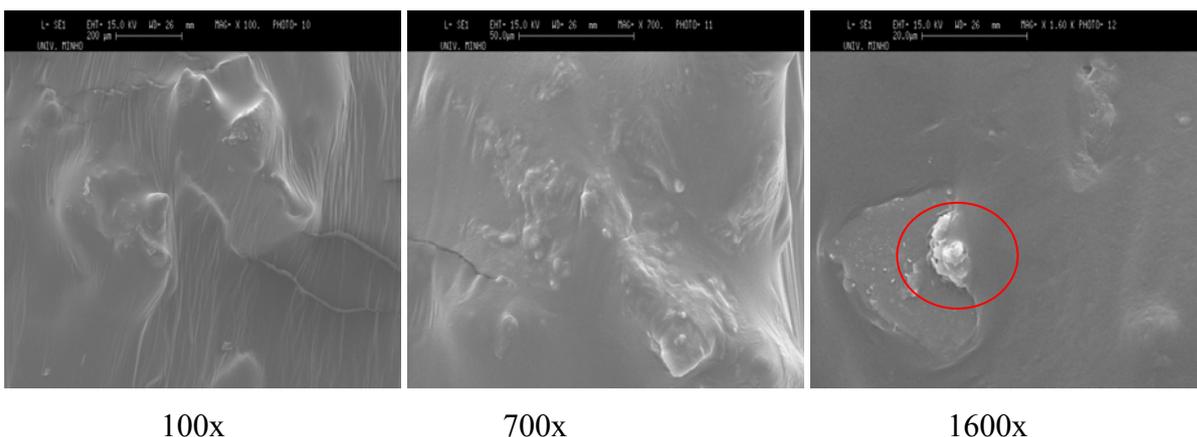


Figura 6.103 – Microestrutura do betume-borracha *terminal blend* BB20

Para todas as amostras de betume-borracha, a quantidade de fibra encontrada foi mínima e o material metálico somente foi detectado a partir da análise de difracção de raio-X da borracha, o que demonstra que ambas as borrachas estavam isentas de impurezas.

Uma vez que os betumes-borracha com materiais portugueses não foram otimizados, sendo que para esses foi utilizada a mesma configuração de fabrico do BBbB (Fase 2), foi realizada a análise da estrutura para tempos de digestão de 45 e 60 minutos e posteriormente comparados com o tempo escolhido de 90 minutos para o BCbP, como se apresenta na Figura 6.104.

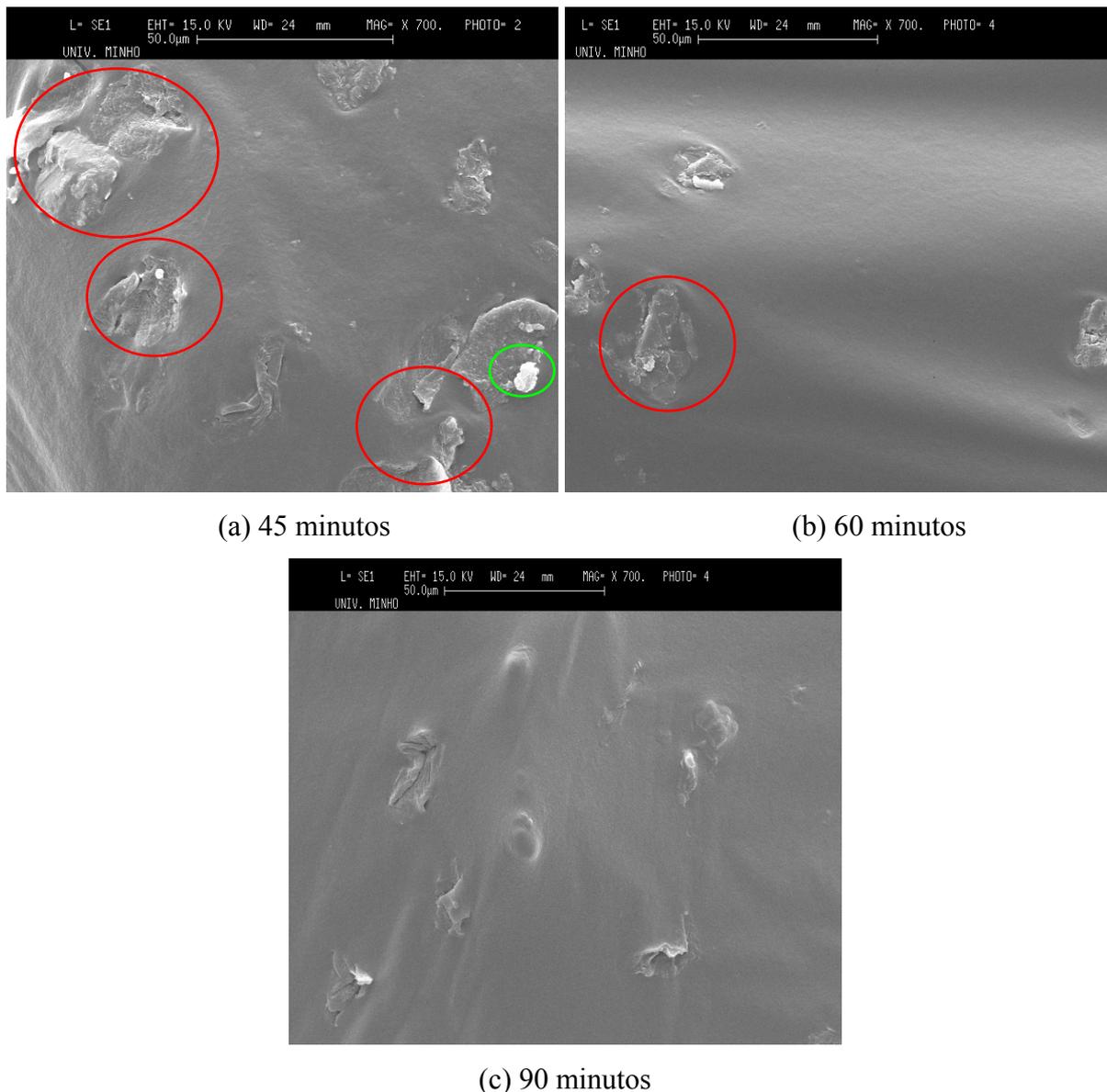


Figura 6.104 – Microestrutura do BCbP para vários tempos de digestão

Da mesma forma que ocorreu com o BBbB, aos 45 minutos, os grãos de borracha ainda são visíveis e com grande tamanho dentro do sistema betume-borracha (Figura 6.104 a). Ainda nesta figura, observa-se a presença de fibras. A partir dos 60 minutos de digestão já se consegue obter uma mistura homogénea entre o betume e a borracha, apesar da presença de grãos de borracha, mas aos 90 minutos a borracha apresenta-se melhor digerida, com grãos menores no betume.

Para os dois betumes (BBbB e BCbP), pode afirmar-se que:

- o tamanho das partículas de borracha reduz à medida em que aumenta o tempo de digestão;

- a dimensão das partículas de borracha, após a modificação, são reduzidas como resultado da sua interacção com o betume.

A análise microscópica da microestrutura dos ligantes auxiliou a comparação referente ao percentual de borracha incorporada nos dois sistemas de fabrico do betume-borracha além da compatibilidade dos sistemas. Tendo em conta que no caso dos betumes-*borracha terminal blend* o sistema BB15 apresentou-se mais compatível que o BB20, considerou-se interessante avaliar um sistema *continuous blend* com uma percentagem de borracha ambiente de 15%, a mesma do betume-borracha *terminal blend*. Assim, foi produzido um betume-borracha *continuous blend* com 15% de borracha ambiente (tempo de digestão de 90 minutos e temperatura de 180 °C) para verificar a sua estrutura e poder compará-la com o tipo *terminal blend*. A Figura 6.105 apresenta a microestrutura do betume-borracha *continuous blend* com 15% de borracha incorporada.

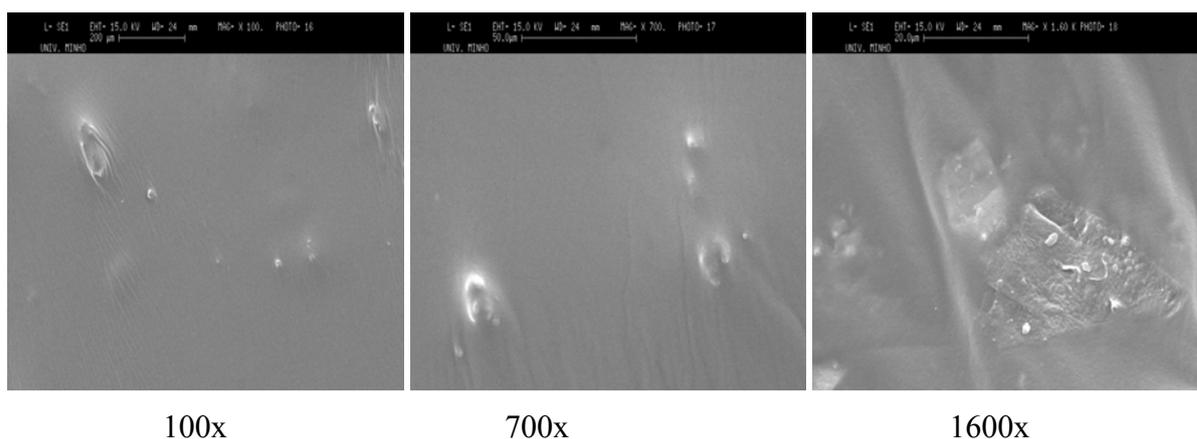


Figura 6.105 – Microestrutura do betume-borracha *continuous blend* com 15% de borracha

A análise da estrutura mostrou que 15% parece ser uma percentagem pequena de borracha a ser incorporada ao betume, tendo em conta o aspecto do sistema (quando comparado com o BB15, Figura 6.102). Mas, por outro lado, o sistema apresenta ser compatível e deve ser considerada a diferente forma de produção dos dois ligantes (laboratório e unidade industrial). Esta análise auxiliou também a confirmação da escolha da percentagem de borracha de 17% para o betume-borracha *continuous blend*.

## 6.8. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MISTURAS BETUMINOSAS

Após a caracterização dos novos betume, produzidos com materiais brasileiros e portugueses, foi iniciada a produção de misturas betuminosas com a granulometria *gap graded* Caltrans.

No estudo foi adoptada a mesma percentagem de betume e volume de vazios da mistura CBBbB (8,0% de betume e 6,0% de volume de vazios). As misturas estudadas foram as seguintes:

- CBBbP (Caltrans, betume CAP 50/70 e borracha portuguesa);
- CBGbb (Caltrans, betume PEN 50/70 e borracha brasileira);
- CBGbp (Caltrans, betume PEN 50/70 e borracha portuguesa);
- CBCbB (Caltrans, betume PEN 35/50 e borracha brasileira);
- CBCbP (Caltrans, betume PEN 35/50 e borracha portuguesa).

Os ensaios mecânicos para a avaliação do desempenho das misturas betuminosas com granulometria Caltrans foram os mesmos já apresentados e detalhados.

### Módulo dinâmico

Os ensaios do módulo dinâmico e do ângulo de fase foram realizados de acordo com a norma ASTM 3497 (1995), às frequências de 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2 e 0,1 Hz, utilizando o equipamento de flexão alternada em 4 pontos, com carregamento sinusoidal e extensão máxima de tracção na base do provete de  $50 \times 10^{-6}$ .

Os ensaios foram realizados à temperatura de 20 °C. As Figuras 6.106 e 6.107 apresentam a evolução do módulo dinâmico e do ângulo de fase em função da frequência aplicada, para a temperatura de 20 °C.

Em relação ao tipo de betume, as misturas CBCbP e CBCbB, que foram produzidas com o betume base PEN 35/50, obtiveram um módulo dinâmico superior aos outros, independente do tipo de borracha empregue. Os valores dos módulos dinâmicos das misturas CBBbB e CBBbP, produzidas com um betume base CAP 50/70, foram um pouco inferiores aos módulos das misturas produzidas com um betume base mais rígido, mas foram superiores aos

valores obtidos pelas misturas CBG**b**B e CBG**b**P, que foram produzidas com um betume base equivalente (PEN 50/70).

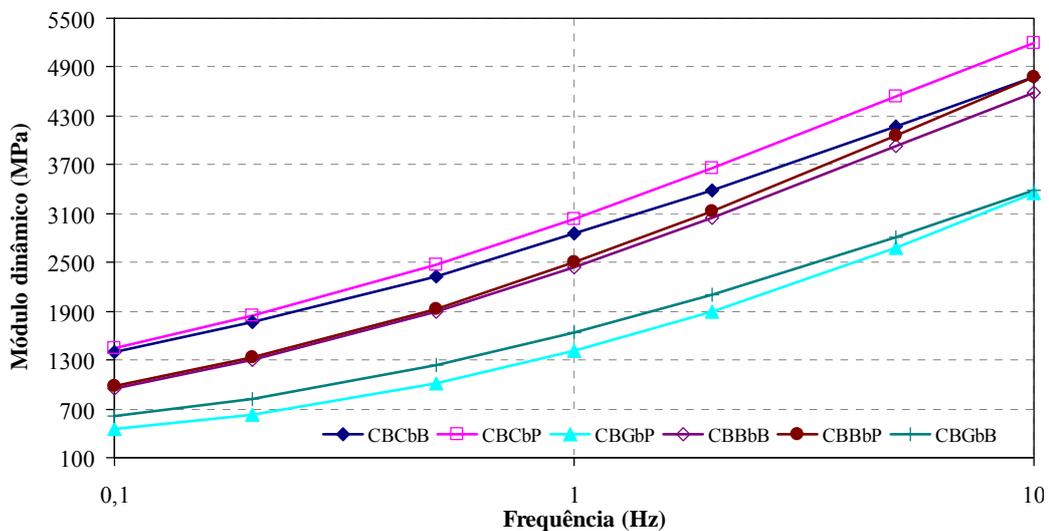


Figura 6.106 – Evolução do módulo dinâmico das misturas Caltrans em função da frequência de aplicação de carga à temperatura de 20 °C

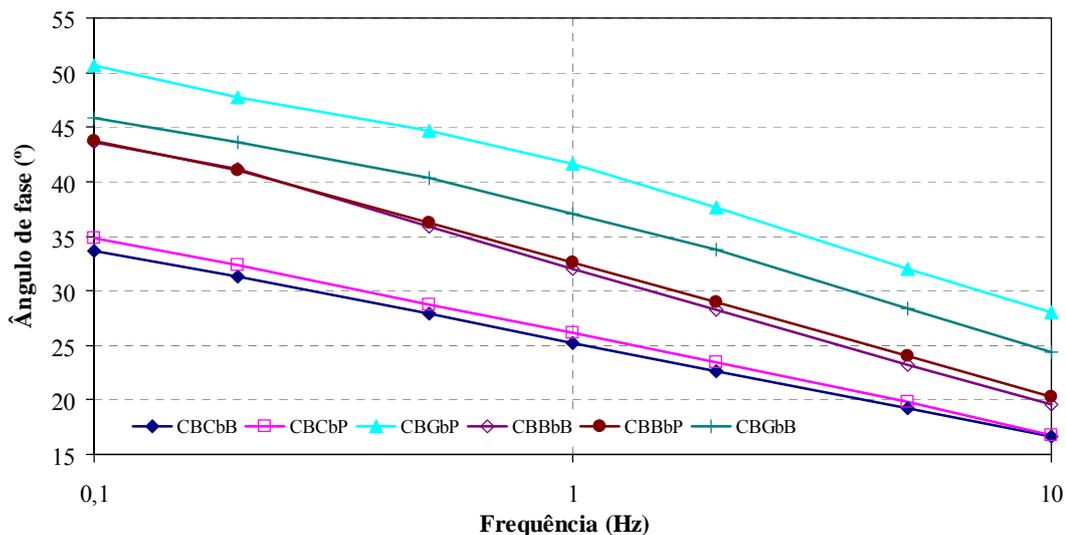


Figura 6.107 – Evolução do ângulo de fase das misturas Caltrans em função da frequência de aplicação de carga à temperatura de 20 °C

O factor que influenciou a diferença entre os módulos foi a rigidez do betume base e o tipo de borracha. Assim, betumes menos rígidos produziram misturas betuminosas menos rígidas. Relativamente ao ângulo de fase, os resultados mostraram que uma maior rigidez na mistura foi traduzida por uma maior resposta elástica (menor ângulo de fase).

A Figura 6.108 apresenta a relação dos módulos dinâmico de todas as misturas Caltrans produzidas, inclusive a CBB20 (betume-borracha tipo *terminal blend*) em comparação com a mistura convencional BBB.

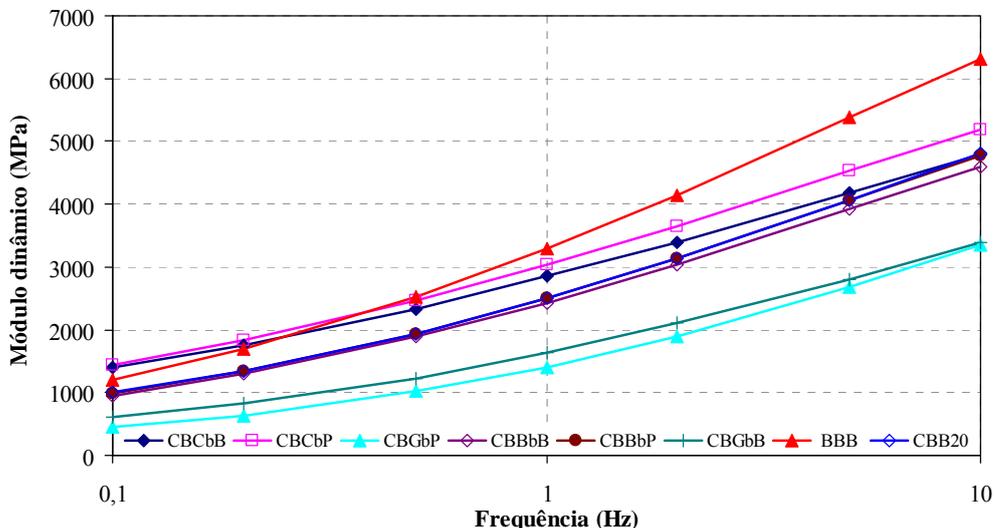


Figura 6.108 – Evolução do módulo dinâmico das misturas Caltrans e BBB em função da frequência de aplicação de carga à temperatura de 20 °C

Conforme já anteriormente verificado, as misturas com betume-borracha possuem módulos dinâmicos inferiores às misturas convencionais. Neste caso, esta diminuição do módulo dinâmico está relacionada com a presença de borracha e do tipo de granulometria (descontínua).

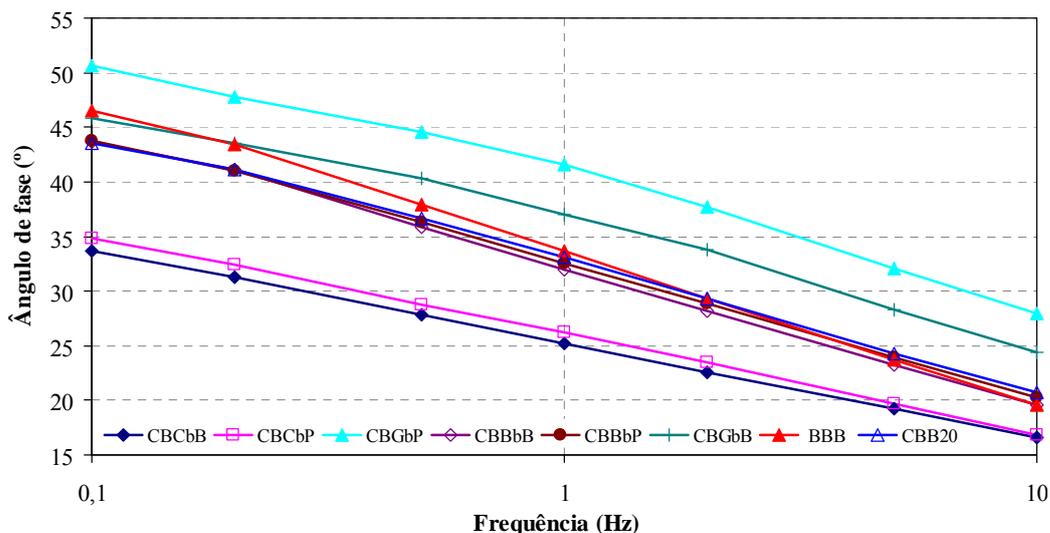


Figura 6.109 – Evolução do ângulo de fase das misturas Caltrans e BBB em função da frequência de aplicação de carga à temperatura de 20 °C

A análise do ângulo de fase (Figura 6.109) mostrou que a resposta elástica da mistura varia com o tipo de betume-borracha utilizado e do tipo de granulometria (*dense graded* ou *gap graded*).

**Resistência à fadiga**

Para determinação da resistência à fadiga foram realizados ensaios de flexão alternada em deformação controlada, com três repetições de carga para cada um dos três níveis de extensão aplicados ( $200 \times 10^{-6}$ ,  $400 \times 10^{-6}$ ,  $800 \times 10^{-6}$ ), à frequência de 10 Hz e temperatura de 20 °C.

Os parâmetros obtidos das leis de fadiga  $N = a \times (1/\epsilon_t)^b$  são apresentados no Quadro 6.16, considerando a extensão expressa em  $10^{-6}$ , no qual verifica-se um bom ajuste para todas as misturas ensaiadas. A Figura 6.110 apresenta as curvas de fadiga obtidas para as misturas Caltrans estudadas em comparação com a mistura convencional BBB.

Quadro 6.16 – Parâmetros obtidos para as leis de fadiga das misturas Caltrans

Parâmetro	CBB20	CBBbB	CBBbP	CBGbB	CBGbP	CBCbB	CBCbP
a	$4,761 \times 10^{10}$	$6,426 \times 10^{14}$	$3,147 \times 10^{15}$	$2,474 \times 10^{12}$	$1,441 \times 10^{17}$	$1,711 \times 10^{14}$	$2,782 \times 10^{17}$
b	2,285	3,807	4,086	2,916	4,637	3,507	4,597
R <sup>2</sup>	0,99	0,97	0,97	0,94	0,99	0,94	0,96

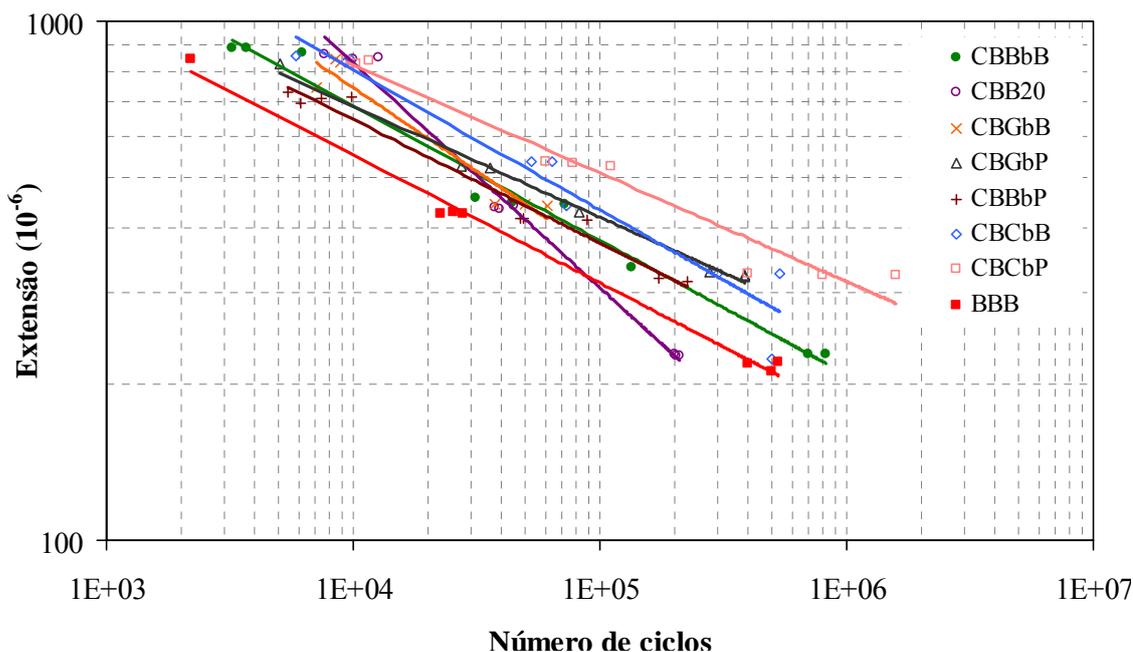


Figura 6.110 – Curvas de fadiga das misturas Caltrans e BBB

De acordo com a Figura 6.110, a resistência à fadiga mostrou-se superior para a mistura Caltrans com betume-borracha com materiais portugueses (CBCbP), tendo-se efectuado também as seguintes observações:

- o emprego de um betume mais rígido (PEN 35/50) resultou numa melhor resistência à fadiga;
- para as misturas produzidas com o betume BC com as borrachas criogénica (CBCbP) e ambiente (CBCbB), verificou-se que a mistura com borracha criogénica apresenta maior resistência à fadiga.
- com as misturas produzidas com o betume BG, aquela com borracha criogénica (CBGbP) obteve melhor resistência à fadiga do que a produzida com borracha ambiente (CBGbB);
- das misturas produzidas com o betume BB, as duas misturas (CBBbB e CBBbP) apresentaram desempenhos semelhantes, sem influência do tipo de borracha;
- relativamente à mistura CBB20, a baixas extensões o desempenho não foi satisfatório;
- em relação à mistura convencional, todas as misturas com betume-borracha apresentaram uma resistência à fadiga superior.

### Resistência à deformação permanente

A determinação da resistência à deformação permanente foi realizada através do ensaio RSST-CH, à temperatura de 60 °C. A Figura 6.111 apresenta os resultados do ensaio de corte, expresso em ESAL (80 kN) para uma rodeira de 12,7 mm, e a Figura 6.112 para uma rodeira de 20,0 mm, ambas, para as misturas Caltrans e BBB.

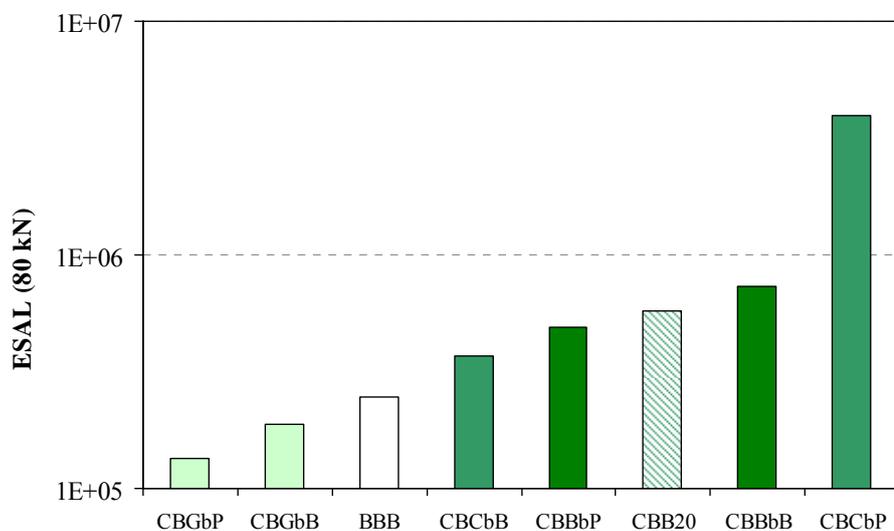


Figura 6.111 – ESAL que origina uma rodeira de 12,7 mm nas misturas Caltrans e BBB

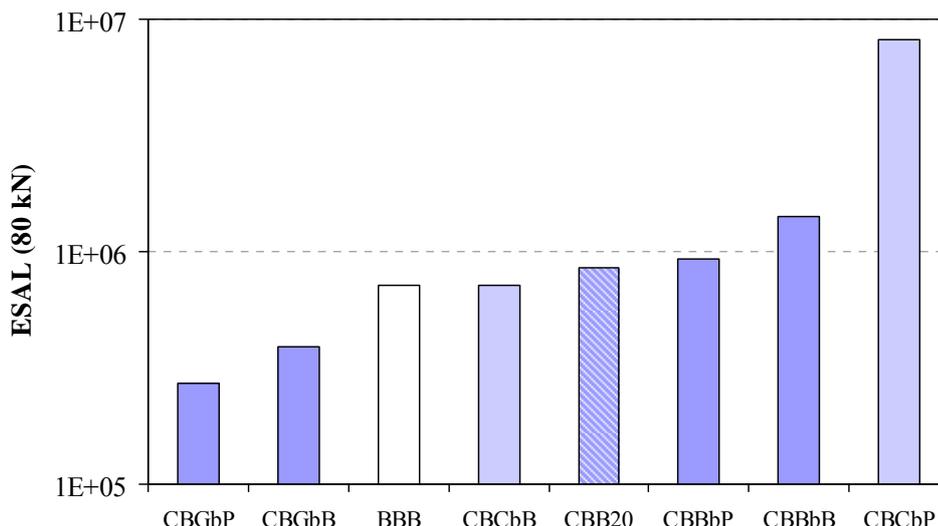


Figura 6.112 – ESAL que origina uma rodeira de 20,0 mm nas misturas Caltrans e BBB

A análise dos resultados das Figuras 6.111 e 6.112 mostram que, em geral, as misturas com betume brasileiro, independente do tipo de borracha empregue, apresentam um razoável desempenho quanto à deformação permanente. A mistura CBCbP, produzida com um betume base mais rígido, resultou num melhor desempenho quanto a este parâmetro.

Dentre as misturas com materiais brasileiros, a CBBbb possui uma maior resistência à deformação permanente. Relativamente às outras misturas Caltrans, as misturas com betume BG apresentaram a menor resistência à deformação permanente, mesmo inferior à mistura betuminosa de referência BBB.

### 6.9. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os critérios de decisão para selecção das melhores misturas envolveram a análise conjunta dos resultados dos ensaios mecânicos de desempenho. O primeiro critério analisado foi a resistência à fadiga. A Figura 6.113 apresenta as curvas de fadiga obtidas para todas as misturas estudadas.

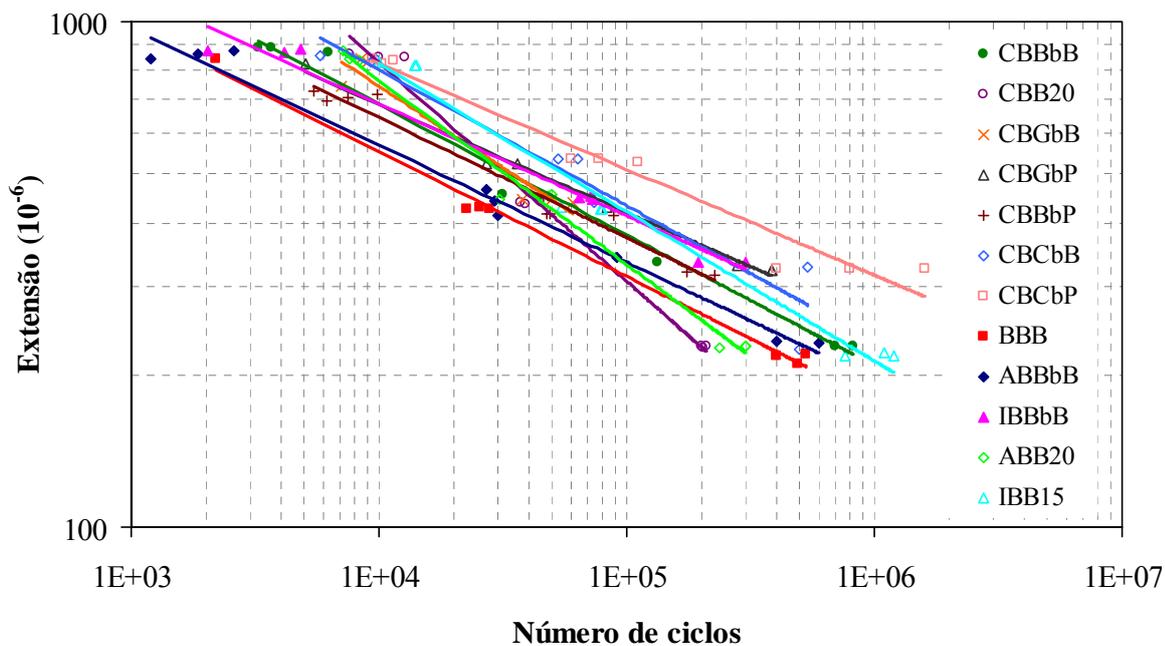


Figura 6.113 – Curvas de fadiga das misturas estudadas

Com o objectivo de comparação dos resultados, com base nas leis de fadiga, e por extrapolação, pode determinar-se o  $N_{100}$  e  $N_{200}$ , número de aplicações de carga para uma extensão de  $100 \times 10^{-6}$  e  $200 \times 10^{-6}$ , respectivamente, conforme apresentam as Figuras 6.114 e 6.115.

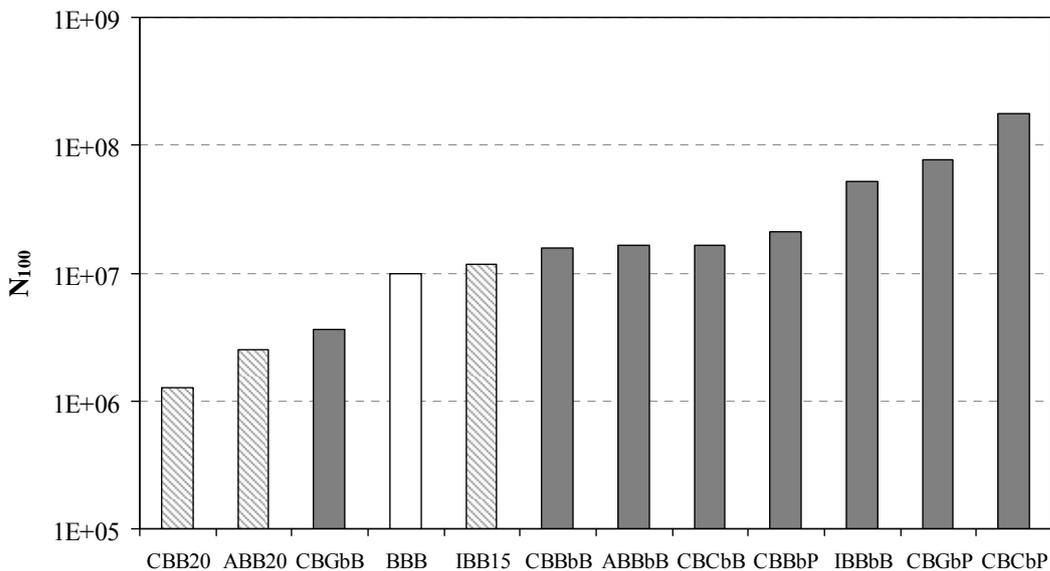


Figura 6.114 –  $N_{100}$  para uma extensão de  $100 \times 10^{-6}$  das misturas

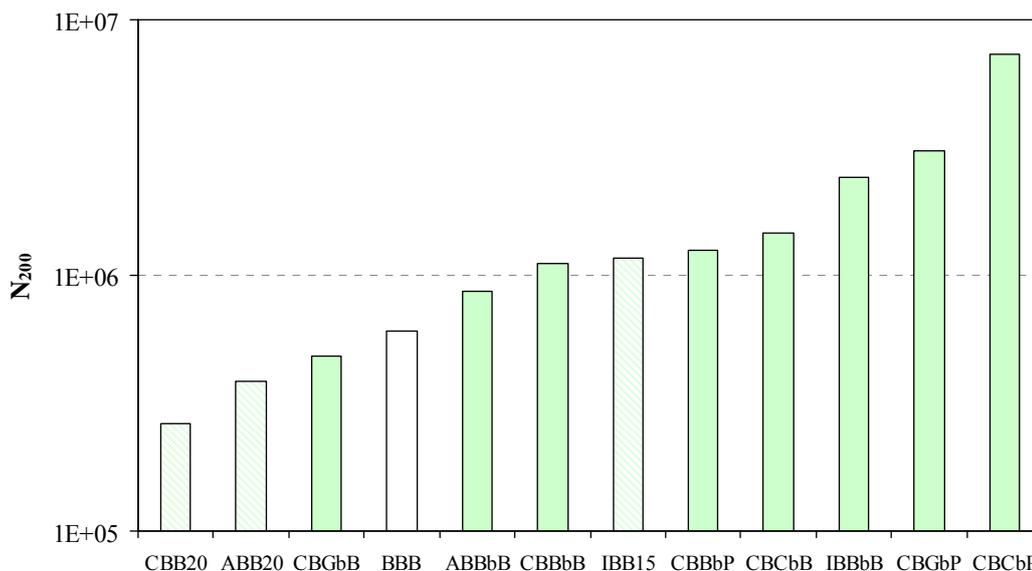


Figura 6.115 –  $N_{200}$  para uma extensão de  $200 \times 10^{-6}$  das misturas

A comparação do desempenho das misturas betuminosas deve ser realizada com base nos valores para o módulo e para a resistência à fadiga, através do dimensionamento de uma estrutura, o qual será apresentado no Capítulo 7. No entanto, com base nas Figuras 6.114 e 6.115, algumas observações sobre o desempenho podem ser feitas:

- para níveis de extensão de  $100 \times 10^{-6}$ , encontrados em camadas de revestimentos de rodovias bem dimensionadas, as misturas CBB20, ABB20 e CBGgB apresentaram um desempenho inferior à mistura convencional; e, a mistura *terminal blend* IBB15 e as misturas *continuous blend* CBBbB, ABBbB; CBCbB e CBBbP não apresentaram um aumento de desempenho considerável em relação à mistura de referência (BBB);
- para a extensão de  $100 \times 10^{-6}$  observa-se que a mistura CBCbP obteve o melhor desempenho;
- ainda para o nível de extensão de  $100 \times 10^{-6}$ , todas as misturas *continuous blend* (brasileiras) e a mistura *terminal blend* IBB15, e as portuguesas CBCbP e CBGgP obtiveram uma maior resistência à fadiga que a mistura convencional;
- para níveis de extensão de  $200 \times 10^{-6}$ , encontrados em camadas de revestimento de rodovias vicinais, as misturas produzidas com betume-borracha apresentam um ganho de resistência em relação à mistura de referência (BBB), à exceção das misturas CBB20, ABB20 e CBGgB;
- em geral, as misturas do tipo *continuous blend*, produzidas com o betume BC (PEN 35/50), independente do tipo de borracha empregue, obtiveram uma melhor resistência à fadiga;

- as misturas Caltrans do tipo *continuous blend* foram produzidas com a mais elevada percentagem de betume (8,0%) entre as misturas, o que justifica um melhor desempenho em relação a este critério;
- dentre as misturas brasileiras, a de melhor desempenho foi a IBBbB.

O segundo critério analisado foi a resistência à deformação permanente. A Figura 6.116 apresenta os resultados em termos de ESAL (80 kN) que gera uma rodeira de 12,7 mm nas misturas estudadas, e a Figura 6.117 mostra os resultados para uma rodeira de 20,0 mm.

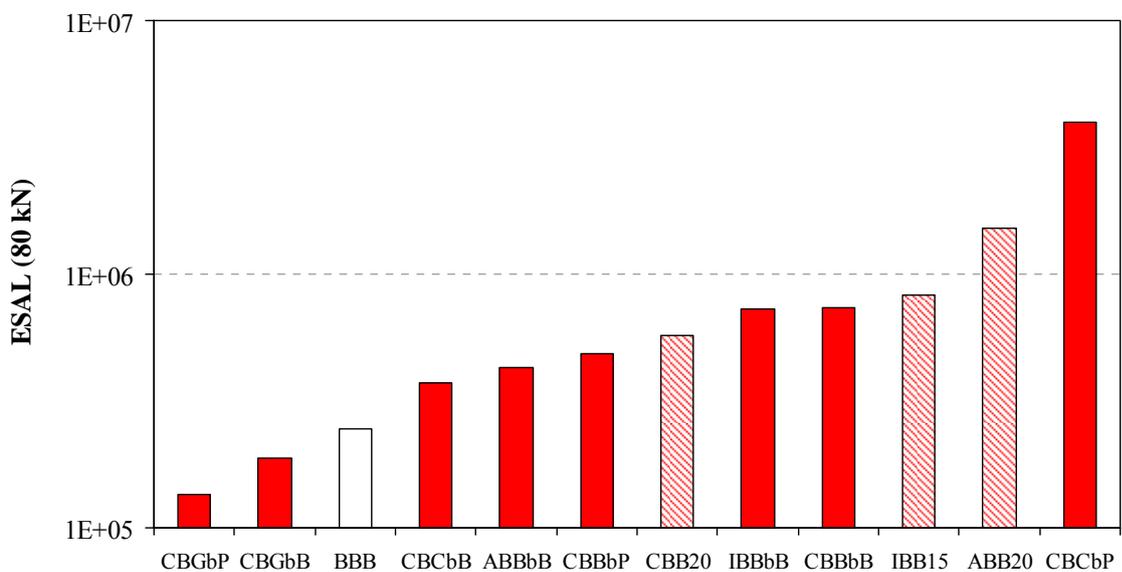


Figura 6.116 – ESAL que origina uma rodeira de 12,7 mm nas misturas estudadas

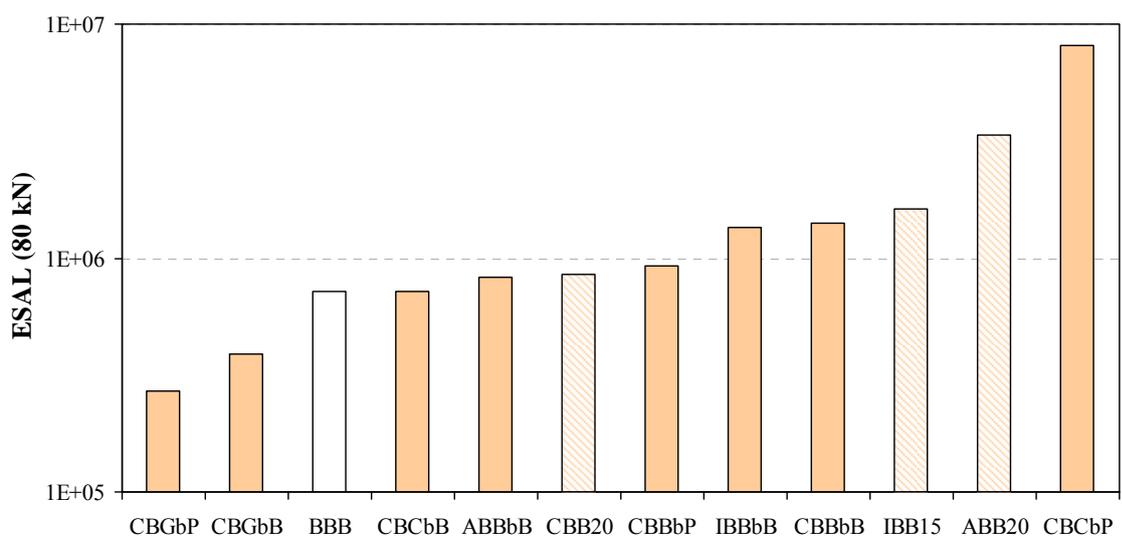


Figura 6.117 – ESAL que origina uma rodeira de 20,0 mm nas misturas estudadas

A análise das Figuras 6.116 e 6.117 permite observar que:

- as misturas Caltrans com betume-borracha tipo *continuous blend* produzido com o betume base BG (PEN 50/70), BGbP e BGbB, apresentaram uma reduzida resistência à deformação permanente em relação às demais misturas, sendo inferior à obtida para a mistura convencional (BBB);
- a mistura CBCbP apresentou a maior resistência à deformação permanente, mesmo com uma percentagem de betume elevada (8,0%). O bom desempenho da mistura CBCbP pode ser atribuído ao facto de que o betume base ser um PEN 35/50 (mais rígido), que favorece a resistência à deformação permanente;
- o mesmo desempenho porém, não foi observado na mistura CBCbB com as mesmas características, mas com o uso da borracha ambiente. Assim, a utilização de um betume rígido melhora a resistência à deformação permanente, mas no caso de betumes-borracha, este desempenho está mais associado à interacção do betume com a borracha;
- as misturas descontínuas CBCbB, ABBbB, CBB20 e CBBbP apresentaram um desempenho semelhante;
- as misturas IBBbB e CBBbB apresentaram uma resistência à deformação permanente equivalente, apesar da mistura CBBbB possuir 1% a mais de betume;
- as misturas *terminal blend* densa IBB15 e descontínua ABB20 apresentaram um bom desempenho em relação à deformação permanente;
- para as misturas *terminal blend*, observou-se que a mistura ABB20 possui maior resistência à deformação permanente quando comparada com as demais;
- a percentagem de betume não foi uma condicionante em relação ao desempenho deste critério;
- não foi possível através deste critério definir o melhor tipo de granulometria para as misturas betuminosas.

Os resultados de fadiga e de deformação permanente mostraram que a mistura de melhor desempenho foi a CBCbP, sendo que esta mistura foi produzida com um betume mais rígido que as outras (PEN 35/50). Quanto à deformação permanente, os resultados considerados aceitáveis dependem da especificação adoptada pelos órgãos rodoviários. Quanto à fadiga, para níveis de extensão de  $100 \times 10^{-6}$ , esperava-se que as misturas com betume-borracha obtivessem uma vida superior a  $10^8$ . Um desempenho superior à fadiga poderia ser obtido através de um acréscimo da percentagem de ligante na mistura.

A metodologia Marshall foi desenvolvida para misturas densas com betumes convencionais. Em relação a betumes-borracha, diversos autores (Piggott & Woodhans, 1979; Takallou *et al.*, 1986; Roberts *et al.*, 1989; Madapati *et al.*, 1996; Hicks, 2002) realizaram considerações alternativas na escolha da percentagem óptima de betume em relação à encontrada através da metodologia Marshall e, alternativamente, Way (2003) desenvolveu uma equação empírica (Equação 4.1) para determinar a percentagem de betume óptima em misturas com betume-borracha, conforme já exposto no Capítulo 4.

No entanto, um aumento na percentagem de betume poderia reflectir em uma perda de resistência à deformação permanente. Contudo, o estudo da mistura CBCbP mostrou que para misturas com betume-borracha é possível obter um bom desempenho em relação à deformação permanente mesmo com uma elevada percentagem de betume (8,0%).

Assim, sendo este um trabalho de investigação cujo objectivo é otimizar uma mistura com betume-borracha utilizando-se materiais brasileiros e com base nos critérios de decisão já discutidos, decidiu-se pela reavaliação das percentagens óptimas de betume obtidas na metodologia Marshall.

### **6.9.1. Reavaliação da formulação Marshall**

Com base nos critérios de decisão, foi possível verificar que, em misturas com betume-borracha, uma elevada percentagem de betume proporciona uma grande resistência à fadiga, sem afectar a resistência à deformação permanente, a exemplo da mistura CBCbP.

A Equação 4.1 desenvolvida por Way (2003) que leva em conta a absorção de água e a massa volúmica dos agregados para determinação da percentagem óptima de betume em misturas com betume-borracha conduziria, para o caso dos agregados estudados, a uma percentagem óptima de 9,0%.

Desta forma, objectivando a optimização de uma mistura com materiais brasileiros, que obtivesse resultados de resistência à fadiga e à deformação permanente conducentes com os encontrados na literatura, foi conduzida uma nova investigação com os seguintes objectivos:

- escolha de duas misturas piloto, uma com betume-borracha do tipo *continuous blend* e outra do tipo *terminal blend* para condução de novos ensaios;
- reavaliação dos resultados obtidos na metodologia Marshall que determinou a percentagem óptima de betume para estas misturas;
- realização de ensaios de fadiga e de deformação permanente com as duas misturas piloto, para a percentagem óptima de betume reavaliada;
- análise dos resultados e tomada de decisão.

As duas misturas escolhidas foram as *gap graded* Caltrans CBBbB e CBB20, com betume-borracha do tipo *continuous blend* e *terminal blend*, respectivamente. Durante a reavaliação das percentagens de betume óptimas através metodologia Marshall, neste estudo, foi escolhida a percentagem de + 1,0% de betume em relação à percentagem óptima obtida na metodologia Marshall para produção das misturas betuminosas.

A nomenclatura adoptada para as novas misturas foi a seguinte:

- CBBbB1: granulometria Caltrans com **Betume Brasileiro** (CAP 50/70) e **borracha Brasileira** (ambiente) mais **1%** de betume em relação à percentagem óptima;
- CBB201: granulometria Caltrans com **Betume Brasileiro** com **20%** de borracha, *terminal blend* (BB20), mais **1%** de betume em relação à percentagem óptima.

O Quadro 6.17 apresenta as percentagens óptimas, o volume de vazios e a baridade aparente das misturas formuladas na Fase 3 e das misturas piloto com 1% a mais de betume em relação à metodologia Marshall.

Quadro 6.17 – Percentagem de betume óptima e volume de vazios

Misturas	Percentagem de betume (%)	Volume de Vazios (%)	Baridade aparente (g/cm <sup>3</sup> )
CBBbB	8,0	6,0	2,21
CBBbB1	9,0	6,0	2,32
CBB20	7,5	6,0	2,29
CBB201	8,5	6,0	2,32

A Figura 6.118 mostra as curvas de fadiga obtidas nos ensaios de fadiga das misturas piloto, comparativamente às misturas originais e à mistura de referência (BBB).

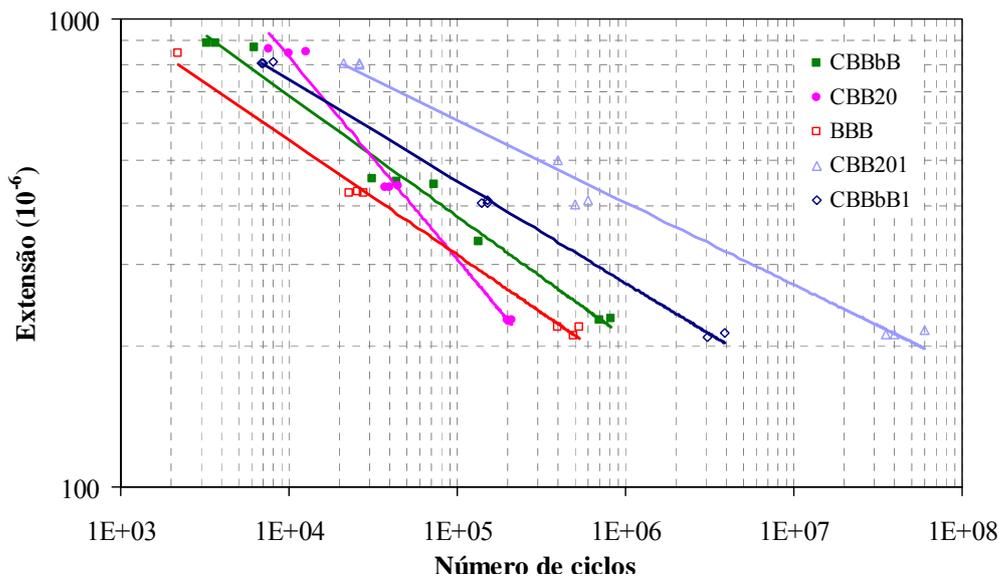


Figura 6.118 – Curvas de fadiga das misturas piloto estudadas

A análise da Figura 6.118 mostrou que um acréscimo de 1,0% de betume em relação à percentagem óptima reflectiu-se num aumento da resistência à fadiga das misturas piloto. Este facto foi mais evidente entre as misturas *terminal blend* CBB20 e CBB201. Para as novas misturas o ganho de resistência à fadiga foi significativo em relação à mistura convencional BBB.

Com base nas leis de fadiga, e por extrapolação, foi possível determinar o  $N_{100}$ , número de aplicações de carga para uma extensão de  $100 \times 10^{-6}$ . Na Figura 6.119, pode observar-se que para baixos níveis de extensão ( $100 \times 10^{-6}$ ), a mistura CBB201 apresentou maior resistência à fadiga do que a mistura CBB20 formulada pela metodologia Marshall. O mesmo ocorreu com a mistura CBBbB1, que obteve uma maior resistência à fadiga do que a mistura CBBbB. Em relação à mistura convencional o ganho de resistência mostrou-se expressivo para as duas misturas piloto.

A Figura 6.120 apresenta os resultados dos ensaios de deformação permanente, relacionando o ESAL (80kN) estimado que gera uma rodeira de 12,7 mm nas misturas piloto com percentagens +1% e as anteriormente estudadas. A comparação envolve também a mistura convencional.

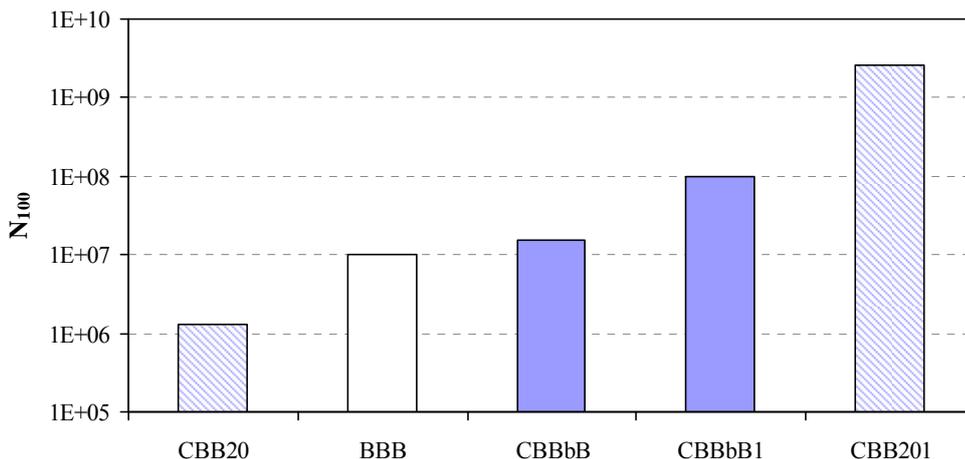


Figura 6.119 – N<sub>100</sub> para as misturas piloto

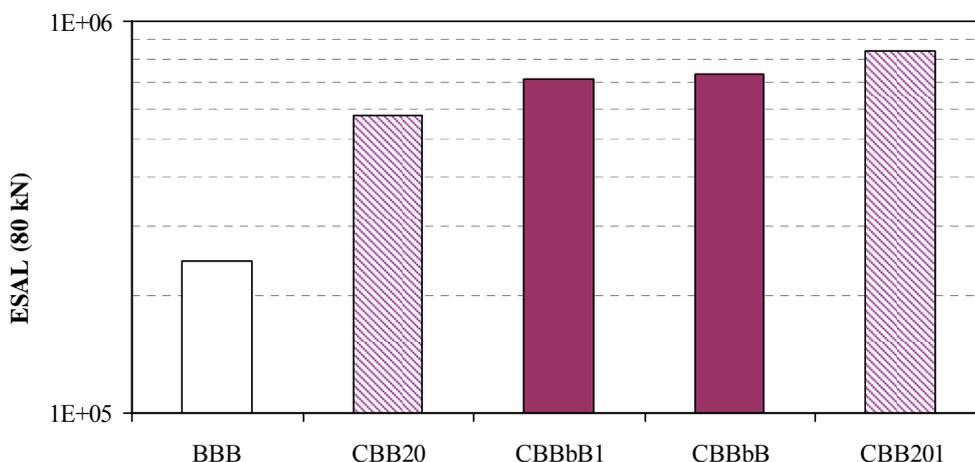


Figura 6.120 – ESAL que origina uma rodeira de 12,7 mm nas misturas piloto

Os resultados observados na Figura 6.120 mostraram que um incremento na percentagem de betume não afectou de forma significativa a resistência à deformação permanente das misturas. No caso da mistura CBB201, houve até um acréscimo desta resistência. Nas misturas *continuous blend* a resistência à deformação permanente não alterou. Neste estudo, todas as misturas apresentaram maior resistência à deformação permanente que a mistura convencional BBB.

A partir dos resultados obtidos foi verificado que um aumento na percentagem de betume levou a uma maior resistência à fadiga sem prejudicar o desempenho em relação à deformação permanente. Assim, considerando os resultados obtidos com estas misturas, foi realizada uma nova investigação (Fase 4), na qual todas as misturas com betume-borracha dos tipos *terminal blend* e *continuous blend* anteriormente estudadas (com materiais brasileiros nas granulometrias AI, Caltrans e ADOT) foram produzidas com 1,0% de betume a mais em

relação à percentagem óptima encontrada na metodologia Marshall. Os resultados obtidos estão inclusos na Fase 4 deste trabalho de investigação, intitulada “Melhoria do desempenho das misturas”, a ser apresentada no Capítulo 7.

## **6.10. ENSAIOS COMPLEMENTARES**

Para complementar o estudo dos betumes e das misturas já analisadas foram realizados ensaios adicionais, nomeadamente: (i) adesividade agregado-ligante; (ii) escorrimento; (iii) macrotextura; (iv) microtextura.

### **6.10.1. Ensaio de adesividade agregado-ligante**

A adesividade do agregado ao betume é a propriedade do agregado ser aderido pelo material betuminoso, sendo verificada pela não descolagem da película betuminosa que recobre o agregado, quando a mistura agregado/betume é imersa em água destilada a 40 °C, durante 72 horas, conforme preconiza o ensaio DNER – ME 078 (1994).

Não foram realizados ensaios de dano por humidade induzida, tendo em conta que o objectivo foi comparar a adesividade ligante/agregado para o caso do betume convencional e do betume-borracha. Apesar do ensaio utilizado ser empírico, é possível, a partir do resultado obtido, prever-se o desempenho de misturas betuminosas face à adesividade betume/agregado e também verificar o efeito da adição de aditivos melhoradores de adesividade da mistura. Neste caso em particular não se pretende avaliar a necessidade da adição de aditivos, mas sim comparar a adesividade do betume-borracha e do betume convencional ao agregado, avaliando-se a influência da adição de borracha nesta propriedade.

O ensaio de adesividade foi realizado com a mistura convencional (CAP 50/70) e também com todas as misturas com betume-borracha. O resultado deste ensaio é visual e pôde observar-se que para todos os betumes-borracha estudados neste trabalho, independente do sistema, não houve descolagem da película do ligante. No entanto, o betume convencional apresentou-se quase “lavado”, com elevada sensibilidade à presença da água, como se observa na Figura 6.121.



(a) betume convencional (5,5% de betume)

(b) betume-borracha (8,0% de betume)

Figura 6.121 – Comparação entre a adesividade agregado-ligante

Através da análise visual, está evidente que a adesividade conferida pelo betume-borracha é superior à conferida pelo betume convencional dispensando a utilização de melhoradores de adesividade.

#### 6.10.2. Ensaio de escorrimento

O escorrimento de misturas betuminosas foi determinado através do ensaio preconizado pela AASHTO T 305/97 (*Determination of Draindown Characteristics in Uncompactaded Asphalt Mixtures*), também denominado ensaio de escorrimento ou *Draindown Test*. Através deste método de ensaio é possível estabelecer a quantidade de material escorrido de uma amostra de mistura betuminosa não compactada quando a mesma é mantida a temperaturas elevadas, comparáveis com aquelas usadas durante a produção, armazenagem, transporte e espalhamento da mistura. Este ensaio deve ser realizado em misturas com betume-borracha considerando a elevada percentagem de betume que este tipo de mistura em geral apresenta.

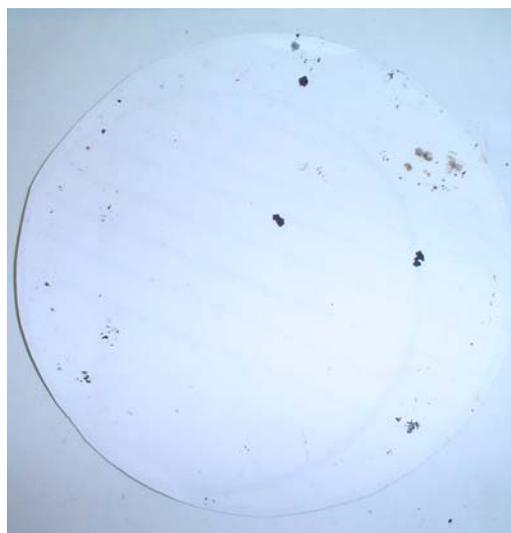
O ensaio é realizado com uma determinada quantidade de mistura betuminosa solta ( $1200 \pm 200$  g) que é colocada num cesto de arame padronizado (malha de 6,3 mm, altura de  $165 \pm 16,5$  mm e diâmetro de  $108 \pm 10,8$  mm) e posicionada sobre uma bandeja e um papel de filtro. O conjunto (amostra, cesto e bandeja) é colocado em estufa durante  $60 \pm 5$  minutos. Ao fim deste tempo, o cesto contendo a amostra e a bandeja são retirados da estufa, sendo determinada a massa do conjunto.

Para cada mistura ensaiada, as características de escorrimento foram determinadas a duas temperaturas, sendo uma a temperatura do betume na qual foi produzida a mistura e a outra a temperatura do betume mais 15 °C. Assim, foram realizados ensaios às temperaturas de 166 °C e 181 °C para a mistura convencional e de 175 °C e 190 °C para as misturas com betume-borracha. O tempo de permanência em estufa inicialmente adoptado foi de 70 minutos para todas as misturas, mas como não ocorreu escorrimento durante este tempo, a mistura foi deixada em estufa até 120 minutos.

De acordo com o Caltrans (*Section 39-3.03 Standard Specifications*, Caltrans, 2003) o escorrimento em misturas betuminosas com betume-borracha deve ser no máximo de 4,0 g. Nenhuma das misturas estudadas apresentou valor de escorrimento superior a 0,5 g. Para a norma AASHTO T 305 (1997), o valor do escorrimento deve ser expresso em percentagem. Para todas as misturas o valor do escorrimento não ultrapassou 0,033%. A Figura 6.122 ilustra, como exemplo, o ensaio de escorrimento realizado com a mistura CBB20 (7,5% de betume).



(a) cesto com mistura betuminosa



(b) papel filtro após o ensaio

Figura 6.122 – Ensaio de escorrimento para a amostra CBB20

O ensaio de escorrimento foi realizado também com a mistura de referência (percentagem de betume de 5,5%) e o resultado foi semelhante ao obtido para as misturas com betume-borracha (inferior a 0,033%). Deste modo, ainda que as misturas com betume borracha apresentem uma percentagem de betume superior em relação à mistura

convencional, a mesma não apresenta problemas relativamente ao escorrimento durante o transporte, armazenagem ou espalhamento.

### 6.10.3. Avaliação da textura

A avaliação da textura das misturas betuminosas foi realizada em laboratório sobre as lajes antes de serem obtidos os provetes para os ensaios de fadiga e de deformação permanente. Os ensaios realizados foram de macrotextura (mancha de areia e drenabilidade) e de microtextura (pêndulo britânico). A Figura 6.123 apresenta a análise visual das quatro diferentes granulometrias utilizadas neste trabalho, sendo a mistura convencional DNIT Faixa “C” (a) e as misturas com betume-borracha AI (b), ADOT (c) e Caltrans (d).



Figura 6.123 – Análise visual da superfície das placas de diferentes granulometrias

A análise visual fornece uma ideia da textura da superfície, não sendo porém, considerada uma medida quantitativa para avaliação da textura. Através desta análise foi possível verificar que as granulometrias densas contínuas (DNIT Faixa “C” e AI) apresentaram uma superfície mais fechada em relação às granulometrias descontínuas (ADOT e Caltrans). Ainda foi possível observar também que a elevada percentagem de betume das misturas com betume-borracha faz notar-se através da cor (negro mais intenso) e do aspecto “lubrificado” na superfície.

## **Macrotextura**

A macrotextura está relacionada ao atrito pneu/pavimento em altas velocidades e com a capacidade da superfície do pavimento drenar a água superficial evitando o fenómeno da aquaplanagem, a formação de *spray* e a formação do espelho nocturno. Também está relacionada com o consumo de combustível, o desgaste dos pneumáticos e ao ruído. A verificação da macrotextura foi realizada através de dois tipos de metodologias: a mancha de areia e a drenabilidade.

### ***Mancha de areia***

A avaliação da macrotextura pelo método da mancha de areia ou altura de areia seguiu a norma ASTM E 965, 1996 (*Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique*). A metodologia consiste em espalhar um volume conhecido de areia com granulometria padronizada (90% passada no peneiro de nº 60 e retida no peneiro de nº 80) com movimentos circulares, através de um dispositivo apropriado, na superfície da laje (perfeitamente limpa e seca).

Após o espalhamento da areia mede-se o diâmetro da mancha em quatro direcções com ângulo de 45°. Com o diâmetro da mancha de areia (média das quatro medidas) e o volume de areia utilizado, calcula-se a altura média dos vazios preenchidos por areia, valor este obtido como medida da macrotextura superficial. A altura média de areia é expressa de acordo com a Equação 6.6 (ASTM E-965, 1996):

$$H = \frac{V \times 4}{D^2 \times \pi} \tag{6.6}$$

onde:

H = altura média da areia (mm);

V = volume de areia padrão (mm<sup>3</sup>);

D = diâmetro médio da mancha de areia (mm).

A Figura 6.124 ilustra a sequência da condução do ensaio em laboratório sobre as lajes:

- (a) e (b) colocação da areia com volume conhecido sobre a laje;
- (c) pistão circular com fundo de borracha, com utilizado para o espalhamento da areia;
- (d) e (e) espalhamento da areia;
- (f) medição do diâmetro da mancha de areia.

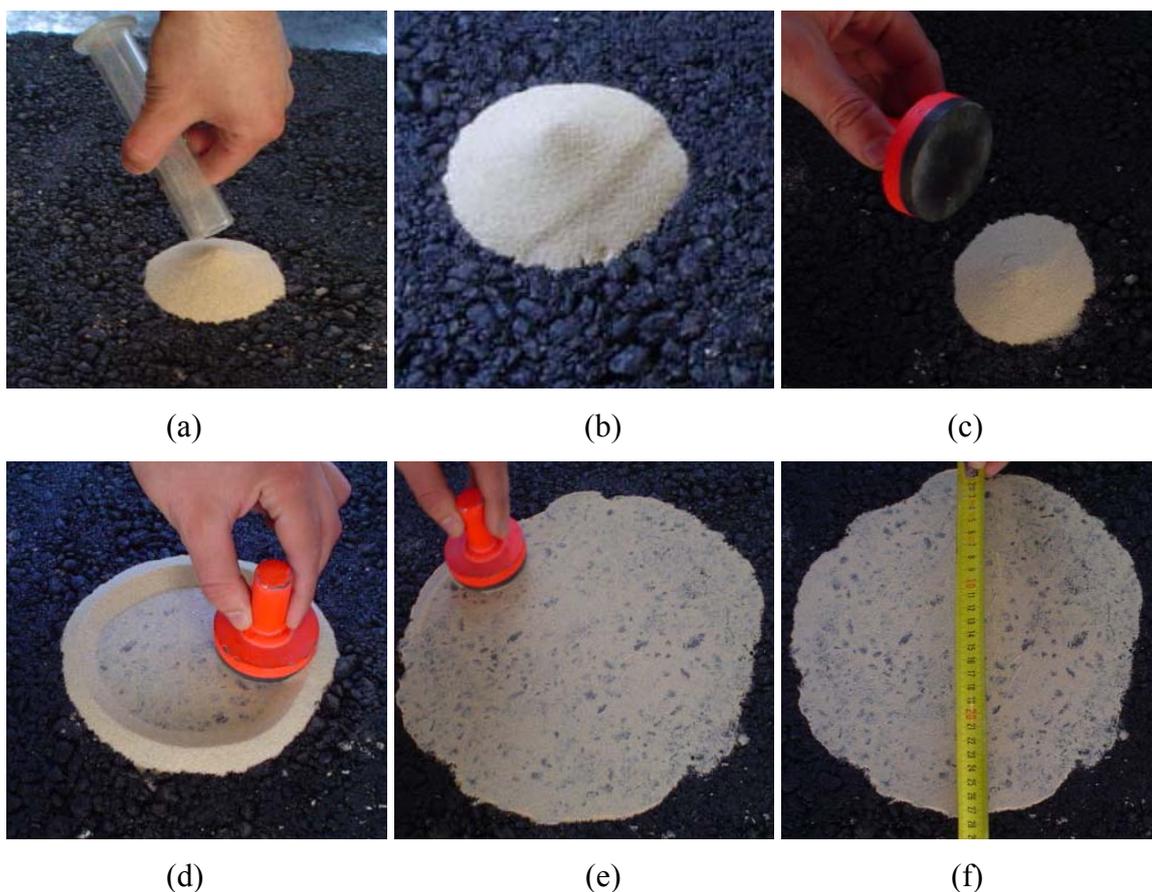


Figura 6.124 – Sequência de condução do ensaio da mancha de areia

Em relação à macrotextura dos pavimentos, o DNIT (DNIT, 2006), com base no Boletim Técnico da Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv, 1999), avalia a textura superficial

dos pavimentos, através dos resultados do ensaio da mancha de areia, de acordo com o Quadro 6.18. Os limites sugeridos pelo DNIT para a altura média são  $0,6 \text{ mm} < H < 1,2 \text{ mm}$ , como sendo, textura superficial média a grosseira.

Quadro 6.18 – Avaliação da macrotextura (DNIT, 2006)

Altura média (mm)	Textura superficial
$H < 0,20$	Muito fina ou muito fechada
$0,20 < H < 0,40$	Fina ou fechada
$0,40 < H < 0,80$	Média
$0,80 < H < 1,20$	Grosseira ou aberta
$H > 1,20$	Muito grosseira ou aberta

A Figura 6.125 apresenta os resultados de altura de areia obtidos por tipo de granulometria e de betume-borracha comparativamente com a mistura convencional.

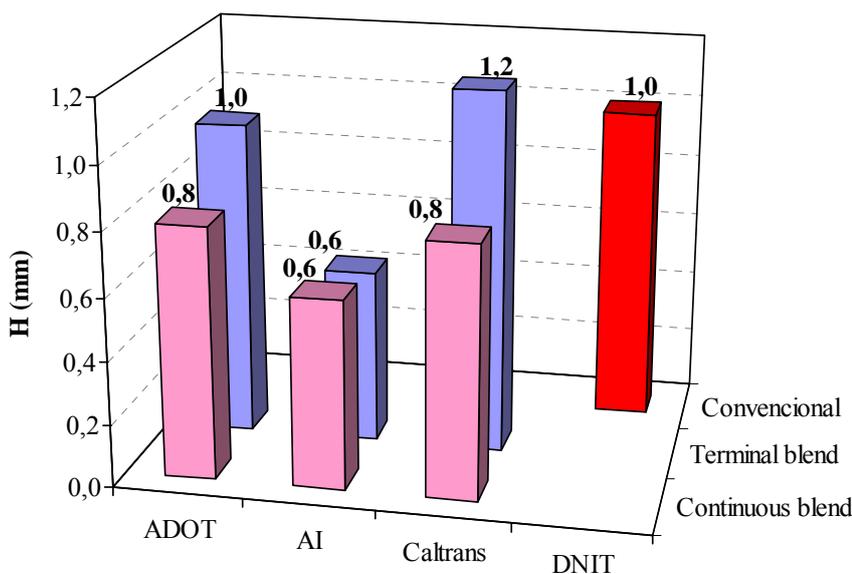


Figura 6.125 – Resultados dos ensaios de mancha de areia

Os resultados mostraram a macrotextura decrescente com o aumento da percentagem de finos da granulometria. Para as misturas com betume-borracha, de acordo com o tipo de granulometria, as misturas *terminal blend* apresentaram um valor mais elevado de macrotextura, sendo que nestas, as misturas *gap graded* apresentaram a macrotextura maior.

As misturas do tipo *terminal blend gap graded* apresentaram uma macrotextura de valor igual ou superior à mistura convencional (1,0 mm para a mistura convencional, 1,0 mm para ADOT

e 1,2 mm para Caltrans). A mistura *dense graded* AI apresentou um valor de 0,6 mm, independente do tipo de betume. Os resultados obtidos, em geral, para as misturas com betume-borracha são mais elevados que os medidos na mistura convencional, o que indicaram uma melhoria das propriedades funcionais do revestimento executado com betume-borracha. As misturas estudadas apresentaram o valor da macrotextura entre os limites sugeridos pelo DNIT.

### ***Drenabilidade***

Este ensaio é utilizado principalmente para avaliação da permeabilidade das misturas betuminosas drenantes, tendo sido realizados nesta investigação com o objectivo de comparar as misturas com granulometrias *dense graded* e *gap graded*, de acordo com a norma NF P 98 254-3 (*Mesure de Propriétés Liées à la Perméabilité des Matériaux des Mélanges Hydrocarbonés - Partie 3: Essai au Drainomètre de Chantier*).

O ensaio permite avaliar a rugosidade do pavimento através da medida da sua capacidade em drenar a água. O método de ensaio utiliza um tubo de acrílico transparente acoplado a um fundo perfurado com dimensões padrão, colado a um anel de borracha. A medida do escoamento de água foi realizado de acordo com o seguinte procedimento:

- posicionamento do equipamento sobre a superfície da laje;
- o orifício do fundo do equipamento foi mantido fechado e o tubo foi preenchido com um volume conhecido de água;
- com o tubo cheio, a abertura do furo no fundo do tubo foi liberada;
- medida do tempo (intervalo de tempo entre a passagem do menisco de água pela marca superior e inferior) que a água levou para drenar sobre a superfície.

Nesta investigação foi utilizado o permeâmetro de carga hidráulica variável que trabalha em regime transitório e permite o escoamento de um determinado volume de água entre uma determinada área do pavimento, como ilustrado na Figura 6.126.

A drenabilidade foi medida em função do volume de água escoado no tempo. A vazão de água por permeabilidade nas lajes foi negligenciada nesta investigação por tratarem-se de misturas betuminosas densas contínuas e descontínuas, para as quais a impermeabilidade é

uma das características esperadas. Apesar dos resultados obtidos não terem sido concludentes, foi possível observar que o fluxo de água entre a superfície da borracha e os canais da rugosidade foi crescente com a redução da proporção de finos da mistura, ou seja, mais rápido para as misturas com betume-borracha *gap graded*, mostrando uma concordância com os resultados do ensaio de mancha de areia.



Figura 6.126 – Permeâmetro de carga hidráulica variável utilizado no estudo

### **Microtextura**

A microtextura foi avaliada através do Pêndulo Britânico, de acordo com a norma ASTM D 303, 1993 (*Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Test*).

O ensaio consiste em friccionar, sob movimento pendular, uma sapata padronizada de borracha na superfície da laje molhada. A leitura é dada pelo deslocamento do pêndulo após o contacto com a superfície da placa molhada. Neste ensaio, a microtextura é representada pelo BPN (*British Pendulum Number*) A Figura 6.127 apresenta o equipamento utilizado.



Figura 6.127 – Pêndulo britânico utilizado no estudo

De acordo com os resultados obtidos de microtextura em BPN, o DNIT (2006), com base no Boletim Técnico da Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv, 1999), avalia as condições de aderência pneu/pavimento de acordo com o Quadro 6.19.

Quadro 6.19 – Classificação da microtextura com o pêndulo britânico DNIT (2006)

Classificação	Limites BPN
Perigosa	< 25
Muito lisa	25 a 31
Lisa	32 a 39
Insuficientemente rugosa	40 a 46
Medianamente rugosa	47 a 54
Rugosa	55 a 75
Muito rugosa	> 75

A Figura 6.128 resume os resultados obtidos para as misturas estudadas. As medidas de microtextura indicaram que as misturas com betume-borracha (classificação muito rugosa) possuem características funcionais melhores que a mistura convencional (classificação rugosa) e que a presença da borracha contribui para o aumento da microtextura, traduzida pela elevação no valor no BPN.

Em relação ao tipo de betume, as misturas *continuous blend* apresentaram uma microtextura ligeiramente superior em relação às misturas *terminal blend* no caso das *gap graded*. Isto pode ser explicado pela maior quantidade de borracha incorporada. No caso da mistura *dense graded AI*, a situação inverte-se, apesar do betume-borracha BB15 possuir 15% de borracha.

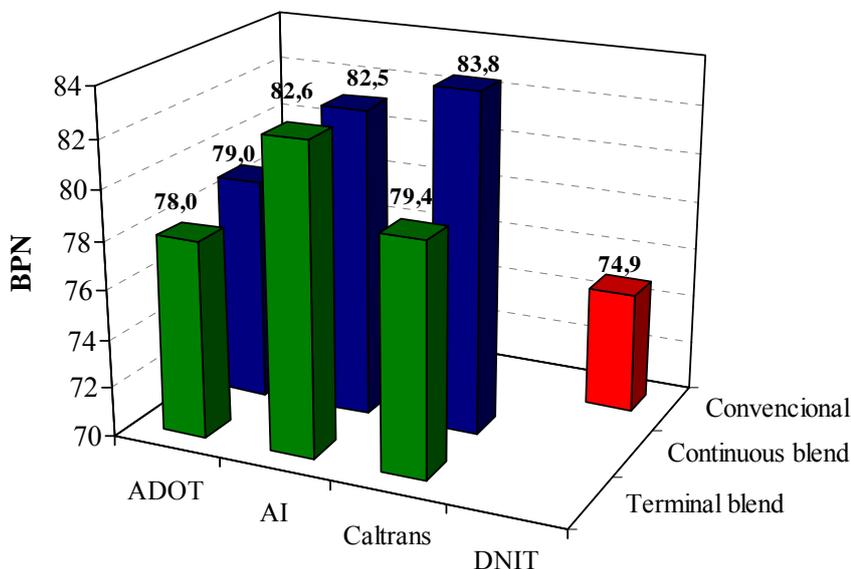


Figura 6.128 – Microtextura das misturas estudadas

Tendo em conta que as medidas de microtextura são influenciadas pelas asperezas superficiais dos agregados e também pelo grau de polimento dado pela acção do tráfego, em camadas betuminosas novas ou em ensaios sobre lajes conduzidos em laboratório, onde não existe a exposição dos agregados na superfície, estes valores são influenciados pela presença do filme de ligante que recobre a superfície da laje.

### Índice de Atrito Internacional

O Índice de Atrito (Fricção) Internacional (IFI<sup>3</sup>) é uma escala de referência baseada no modelo do PIARC<sup>4</sup> (1995), que relaciona o atrito com a velocidade de deslizamento e pode estimar a constante de referência de velocidade (Sp) e o atrito a 60 km/h (F<sub>60</sub>) de um pavimento. O par de valores, Sp e F<sub>60</sub>, expressam o IFI de um pavimento e permitem calcular o valor do atrito F(S), a qualquer velocidade de deslizamento. O IFI é calculado através da norma ASTM E 1660 (1998), *Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface*.

<sup>3</sup> IFI – International Friction Index.

<sup>4</sup> PIARC – Permanent International Association of Road Congress, actualmente denominada de World Road Association.

Para se obter o valor do IFI é necessário realizar, com qualquer equipamento ou técnica homologada a partir de critérios estabelecidos no experimento internacional, dois tipos de medidas sobre o pavimento, uma de atrito (FRS) e outra de textura (Tx). Nesta investigação, a medida do atrito FRS foi realizada com o pêndulo britânico e a medida da textura, com a mancha de areia. Os dois equipamentos e técnicas fazem parte do PIARC.

Com o valor obtido da textura, por meio de ensaio mancha de areia, calculou-se a constante de velocidade (Sp), com a Equação 6.7:

$$Sp = a + b \times Tx \quad (6.7)$$

onde:

Sp = constante de velocidade (km/h);

a e b = constantes determinadas no experimento do PIARC;

Tx = macrotextura (mm).

Para o ensaio de mancha de areia, os valores das constantes a e b são os seguintes:

- a = -11,6;
- b = 113,6.

Com o valor obtido de atrito (FRS), por meio do pêndulo britânico, procedeu-se o cálculo de (FR60), que é uma constante referente à velocidade de deslizamento de 60 km/h, obtida pela Equação 6.8:

$$FR60 = FRS \left( \frac{S-60}{Sp} \right) \quad (6.8)$$

onde:

FR60 = valor do atrito FRS à velocidade de 60 km/h;

FRS = medida do atrito (microtextura) com o pêndulo britânico (BPN)

S = velocidade, tabelada pelo experimento para o equipamento escolhido (km/h);

Sp = constante de velocidade, calculada através da Equação 6.7 (km/h).

Finalmente, estimou-se o atrito harmonizado de referência (F60), através da Equação 6.9, onde A, B e C são constantes de regressão, que para o pêndulo britânico os valores de S, A, B e C são os seguintes:

- S = 10;
- A = 0,008;
- B = 0,056;
- C = 0.

$$F60 = A + B \times FR60 + C \times Tx \quad (6.9)$$

onde:

F60 = atrito a 60 km/h;

A, B, C = constantes de regressão determinadas no experimento internacional;

FR60 = valor do atrito FRS à velocidade de 60 km/h;

Tx = macrotextura (mm).

Os pares de valores (F60, Sp) designam-se como sendo o IFI de um pavimento. Seu conhecimento permite traçar a curva de referência estimada de atrito *versus* velocidade de deslizamento, para qualquer velocidade (F(S)) através da Equação 6.10.

$$F(S) = F60 \times e^{\left(\frac{60-S}{Sp}\right)} \quad (6.10)$$

onde:

F(S) = valor do atrito a qualquer velocidade de deslizamento;

F60 = atrito a 60 km/h;

S = velocidade escolhida (km/h);

Sp = constante de velocidade, calculada através da Equação 6.7 (km/h).

O Quadro 6.20 apresenta as faixas limites do IFI (F60), de acordo com Aps (2006).

Quadro 6.20 – Faixas limites dos valores do IFI (F60), (Aps, 2006)

Classificação	IFI
Péssimo	< 0,05
Muito ruim	0,06 a 0,08
Ruim	0,09 a 0,11
Regular	0,12 a 0,14

O Quadro 6.21 apresenta os valores obtidos do IFI para as misturas estudadas na Fase 3.

Quadro 6.21 – Valores do IFI

Misturas	Tx (mm) (mancha)	Classificação <sup>(i)</sup>	FRS (BPN) (pêndulo)	Classificação*	IFI	
					Sp	F <sub>60</sub>
ABB20	1,0	Grossa	78,0	Muito rugosa	102,0	0,44
ABBbB	0,8	Grossa	79,0	Muito rugosa	79,3	0,39
IBB15	0,6	Média	82,6	Muito rugosa	50,9	0,30
IBBbB	0,6	Média	82,5	Muito rugosa	56,6	0,33
CBB20	1,2	Muito grossa	79,4	Muito rugosa	119,0	0,47
CBBbB	0,8	Grossa	83,8	Muito rugosa	79,3	0,41
BBB	1,0	Grossa	74,9	Rugosa	102,0	0,42

Observação referente ao Quadro 6.21:

(i) DNIT (2006) e ABPv (1999).

A partir do IFI pode representar-se as curvas de referência de cada mistura betuminosa, a qualquer velocidade de deslizamento, como se apresenta na Figura 6.129.

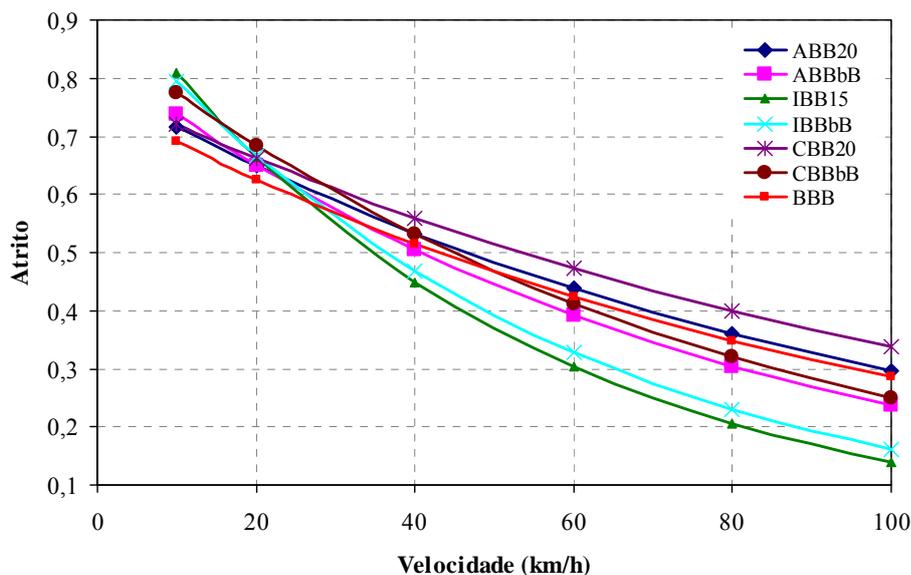


Figura 6.129 – Curvas de referência das misturas

De acordo com a Figura 6.129, as misturas *gap graded* com betume-borracha *terminal blend* possuem um atrito mais elevado a elevadas velocidades do que as misturas *gap graded* com betume-borracha *continuous blend*. Em geral, as misturas *dense graded* com betume-borracha apresentaram menor atrito do que a mistura *dense graded* com betume convencional. Na avaliação dos resultados obtidos para as misturas com betume-borracha devem ser considerados ainda os seguintes aspectos: (i) a mais elevada percentagem de betume das misturas com betume-borracha resulta em uma película mais espessa revestindo os agregados; (ii) os ensaios foram realizados sobre as lajes produzidas em laboratório, nas quais o processo de compactação adoptado não favoreceu a avaliação do atrito; (iii) a avaliação do atrito em campo, em geral, é realizada após um determinado tempo após a passagem do tráfego.

## 6.11. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 6

A optimização do betume-borracha para produção do betume *continuous blend* em laboratório, Fase 2 da investigação, consistiu na variação dos parâmetros percentagem de borracha (16, 17 e 20%) e tempo de digestão (45, 60 e 90 minutos) para a temperatura de mistura (180 °C). Numa primeira fase, para definição das variáveis do betume-borracha optimizado, foram produzidos nove betumes-borracha e avaliados através de ensaios de caracterização. Posteriormente, para a percentagem de borracha de 19% foi avaliada a viscosidade aparente em função do tempo de digestão (60 a 120 minutos) e também foi realizada a análise microscópica por varrimento electrónico de todos os betumes-borracha seleccionados na optimização. Como resultado, o betume-borracha optimizado em laboratório apresentou as seguintes variáveis: (i) percentagem de borracha de 17%; (ii) tempo de digestão de 90 minutos; (iii) temperatura de digestão de 180 °C.

Na Fase 3 deste trabalho foram produzidas misturas betuminosas com betume-borracha dos tipos *terminal blend* e *continuous blend* utilizando as granulometrias *gap graded* (Caltrans e ADOT) e *dense graded* (AI), além da mistura densa utilizando betume convencional e granulometria DNIT Faixa “C”.

As sete misturas betuminosas produzidas foram avaliadas através dos seguintes ensaios de desempenho:

- módulo dinâmico e fadiga utilizando o ensaio de flexão alternada em 4 pontos, sendo que os ensaios de módulo dinâmico foram realizados a 3 temperaturas (15, 20 e 25 °C) e a 7 frequências (10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2 e 0,1 Hz), de acordo com o preconizado na norma ASTM 3497 (1995). Os ensaios de fadiga foram realizados de acordo com a norma AASHTO TP8 (1994), no qual provetes prismáticos, simplesmente apoiados nas extremidades foram submetidos a um carregamento sinusoidal alternado em extensão controlada. No ensaio foram realizadas 3 repetições para cada um dos níveis de extensões seleccionados (200, 400 e 800  $\mu\text{m/m}$ ), à temperatura de 20 °C e frequência de 10 Hz. Como resultado, foram obtidas as curvas de fadiga;
- deformação permanente avaliada através do ensaio de corte simples a altura constante (RSST-CH), padronizado pela norma AASHTO TP7-01. Este ensaio foi realizado sobre provetes cilíndricos, aplicando-se, repetidamente, um esforço de corte de 700 kPa durante 0,6 s seguido de um período de repouso de 0,1 s. Os resultados foram expressos em termos de ESAL (eixos simples de 80 kN) que geram uma rodeira de 12,7 mm nas misturas, que também foram estimados para a profundidade de 20,0 mm.

Como os resultados obtidos nos ensaios não obtiveram o desempenho esperado em relação à resistência à fadiga, e com o objectivo de avaliar o desempenho dos materiais brasileiros (betume CAP 50/70 e borracha ambiente), foram produzidas misturas betuminosas com a granulometria do Caltrans, utilizando materiais portugueses (betumes PEN 50/70 e PEN 35/50 e borracha criogénica). Os novos betumes-borracha produzidos foram avaliados através de ensaios de caracterização, sendo também realizada a análise de microscopia por varrimento electrónica e avaliadas as propriedades reológicas e de envelhecimento através do ensaio RTFOT.

Nesta fase do estudo, os resultados de fadiga e de deformação permanente mostraram que a mistura de melhor desempenho foi a produzida com um betume mais rígido (PEN 35/50). Quanto à deformação permanente, os resultados considerados aceitáveis dependem da especificação adoptada pelos órgãos rodoviários. Quanto à fadiga, para níveis de extensão de  $100 \times 10^{-6}$ , esperava-se que as misturas com betume-borracha obtivessem uma vida superior a  $10^8$ .

Com o objectivo de aumentar a resistência à fadiga foram aumentadas as percentagens de betume das misturas com betume-borracha formuladas através da metodologia Marshall e

também foi utilizada a equação desenvolvida por Way (2003) para misturas com betume-borracha, para a qual as percentagens obtidas são superiores às determinadas através da metodologia Marshall.

Com base na análise anterior foram produzidas misturas piloto empregando-se 1% de betume a mais do que o obtido através da metodologia Marshall a fim de verificar se efectivamente ocorreria um aumento de resistência à fadiga e também quanto este incremento de percentagem de betume se reproduziria no desempenho à deformação permanente. A partir dos resultados obtidos foi verificado que um aumento na percentagem de betume levou a uma maior resistência à fadiga sem prejudicar o desempenho em relação à deformação permanente. Neste contexto, optou-se pela produção de novas misturas betuminosas com betume-borracha de modo a verificar a efectiva melhoria do desempenho.

Adicionalmente foram realizados ensaios complementares, sobre as lajes produzidas em laboratório, como macrotextura e microtextura para determinação do Índice de Atrito Internacional e também ensaios de escorrimento e drenabilidade. Os resultados mostraram a macrotextura decrescente com o aumento da percentagem de finos da granulometria. Para as misturas com betume-borracha, de acordo com o tipo de granulometria, as misturas *terminal blend* apresentaram um valor mais elevado de macrotextura, sendo que nestas, as misturas *gap graded* apresentaram a macrotextura maior.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO PP3, 1994. Standard Specimens by Means of the Rolling Wheel Compactor Practice for Preparing Hot-Mix Asphalt (HMA), USA.

AASHTO T 305, 1997. Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures, USA.

AASHTO TP8, 1994. (Reapproved 1996, Reconfirmed in 2001). Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending). Standard based on SHRP Product 1019. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C., USA.

AASHTO TP-01, 2001. Standard Test Method for Determining Permanent Shear Strain and Stiffness of Asphalt Mixtures Using the Superpave Shear Tests (SST). American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C., USA.

ABPv, 1999. Informativo Técnico sobre Avaliação da Resistência à Derrapagem através de Aparelhagem Portátil. Boletim Técnico. Associação Brasileira de Pavimentação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

AI, 1989. The Asphalt Handbook, Manual Series nº 4 (MS-4). Asphalt Institute 1989 Edition, Kentucky, USA.

ADOT, 2005<sub>A</sub>. Arizona Department of Transportation (ADOT) Construction Manual, Section 1009 (Rubber Material). Arizona, USA.

ADOT, 2005<sub>B</sub>. Arizona Department of Transportation (ADOT) Construction Manual, Section 414 ARAC (Asphalt Rubber Asphaltic Concrete). Arizona, USA.

Antunes, M.L.; Baptista, F.; Eusébio; M.I.; Costa, M.S.; Miranda, C.V., 2000. Characterization of Asphalt Rubber Mixtures for Pavement Rehabilitation Projects in Portugal. Asphalt Rubber 2000, Proceedings. Vilamoura, Portugal.

Aps, M., 2006. Classificação da Aderência Pneu-Pavimento pelo Índice Combinado IFI – International Friction Index para Revestimentos Asfálticos. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, SP, Brasil.

ASTM, 1996. Annual Book of ASTM Standards. Section 4: Construction. Vol. 04.3. Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken.

ASTM D 5, 1997. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM D 8, 2001. Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM D 36, 1995. Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM D 6114, 1997. Standard Specifications for Asphalt Rubber, 1997. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM E 303, 1993. Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM E 965, 1996. Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

ASTM E 1960, 1998. Standard Practice for calculating International Friction Index of a Pavement Surface. West Conshohocken: ASTM Standards, USA.

Caltrans, 1999. California Test 304. Method of Preparation of Bituminous Mixtures for Testing State of California— Business, Transportation and Housing Agency Department of Transportation Engineering Service Center. Transportation Laboratory. Sacramento, California, USA.

Caltrans, 2003. Standard Special Provisions. State of California Department of Transportation, Sacramento, California, USA.

Coetzee, N.F. & Monismith, C.L., 1979. Analytical Study of Minimization of Reflection Cracking in Asphalt Concrete Overlays by Use of a Rubber-Asphalt Interlayer. Transportation Research Record 700, TRB, p.100-108, Washington, D.C., USA.

Daly, W.H. & Negulescu, I.I., 1997. Characterization of Asphalt Cements Modified with Crumb Rubber from Discarded Tires. Transportation Research Record 1583, TRB, p.37-44. Washington, D.C., USA.

Dantas Neto, S.A., 2004. Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, DF, Brasil.

DNER, 1995. EM 204 (Especificação de Material. Cimentos Asfálticos de Petróleo). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, Brasil.  
Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)

DNIT, 2006. ES 031 (Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço). Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa/IPR. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.  
Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)

DNIT, 2006. EM 095 (Cimentos Asfálticos de Petróleo – Especificação de Material). Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa/IPR. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.  
Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)

DNIT, 2006. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, 2ª Edição. Ministério dos Transportes – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação IPR 720. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)

Gallego, J.; Tomás, R.; Nosetti, R.A.; Daguerre, L.; Bianchetto, H.D., 2000. Laboratory Performance of Several Spanish Asphalt Paving Mixes Produced with Asphalt-Rubber. Asphalt Rubber 2000 – Proceedings. Vilamoura, Portugal.

Greenbook, 2000. Standard Specifications for Public Works Construction, 2000 Edition. Public Works Standards, Inc. Anaheim, California, USA.

Heitzman, M., 1992. Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber. Transportation Research Record nº 1339, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.

Hicks, R.G., 2002. Asphalt Rubber Design and Construction Guidelines, Volume I – Design Guidelines. Northern California Rubberized Asphalt Concrete Technology Center (NCRCTC) and California Integrated Waste Management Board (CIWMB). Sacramento, California, USA.

Leite, L.F.M., 1999. Estudos de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímero. Tese Doutorado. COPPE/UFRJ (Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro). Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Madapati, R.R.; Lee, K.W.; Manning, F.J.; Franco, C.A., 1996. Feasibility of Crumb Rubber Use for Asphalt Pavement Construction. Transportation Research Record. Washington, D.C., USA.

Morilha Jr., A., 2004. Estudo sobre a Ação de Modificadores no Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos e nas Propriedades Mecânicas e de Fadiga das Misturas Asfálticas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, SC, Brasil.

NF P98-254-3, 1993. Essais Relatifs aux Chaussées - Mesure de Propriétés Liées à la Perméabilité des Matériaux des Mélanges Hydrocarbonés - Partie 3 : Essai au Drainomètre de Chantier.

- PIARC, 1995. International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements, PIARC Publication 01.04.T, Permanent International Association of Road Congresses, Paris, France.
- Piggott, M.R. & Woodhams, R.T., 1979. Recycling of Rubber Tires in Asphalt Paving Materials. Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, University of Toronto, Toronto, Canada.
- Roberts, F.L.; Kandhal, P.S.; Brown, E.R.; Dunning, R.L., 1989. Investigation and Evaluation of Ground Tire Rubber in Hot Mix Asphalt. National Center for Asphalt Technology n° 89-3. Auburn, Alabama, USA.
- Ruth, B.E.; Tia, M.; Jonsson, G.; Setze, J.C., 1997. Recycling of Asphalt Mixtures Containing Crumb Rubber. Final Report. FL/DOT/MO D510717. University of Florida. Florida Department of Transportation, USA.
- Shatnawi, S. & Long, B., 2000. Performance of Asphalt Rubber as Thin Overlays. Asphalt Rubber 2000, Proceedings. Vilamoura, Portugal.
- Shatnawi, S. & Holleran, G., 2003. Asphalt Rubber Maintenance Treatments in California. Asphalt Rubber 2000, Proceedings. Brasília, Brazil.
- Sousa, J.B.; Fonseca, P.; Freire, A.; Pais, J.C., 1999. Comparação da Vida à Fadiga e Deformação Permanente entre Misturas com Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus Convencionais. Relatório Consulpav EST 99-07. Portugal.
- Takallou, A.B.; Hicks, R.G.; Esch, D.C., 1986. Effect of Mix Ingredients on the Behaviour of Rubber-Modified Asphalt Mixtures. Transportation Research Board, TRR 1096, Washington, D.C., USA.
- Visser, A.T. & Verhaeghe, M.B., 2000. Bitumen Rubber: Lessons Learned in South Africa. Asphalt Rubber 2000, Proceedings. Vilamoura, Portugal.

Way, G.B., 2003. OGFC Meets CRM: Where the Rubber Meets the Rubber: 15 Years of Durable Success. Asphalt Rubber 2003, Proceedings. Brasília, Brazil.

## Capítulo 7

### MELHORIA DO DESEMPENHO DAS MISTURAS

#### 7.1. INTRODUÇÃO

Na Fase 3 deste trabalho foram produzidas misturas betuminosas com betume-borracha dos tipos *terminal blend* e *continuous blend* utilizando as granulometrias *gap graded* (Caltrans e ADOT) e *dense graded* (AI), além da mistura densa utilizando betume convencional, com a granulometria DNIT Faixa “C”, de vasta aplicação em camadas de desgaste de pavimentos brasileiros.

Os resultados obtidos nos ensaios de desempenho mostraram que algumas misturas não obtiveram um desempenho satisfatório em relação à resistência à fadiga, considerando que o desempenho foi semelhante ao de uma mistura convencional. Relativamente à deformação permanente, os resultados foram satisfatórios comparativamente ao desempenho deste tipo de misturas de acordo com a literatura (Sousa *et al.*, 1999; Mohammad *et al.*, 2000; Bennert *et al.*, 2004; Dantas Neto, 2004).

Com o objectivo de avaliar o desempenho e a qualidade dos materiais brasileiros (betume CAP 50/70 e borracha ambiente) que serviram de base para a produção dos betumes-borracha *terminal blend* e *continuous blend* empregues na investigação, foram produzidas misturas betuminosas com a granulometria Caltrans, utilizando materiais portugueses de uso corrente em misturas com betume-borracha portuguesas, nomeadamente os betumes PEN 50/70 e PEN 35/50 e a borracha criogénica.

Tendo em conta o aumento observado na resistência à fadiga para a mistura CBCbP (percentagem de betume de 8%), foi considerada a hipótese de se elevar a percentagem de betume das demais misturas com betume-borracha através do aumento das percentagens de betume óptimas obtidas através da metodologia Marshall. Além desta consideração, também foi utilizada a Equação 4.1, desenvolvida por Way (2003), para determinação da percentagem óptima de betume de misturas com betume-borracha, para a qual as percentagens obtidas foram sensivelmente superiores às determinadas através da metodologia Marshall.

Com o objectivo de validar a hipótese considerada, foram produzidas misturas piloto (Capítulo 6) empregando-se 1% de betume a mais do que o obtido através da metodologia Marshall a fim de verificar se efectivamente ocorreria um aumento de resistência à fadiga e também o quanto este incremento de percentagem de betume se reproduziria no desempenho à deformação permanente. Os resultados mostraram que seria possível aumentar a percentagem de betume, com a qual o ganho de resistência à fadiga seria efectivo, sem detrimento da resistência à deformação permanente.

Assim, na Fase 4 deste trabalho, cuja sequência experimental está apresentada na Figura 5.1 (d), foram produzidas misturas com betume-borracha que foram avaliadas na Fase 3, porém agora com mais 1% de betume em relação à percentagem óptima. Para além destas misturas, foram produzidas também misturas com a granulometria AI, utilizando betume-borracha do tipo *continuous blend* com betume base PEN 35/50 e borrachas ambiente e criogénica com o objectivo de avaliar o desempenho desta granulometria com betume base mais rígido.

Após a produção das misturas foram realizados os ensaios mecânicos de desempenho e conduzida a análise dos resultados. A partir dos critérios de decisão adoptados foram seleccionadas as misturas de melhor desempenho.

Tendo em conta que os resultados obtidos no ensaio RSST-CH representam valores de rodéiras que provavelmente não serão atingidas em pavimentos em serviço com a espessura habitualmente adoptada para misturas com betume-borracha, as misturas seleccionadas foram também submetidas ao ensaio de deformação permanente através do simulador de tráfego *Wheel Tracking*.

Finalmente, de modo a complementar a análise dos resultados dos ensaios mecânicos, foi realizado o dimensionamento de um pavimento utilizando como camada de desgaste as misturas seleccionadas e a mistura de referência (BBB).

## 7.2. CARACTERIZAÇÃO DAS NOVAS MISTURAS

### 7.2.1. Misturas com betume-borracha *terminal blend*

A terminologia adoptada para as misturas produzidas com estes betumes foi a mesma da Fase 3 mais o numeral 1 para identificar o incremento na percentagem de betume (1%), de acordo com o seguinte:

- CBB201: mistura com granulometria *gap graded* Caltrans, **Betume Brasileiro** do tipo *terminal blend* com **20%** de borracha com mais **1%** de betume em relação à percentagem óptima;
- ABB201: mistura com granulometria *gap graded* ADOT, **Betume Brasileiro** do tipo *terminal blend* com **20%** de borracha com mais **1%** de betume em relação à percentagem óptima;
- IBB151: mistura com granulometria *dense graded* AI, **Betume Brasileiro** do tipo *terminal blend* com **15%** de borracha com mais **1%** de betume em relação à percentagem óptima.

O Quadro 7.1 apresenta as novas percentagens de betume das misturas com betume *terminal blend* produzidas, sendo que os parâmetros volumétricos (baridade aparente, vazios e saturação em betume) destas novas misturas foram os obtidos pela metodologia Marshall.

Quadro 7.1 – Percentagem de betume das misturas com betume *terminal blend*

Mistura	Betume-borracha	Percentagem óptima de betume + 1% (%)
ABB201	BB20	8,5
CBB201	BB20	8,5
IBB151	BB15	7,0

Os procedimentos adoptados para produção das misturas e para obtenção dos provetes para os ensaios de desempenho foram idênticos aos utilizados para todas as misturas estudadas na Fase 3.

### 7.2.2. Misturas com betume-borracha *continuous blend*

O betume-borracha do tipo *continuous blend* utilizado para a produção das misturas betuminosas foi otimizado na Fase 2 (BBbB), com materiais brasileiros (betume CAP 50/70 e borracha ambiente) e possui as seguintes características: (i) 17% de borracha; (ii) tempo de digestão de 90 minutos; (iii) temperatura de digestão de 180 °C.

Paralelamente foram produzidas misturas *dense graded AI* com o betume-borracha *continuous blend*, utilizando como base o betume PEN 35/50, com as borrachas ambiente e criogénica. Estes betumes-borracha foram produzidos na Fase 3 e possuem a seguinte terminologia: (i) BCbB (PEN 35/50 + borracha ambiente); (ii) BCbP (PEN 35/50 + borracha criogénica).

As misturas *Asphalt Institute* com betume *continuous blend* BCbB e BCbP foram produzidas de forma idêntica à mistura IBBbB da Fase 3 (7,0% de percentagem de betume óptima e 5,0% de volume de vazios). Isto porque, neste caso, planeia-se avaliar a influência da granulometria e a utilização de um betume mais rígido para posterior comparação com todas as misturas estudadas.

A terminologia adoptada para as misturas produzidas com o betume-borracha *continuous blend* BBbB foi a mesma da Fase 3 mais o numeral 1 para identificar o incremento da percentagem de betume (1%), de acordo com o seguinte:

- CBBbB1: mistura com granulometria *gap graded* Caltrans, **Betume Brasileiro** e **borracha Brasileira** do tipo *continuous blend* (BBbB) com mais **1%** de betume em relação à percentagem óptima;
- ABBbB1: mistura com granulometria *gap graded* ADOT, **Betume Brasileiro** e **borracha Brasileira** do tipo *continuous blend* (BBbB) com mais **1%** de betume em relação em relação à percentagem óptima;
- IBBbB1: mistura com granulometria *dense graded AI*, **Betume Brasileiro** e **borracha Brasileira** do tipo *continuous blend* (BBbB) com mais **1%** de betume em relação em relação à percentagem óptima.

O Quadro 7.2 apresenta as novas percentagens de betume das misturas com betume *continuous blend* produzidas, mantendo-se os parâmetros volumétricos da metodologia Marshall.

Quadro 7.2 – Percentagem de betume das misturas com betume *continuous blend*

Mistura	Betume-borracha	Percentagem óptima de betume + 1% (%)
ABbbB1	BbbB	8,5
IBbbB1	BbbB	8,0
CBBbB1	BbbB	9,0

Para as misturas com granulometria AI e betume-borracha *continuous blend* (BCbP e BCbB), caracterizadas por uma percentagem de betume de 7% e índice de vazios de 5%, foi adoptada a seguinte nomenclatura:

- IBCbB: mistura com granulometria *dense graded* AI, betume PEN 35/50 e borracha ambiente;
- IBCbP: mistura com granulometria *dense graded* AI, betume PEN 35/50 e borracha criogénica.

### 7.3. ENSAIOS MECÂNICOS DE DESEMPENHO

#### 7.3.1. Módulo dinâmico e ângulo de fase

O ensaio para determinação do módulo dinâmico e do ângulo de fase foi realizado de acordo com a ASTM 3497 (1995), realizados a sete frequências: 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2 e 0,1 Hz e a três temperaturas: 15, 20 e 25 °C. O módulo dinâmico e o ângulo de fase função da temperatura e da frequência das misturas são apresentados nas Figuras 7.1 a 7.6 para cada temperatura ensaiada em função das frequências aplicadas.

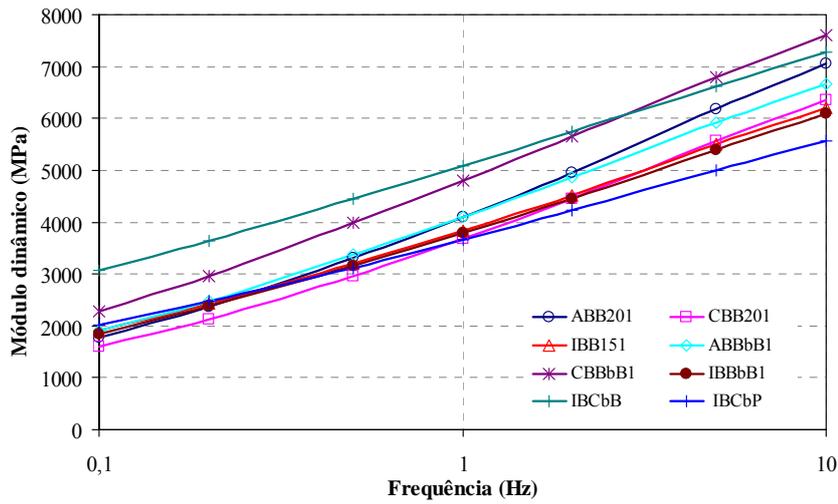


Figura 7.1 – Módulo dinâmico das misturas nas frequências aplicadas à temperatura de 15 °C

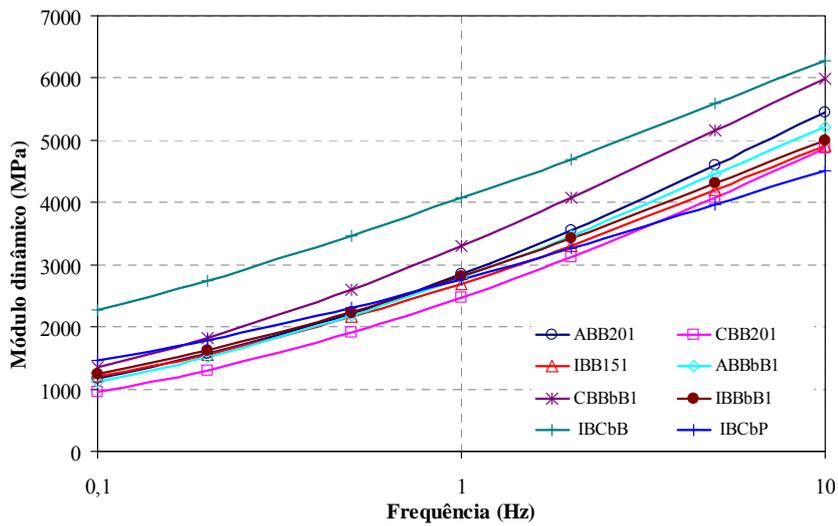


Figura 7.2 – Módulo dinâmico das misturas nas frequências aplicadas à temperatura de 20 °C

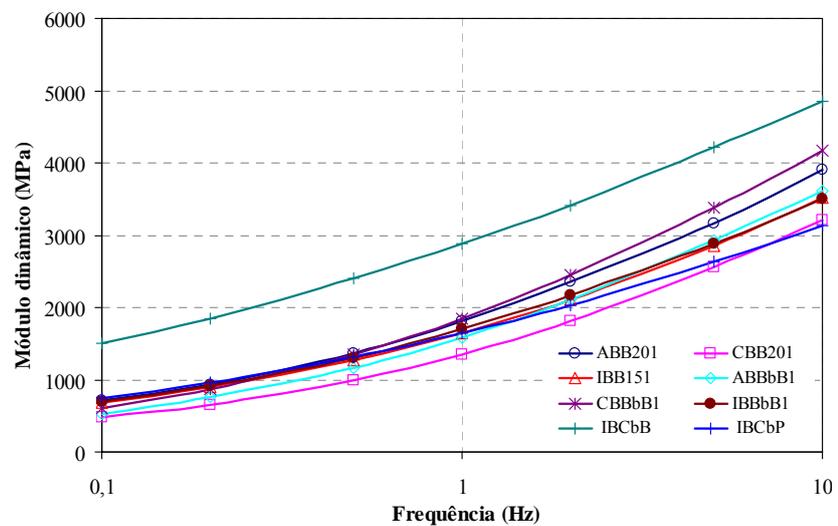


Figura 7.3 – Módulo dinâmico das misturas nas frequências aplicadas à temperatura de 25 °C

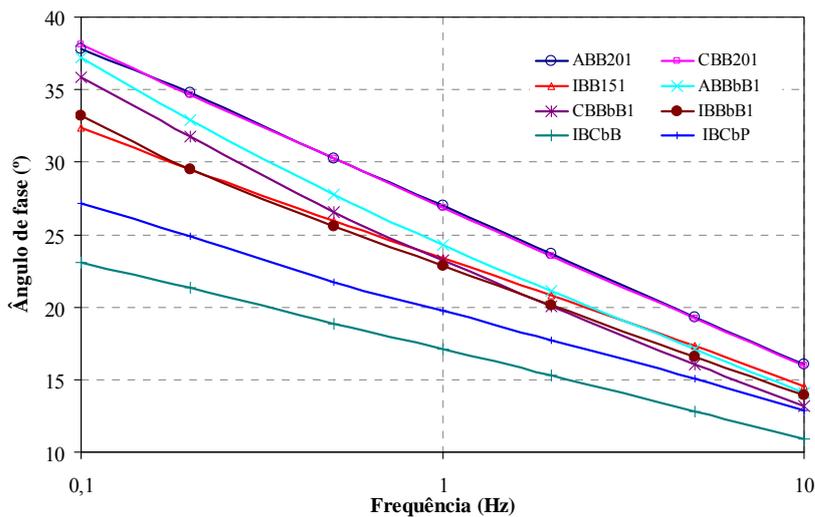


Figura 7.4 – Ângulo de fase das misturas nas frequências aplicadas à temperatura de 15 °C

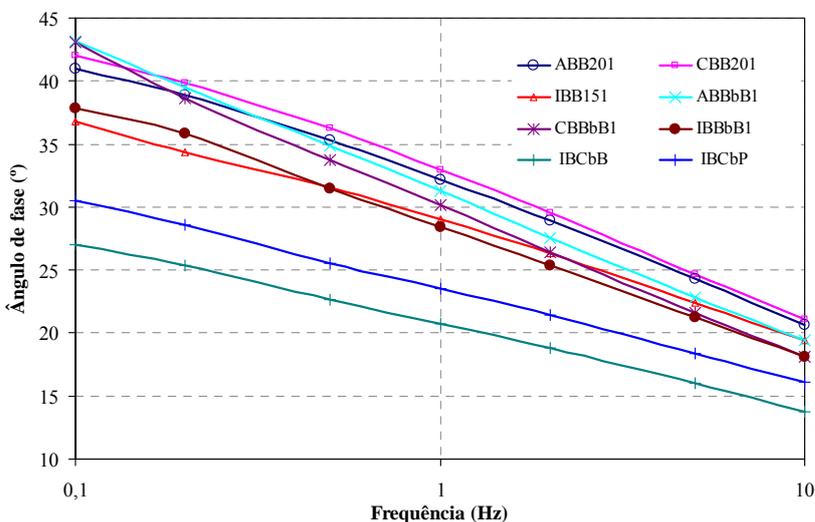


Figura 7.5 – Ângulo de fase das misturas nas frequências aplicadas à temperatura de 20 °C

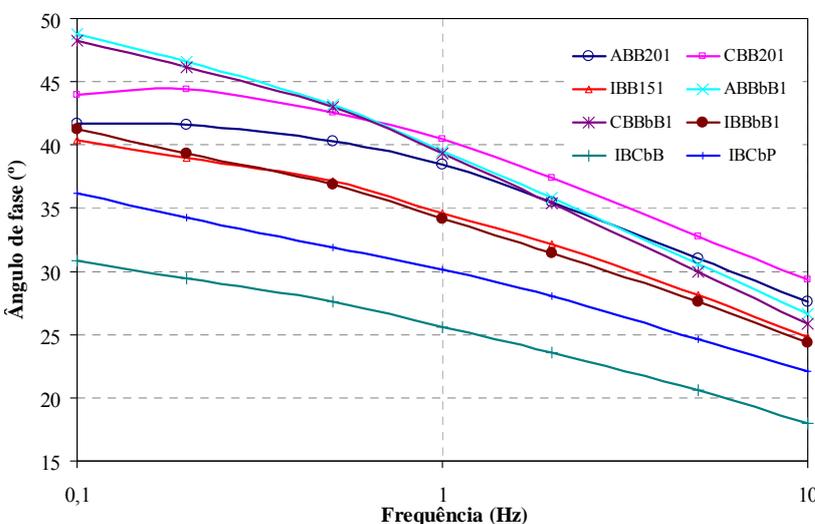


Figura 7.6 – Ângulo de fase das misturas nas frequências aplicadas à temperatura de 25 °C

Do mesmo modo que na Fase 3, a análise dos resultados dos ensaios de módulo mostrou que, para as misturas com mais 1% de betume, o módulo dinâmico aumenta com o aumento da frequência e diminui com a elevação da temperatura, enquanto que o ângulo de fase diminui com o aumento da frequência e aumenta com o aumento da temperatura. A comparação entre os resultados do módulo dinâmico e do ângulo de fase obtidos para a frequência de 10 Hz à temperatura de 20 °C é apresentada no Quadro 7.3.

Quadro 7.3 – Módulo dinâmico e ângulo de fase (10 Hz, 20 °C)

Mistura	Granulometria	Sistema de produção	Percentagem de betume (%)	Volume de vazios (%)	Módulo dinâmico (MPa)	Ângulo de fase (°)	Baridade aparente (g/cm <sup>3</sup> )
ABB201	<i>Gap graded</i>	<i>Terminal blend</i>	8,5	6,0	5454	21	2,33
CBB201	<i>Gap graded</i>	<i>Terminal blend</i>	8,5	6,0	4864	21	2,32
IBB151	<i>Dense graded</i>	<i>Terminal blend</i>	7,0	5,0	4909	19	2,35
ABBbB1	<i>Gap graded</i>	<i>Continuous blend</i>	8,5	6,0	5217	19	2,27
CBBbB1	<i>Gap graded</i>	<i>Continuous blend</i>	9,0	6,0	5994	18	2,32
IBBbB1	<i>Dense graded</i>	<i>Continuous blend</i>	8,0	5,0	4989	18	2,28
IBCbB	<i>Dense graded</i>	<i>Continuous blend</i>	7,0	5,0	6273	14	2,29
IBCbP	<i>Dense graded</i>	<i>Continuous blend</i>	7,0	5,0	4506	16	2,32

De acordo com o Quadro 7.3 e as Figuras 7.1 a 7.6, observa-se que:

- para os betumes-borracha produzidos com betume base CAP 50/70, as misturas produzidas com o betume-borracha *continuous blend*, em geral, obtiveram um módulo dinâmico superior em relação às misturas com o betume-borracha *terminal blend*,
- o tipo de borracha influenciou o valor do módulo dinâmico, tendo em conta que a mistura IBCbB (borracha ambiente) obteve um módulo superior à mistura IBCbP (borracha criogénica);
- em relação ao ângulo de fase, em geral, as misturas produzidas com o betume-borracha *terminal blend* apresentaram um ângulo de fase pouco superior em relação às outras misturas, o que se traduz numa menor componente elástica;
- relativamente ao ângulo de fase a presença da borracha ambiente reduziu este parâmetro.

O módulo dinâmico é a primeira propriedade de uma mistura betuminosas a ser considerada no dimensionamento de um pavimento. Além das curvas isotérmicas, os módulos dinâmicos podem ser representados através da curva de equivalência frequência-temperatura (*master-Curve*), do plano Cole-Cole e do Espaço de Black, como segue.

### Curva de equivalência frequência-temperatura ou *master-curve*

A Figura 7.7 apresenta a curva frequência-temperatura (*master-curve*) das misturas com betume-borracha com mais 1% de betume e da mistura convencional para a temperatura de referência de 20 °C, obtida por translação gráfica.

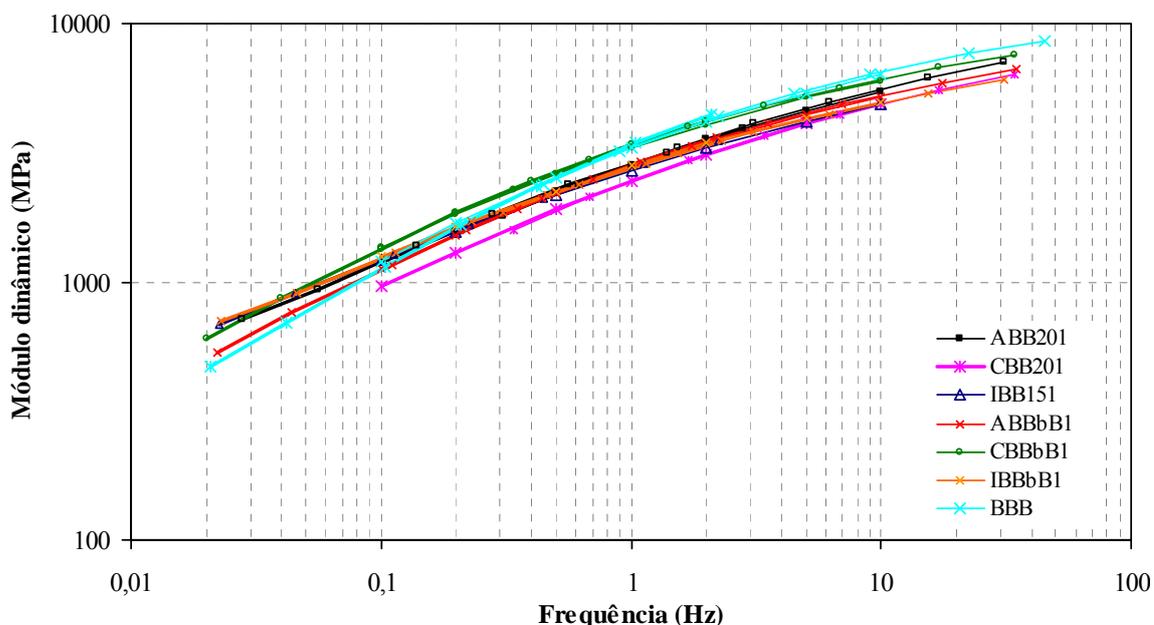


Figura 7.7 – *Master-curve* das misturas com mais 1% de betume e da mistura de referência

As *master curves* são construídas utilizando-se o princípio da superposição da equivalência frequência-temperatura (lado direito – baixas temperaturas; lado esquerdo – elevadas temperaturas). Os dados dos módulos a várias temperaturas são deslocados com a sua respectiva frequência até formarem uma só curva para uma temperatura de referência. A curva assim formada, descreve a dependência da temperatura deste material, ou seja, uma curva horizontal representa um comportamento elástico, enquanto que uma curva próxima da vertical mostra um comportamento muito susceptível às variações de temperatura e de frequência.

A partir da Figura 7.7, pode avaliar-se que curva da mistura de referência (BBB) representa um comportamento mais susceptível às variações de temperatura e de frequência. Para a frequência de 10 Hz observa-se que as misturas com betume-borracha, em um primeiro grupo, apresentam um comportamento semelhante, sendo que, principalmente as misturas CBB201, IBB151 e IBBbB1, com um comportamento mais elástico e que apresentaria, um bom

desempenho à fadiga. Um segundo grupo está representado pelas misturas BBB e CBBbB1, que tenderiam a um desempenho inferior.

### Espaço de Black

O espaço de Black caracteriza a relação entre o ângulo de fase e o logaritmo do módulo. Através deste gráfico, observa-se que para baixas frequências e elevadas temperaturas, o módulo diminui, enquanto que para elevadas frequências e baixas temperaturas, o módulo aumenta. A representação do Espaço de Black das misturas estudadas nesta fase é mostrada nas Figuras 7.8 a 7.13.

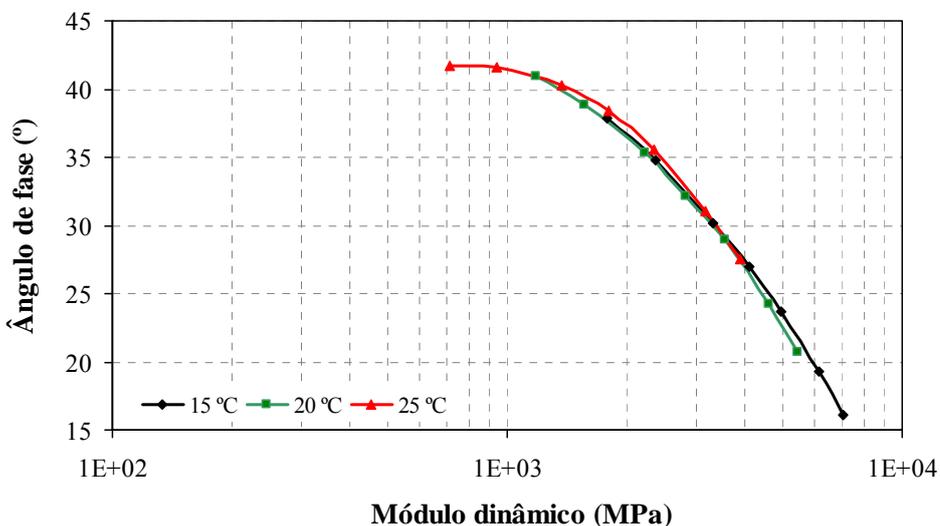


Figura 7.8 – Espaço de Black da mistura ABB201

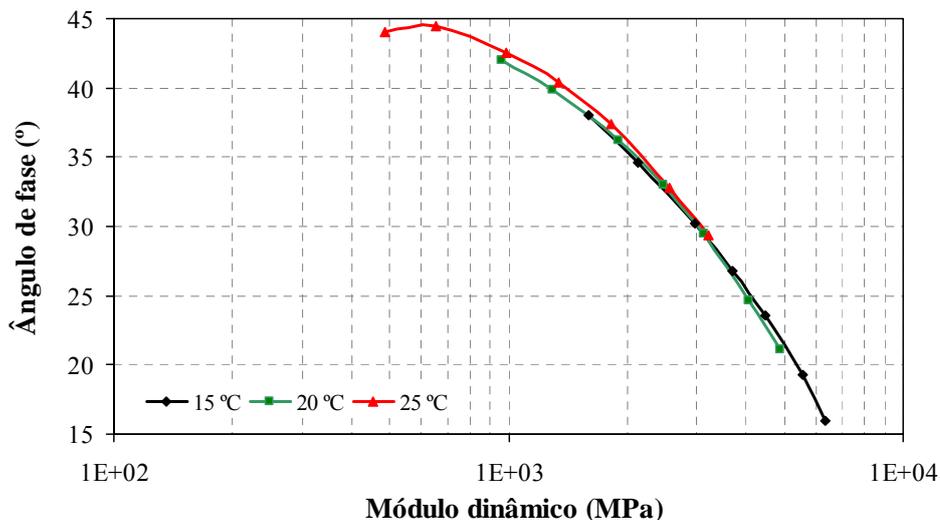


Figura 7.9 – Espaço de Black da mistura CBB201

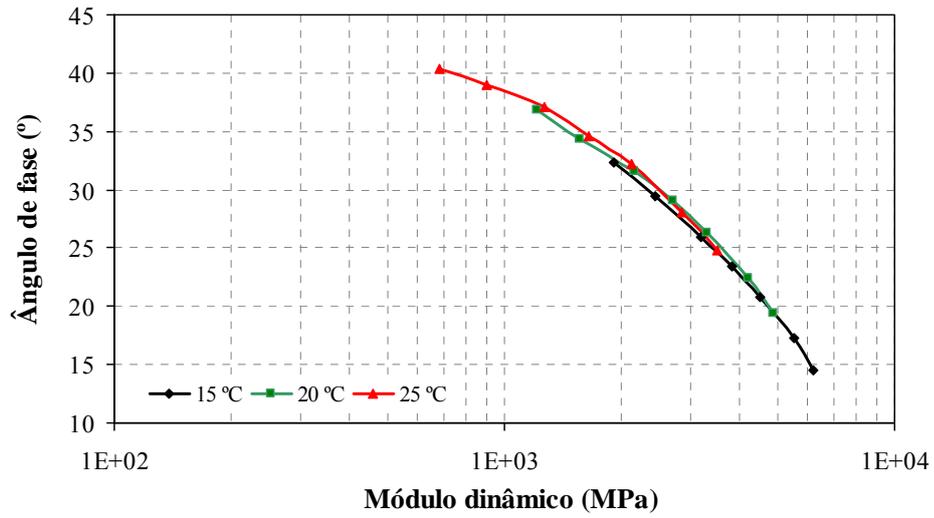


Figura 7.10 – Espaço de Black da mistura IBB151

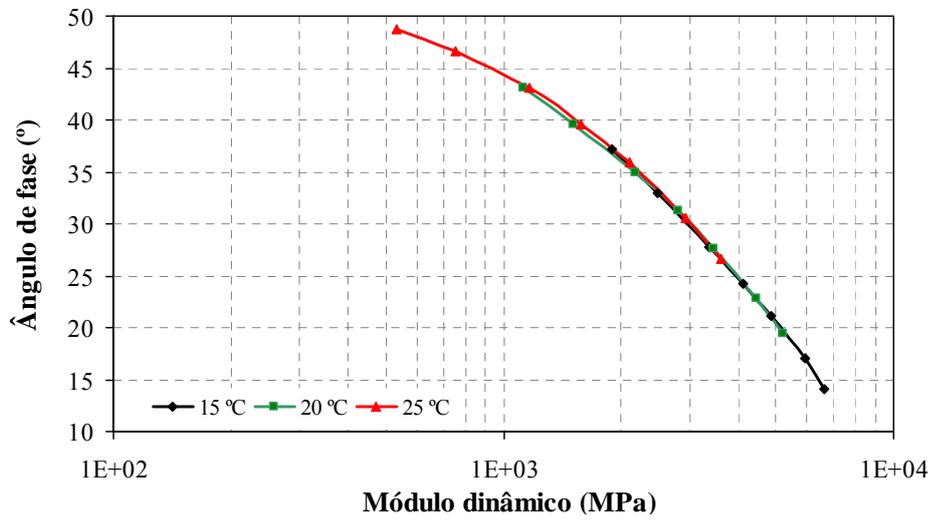


Figura 7.11 – Espaço de Black da mistura ABbbB1

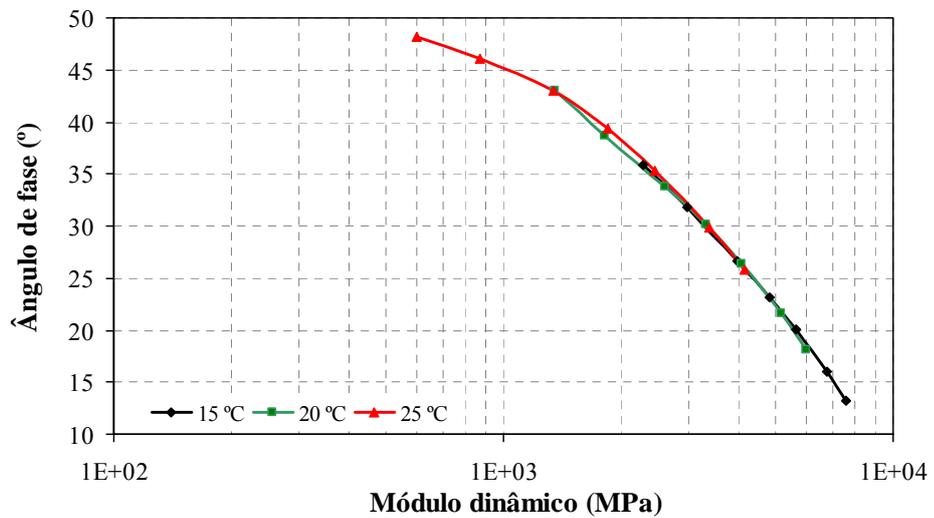


Figura 7.12 – Espaço de Black da mistura CBbbB1

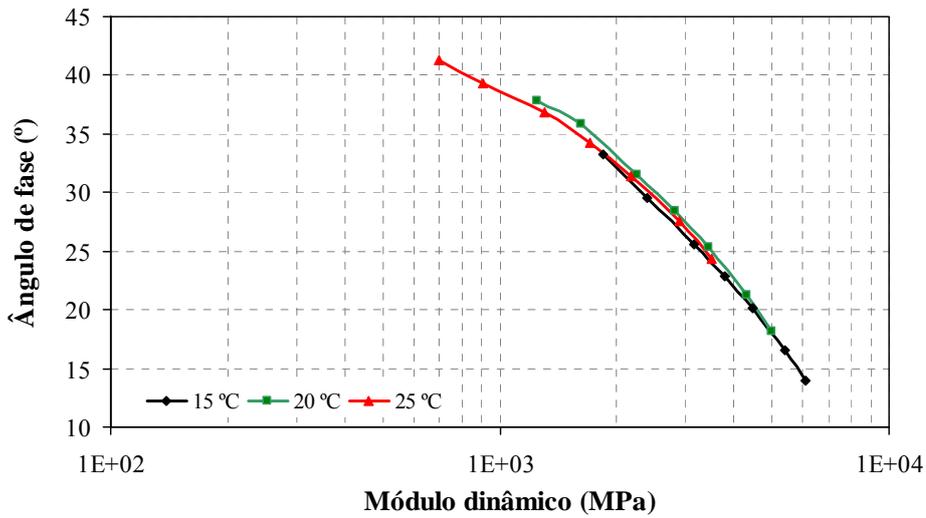


Figura 7.13 – Espaço de Black da mistura IBbB1

Com auxílio das curvas do Espaço de Black pode avaliar-se o módulo e o ângulo de fase para uma gama de frequências tendo como referência uma dada temperatura, sendo que cada ângulo de fase corresponde a um só valor de módulo. No caso das misturas estudadas, tomando-se como referência a temperatura de 20 °C e na frequência de 10 Hz, em geral, os ângulos de fase obtiveram valores semelhantes.

### Representação no plano Cole-Cole

A parte real ( $E_1$ ) e a parte imaginária ( $E_2$ ) do módulo complexo são representadas em conjunto em uma curva denominada plano Cole-Cole. As Figuras de 7.14 a 7.19 apresentam a representação no plano Cole-Cole das misturas com betume-borracha.

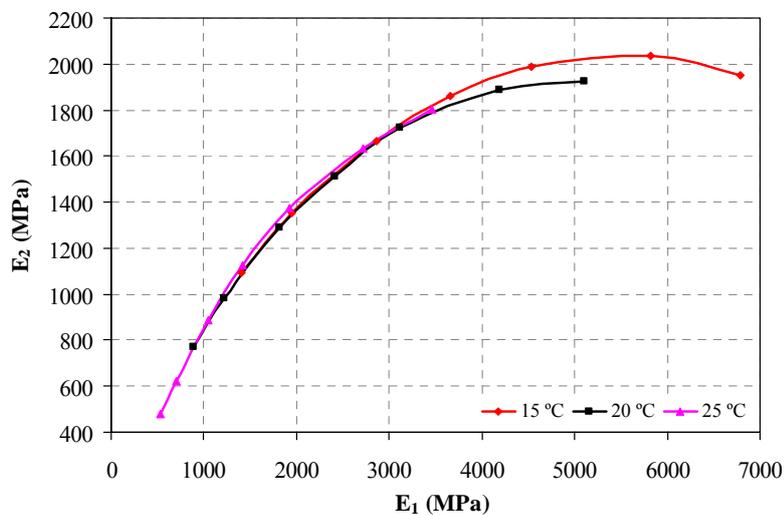


Figura 7.14 – Representação Cole-Cole da mistura ABB201

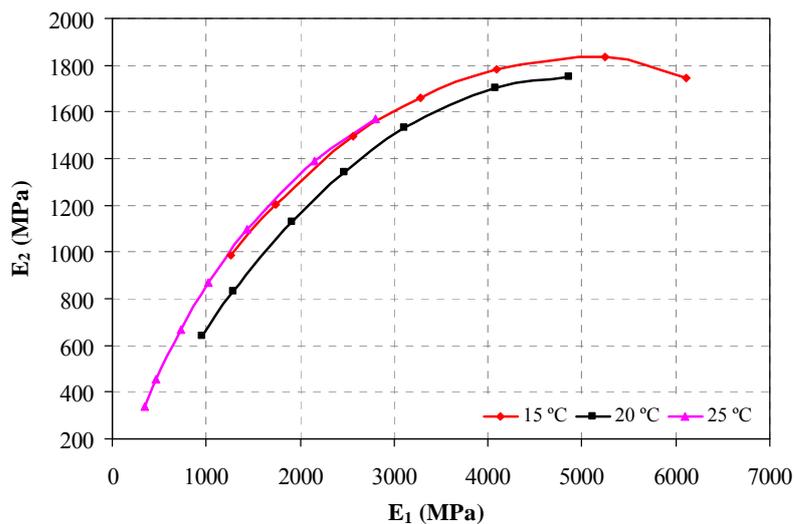


Figura 7.15 – Representação Cole-Cole da mistura CBB201

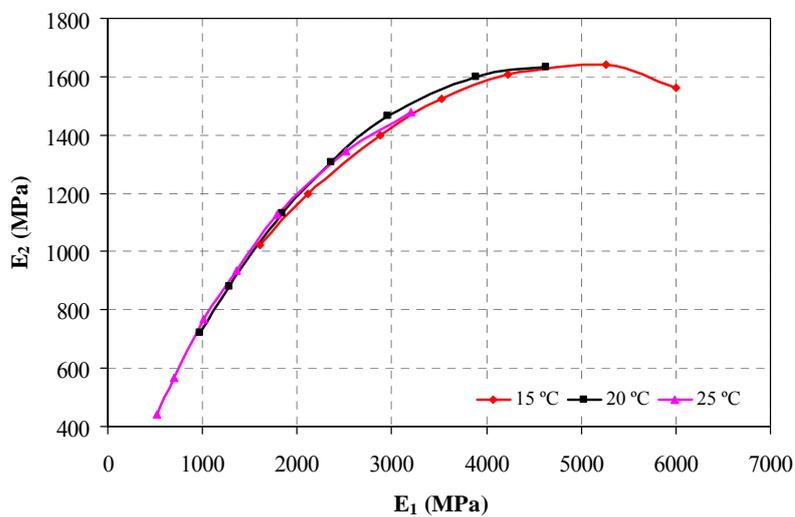


Figura 7.16 – Representação Cole-Cole da mistura IBB151

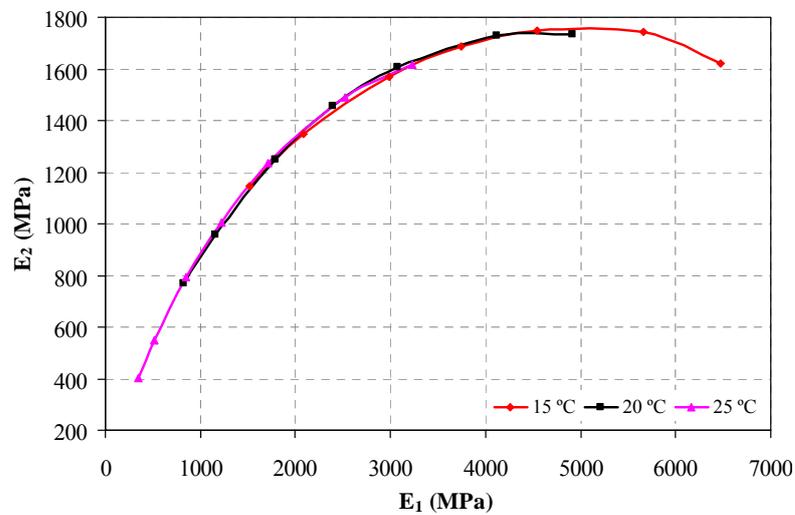


Figura 7.17 – Representação Cole-Cole da mistura ABBbB1

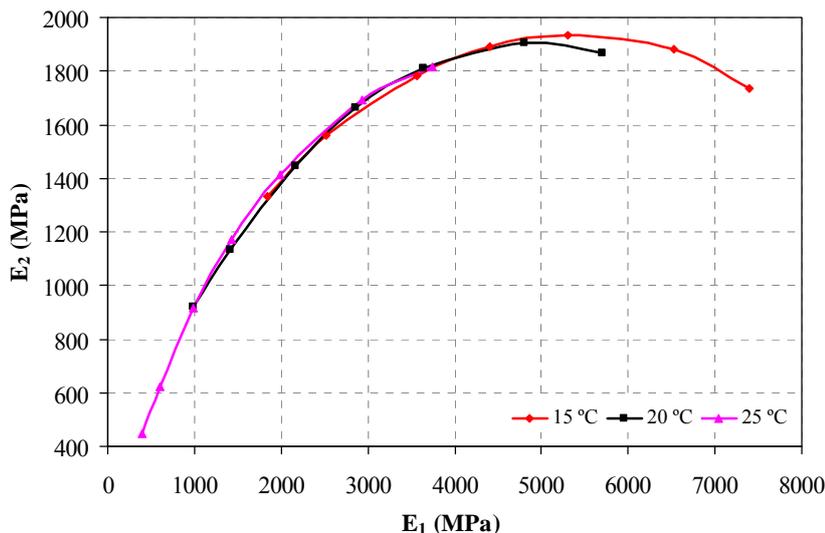


Figura 7.18 – Representação Cole-Cole da mistura CBBbB1

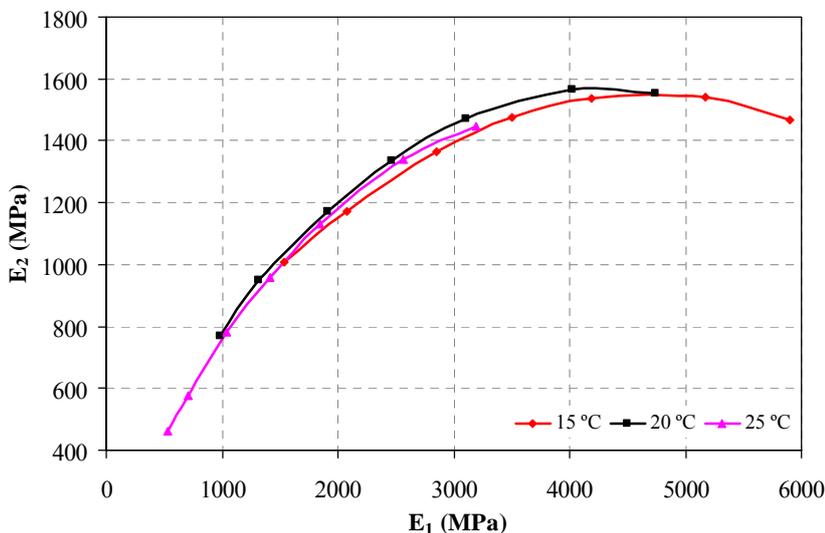


Figura 7.19 – Representação Cole-Cole da mistura IBBbB1

A representação no plano Cole-Cole, obtém-se uma curva única em forma de semi-círculo (lado direito – baixas temperaturas e elevadas frequências; lado esquerdo – elevadas temperaturas e baixas frequências). No plano Cole-Cole das misturas (Figuras 7.14 a 7.19) os menores valores do módulo imaginário ( $E_2$ ) fornecem uma indicação das misturas com a tendência ao melhor comportamento à fadiga, que foram as misturas IBB151, CBB201, ABB201 e IBBbB1, pela ordem. Outro facto observado através do Plano Cole-Cole é que, em geral, o módulo imaginário  $E_2$  é mais elevado entre 15 °C e 20 °C, indicando que neste intervalo de temperatura os ensaios de fadiga deveriam ser realizados. Além deste indicativo e de modo a atender a norma AASHTO TP8 (1994), os ensaios de fadiga foram realizados a 20 °C.

### 7.3.2. Resistência à fadiga

A determinação das leis de fadiga corresponde a um ajuste de uma função de potência  $N = a \times (1/\epsilon_i)^b$  aos resultados obtidos nos ensaios. O Quadro 7.4 mostra os parâmetros obtidos das leis de fadiga das novas misturas estudadas na Fase 4 (misturas com mais 1% de betume e também as misturas IBCbB e IBCbP, produzidas para avaliar o desempenho da granulometria AI). A Figura 7.20, apresenta as curvas de fadiga destas misturas, e também da mistura de referência BBB. A análise dos resultados foi realizada através do  $N_{100}^2$ , como mostra a Figura 7.21, para as misturas da Figura 7.20 e também, em comparação, com as misturas com percentagem de betume óptima da metodologia Marshall.

Quadro 7.4 – Parâmetros obtidos para as leis de fadiga

Parâmetro	ABB201	CBB201	IBB151	ABBbB1	CBBbB1	IBBbB1	IBCbB	IBCbP
a	$1,475 \times 10^{21}$	$4,587 \times 10^{20}$	$2,031 \times 10^{21}$	$3,925 \times 10^{17}$	$1,380 \times 10^{17}$	$6,986 \times 10^{18}$	$4,852 \times 10^{19}$	$5,269 \times 10^{18}$
b	5,921	5,623	5,915	4,781	4,574	5,164	5,463	5,205
R <sup>2</sup>	0,96	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,96

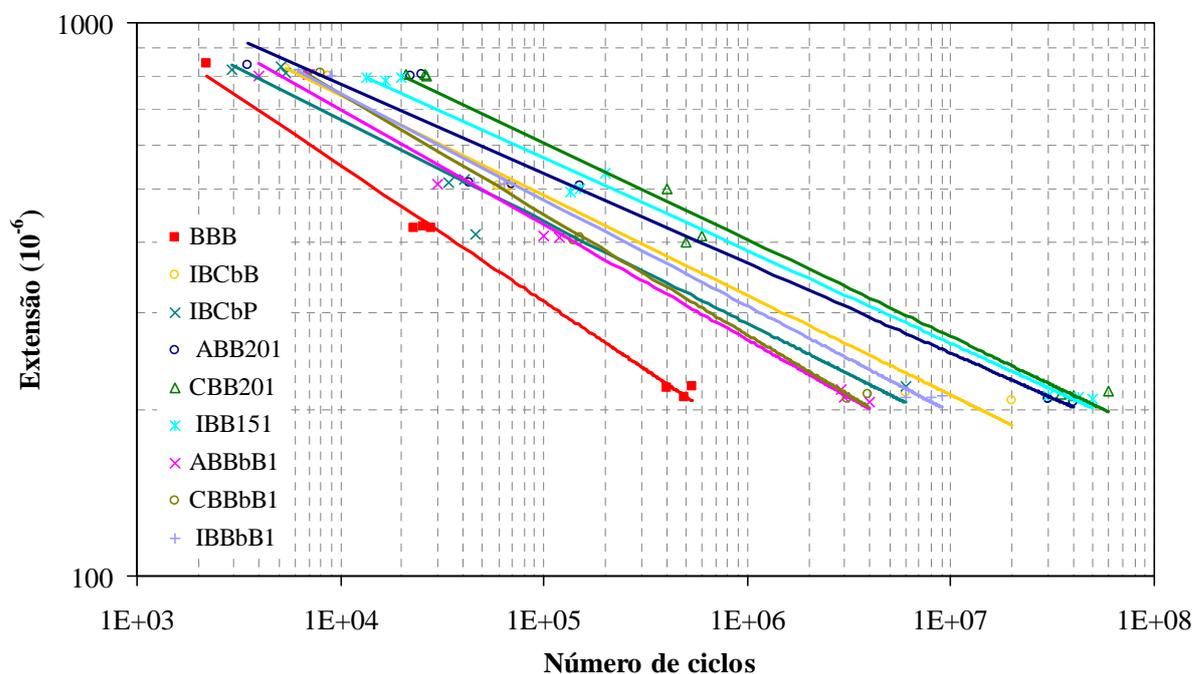


Figura 7.20 – Curvas de fadiga das misturas da Fase 4 e a mistura convencional

<sup>1</sup> N = vida de fadiga expressa em número de solicitações de carga;  $\epsilon_i$  = extensão de tracção; a, b = constantes experimentais.

<sup>2</sup>  $N_{100}$  – número de aplicações de carga para uma extensão de  $100 \times 10^{-6}$ .

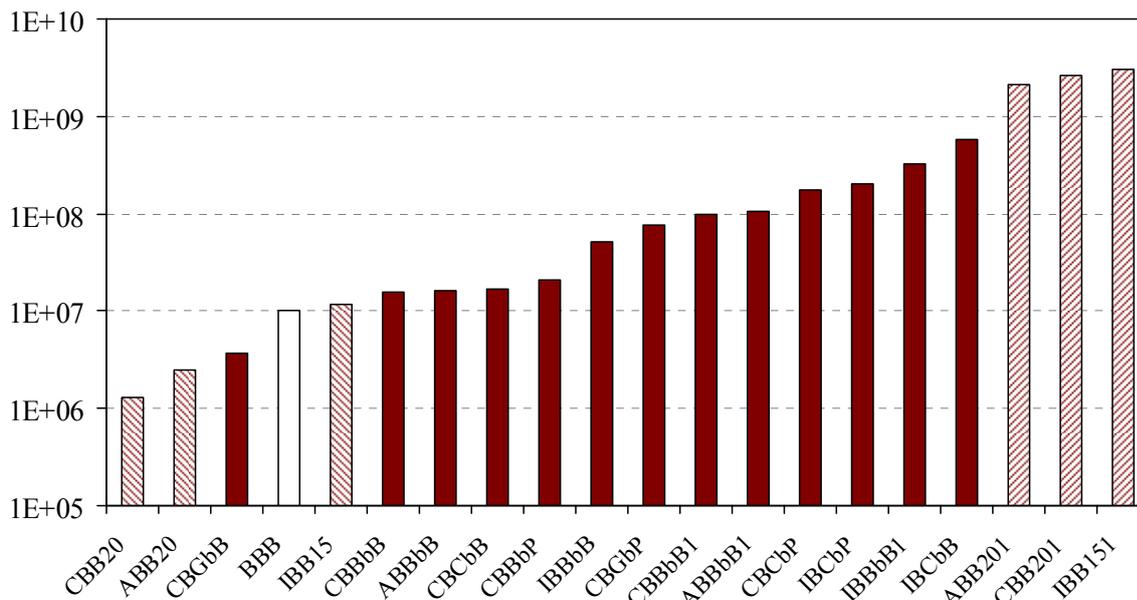


Figura 7.21 – N<sub>100</sub> para uma extensão de 100x10<sup>-6</sup> das misturas

De acordo com a Figura 7.21, as misturas com betume-borracha com mais 1% de betume, independente do tipo de betume empregue, obtiveram um melhor desempenho em relação à mistura produzida com betume convencional. Relativamente ao tipo de betume, as misturas com betume-borracha *terminal blend* apresentaram um desempenho superior às misturas com betume-borracha *continuous blend*.

Para as misturas produzidas na Fase 4, em relação à granulometria, comparativamente ao tipo de betume utilizado, pode distinguir-se nas Figuras 7.20 e 7.21, dois grupos definidos, sendo um primeiro de melhor desempenho, formado pelas misturas *terminal blend gap graded* CBB201 e ABB201 e *dense graded* IBB151, e um segundo grupo pelas demais misturas *continuous blend*. A mistura de referência BBB, não se enquadra em nos grupos anteriores, apresentando uma menor resistência à fadiga.

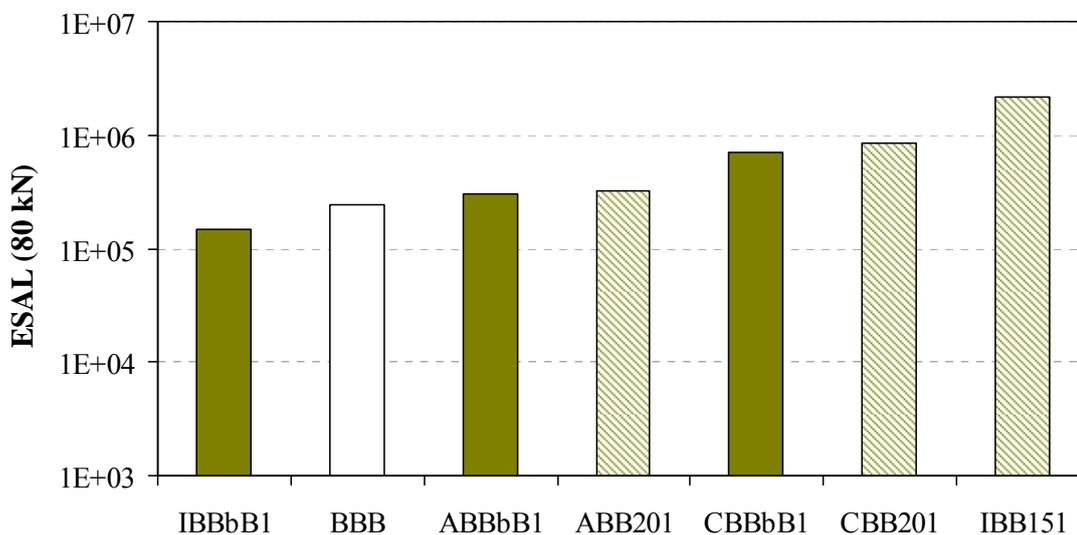
Na comparação realizada na Figura 7.21, observa-se, ainda, que as misturas com betume *continuous blend* IBCbB e IBCbP obtiveram um bom desempenho em relação às outras misturas produzidas neste sistema. No entanto, estas misturas, apesar de terem uma percentagem de betume inferior, foram produzidas com um betume base mais rígido (PEN 35/50), que anteriormente já haviam demonstrado apresentar um desempenho superior em relação à resistência à fadiga.

A avaliação do desempenho à fadiga, a partir do  $N_{100}$ , para todas as misturas estudadas conduziu às seguintes conclusões:

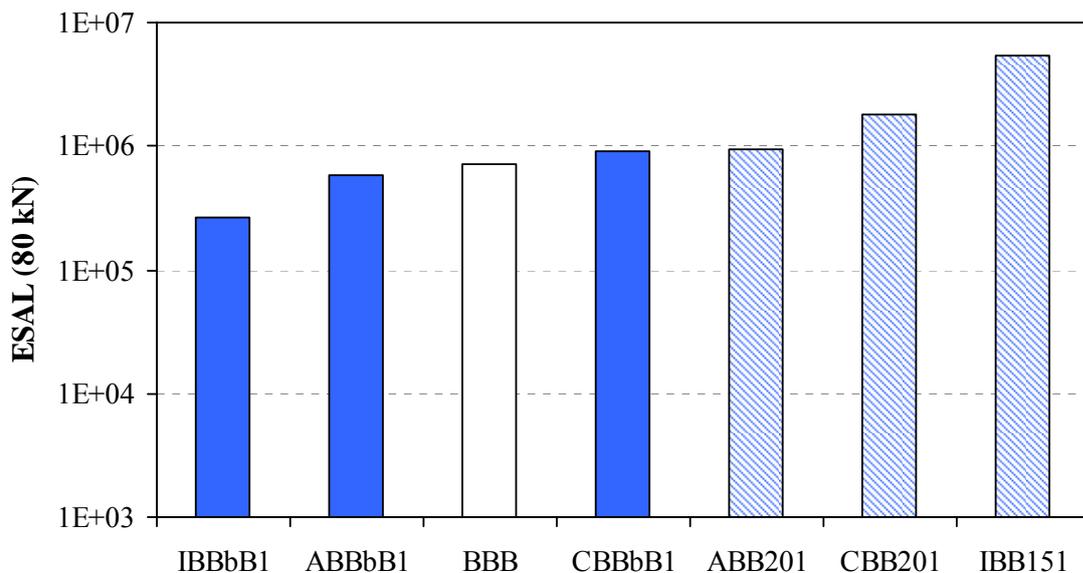
- todas as misturas nas quais foi acrescentado mais 1% de betume em relação à percentagem óptima obtida através da metodologia Marshall melhoraram o desempenho à fadiga;
- as misturas *terminal blend* com mais 1% de betume obtiveram um desempenho superior em relação às correspondentes misturas com a percentagem óptima do que as misturas *continuous blend* e suas correspondentes;
- em relação às misturas IBCbP e IBCbB, a mistura com a borracha ambiente obteve um melhor desempenho à fadiga.

### 7.3.3. Resistência à deformação permanente

A Figura 7.22 apresenta os resultados obtidos no ensaio RSST-CH, relacionando o ESAL (número de ciclos do eixo padrão de 80 kN) para atingir a rodeira de 12,7 mm das misturas estudadas com mais 1% de betume e a mistura convencional BBB. A Figura 7.23 mostra os resultados para rodeiras de 20,0 mm.



7.22 – ESAL que origina uma rodeira de 12,7 mm nas misturas com mais 1% de betume e mistura convencional BBB



7.23 – ESAL que origina uma rodeira de 20,0 mm nas misturas com mais 1% de betume e mistura convencional BBB

Relativamente à resistência à deformação permanente, o aumento de 1% de betume nas misturas mostrou que, em relação à mistura convencional, não houve um decréscimo deste parâmetro, excepto para a mistura IBBbB1 para rodeiras de 12,7 mm e 20,0 mm (Figura 7.22 e 7.23) e para a mistura ABBbB1 para rodeiras de 20,0 mm (Figura 7.23).

Através das Figuras 7.22 e 7.23 é possível observar que os betumes-borracha do tipo *terminal blend* demonstram ser menos sensíveis ao aparecimento de rodeiras do que os betumes-borracha do tipo *continuous blend*.

As misturas tipo *gap graded*, que promovem o contacto grão a grão, favorecendo o aumento da resistência às deformações permanentes, apresentaram um desempenho superior em relação às misturas convencionais. No entanto, a mistura IBB151, *dense graded*, apresentou um desempenho superior a todas as misturas estudadas, facto atribuído possivelmente ao tipo de betume utilizado e à granulometria.

Quanto ao desempenho à deformação permanente das misturas IBCbB e IBCbP, de acordo com a Figura 7.24 (rodeiras de 12,7 mm), a influência da adição de um betume mais rígido mostrou, como esperado, exibir um melhor desempenho. Entretanto, como mostra a Figura 7.25 (rodeiras de 20,0 mm), as misturas *terminal blend* apresentam uma maior resistência à deformação permanente.

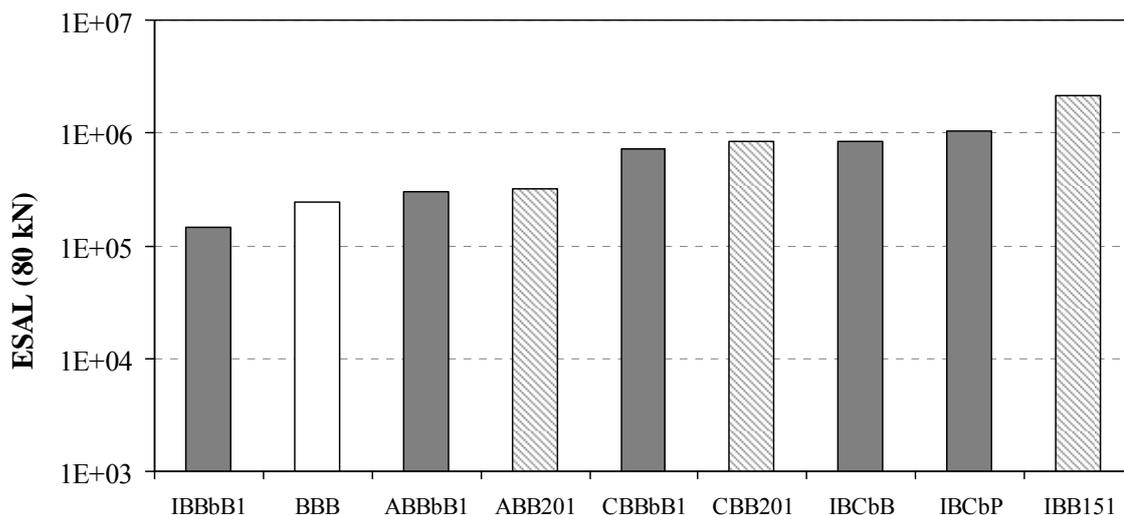


Figura 7.24 – ESAL que origina uma rodeira de 12,7 mm (misturas da Fase 4 e BBB)

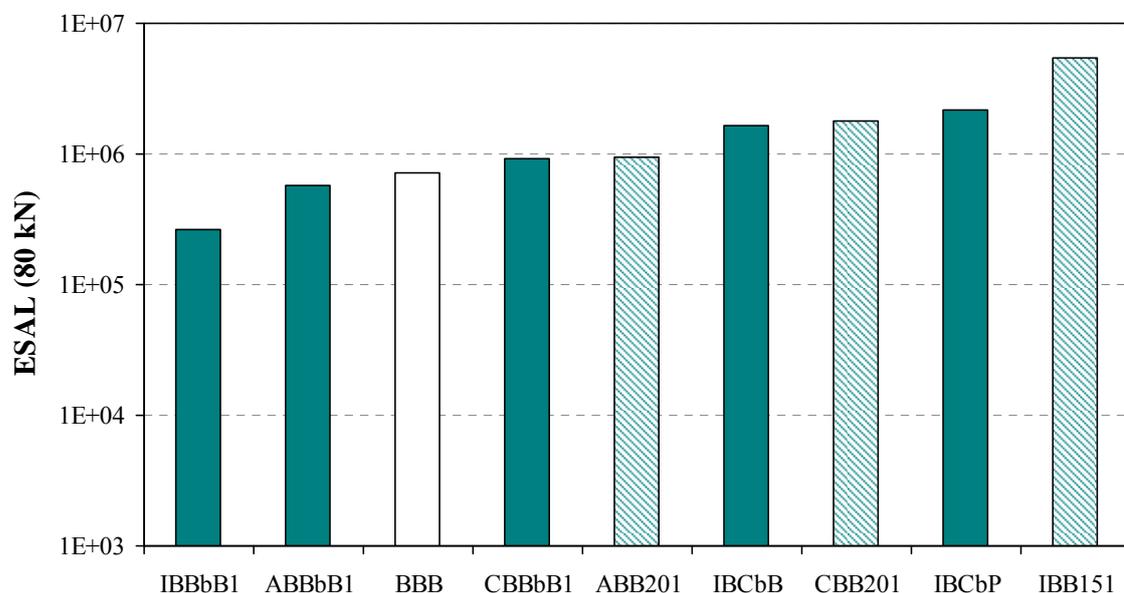


Figura 7.25 – ESAL que origina uma rodeira de 20,0 mm (misturas da Fase 4 e BBB)

A utilização de materiais portugueses mostrou que as misturas com betume base mais rígido apresentam maior resistência à fadiga e também boa resistência à deformação permanente. Contudo, as misturas *terminal blend*, tanto com granulometria *gap graded* quanto *dense graded* obtiveram igualmente um desempenho satisfatório, o que pode atribuir-se à modificação eficaz do betume convencional pela adição da borracha.

### **7.3.4. Análise comparativa entre as misturas (metodologia Marshall *versus* 1% a mais de betume)**

Após a avaliação do desempenho das misturas da Fase 4, as quais foram produzidas com mais 1% de betume que as misturas avaliadas na Fase 3, foi realizada uma análise comparativa entre o desempenho das misturas da Fase 3 e da Fase 4. A avaliação consistiu na análise dos seguintes parâmetros: (i) módulo dinâmico; (ii) resistência à fadiga; (iii) módulo de corte; (iv) resistência à deformação permanente.

#### **Módulo dinâmico e fadiga**

Em ensaios de extensão controlada é esperado que o aumento da percentagem de betume se reflecta numa diminuição do módulo dinâmico. No entanto, este facto não é isolado e depende de factores como o volume de vazios, do tipo de betume utilizado e da granulometria.

De acordo com o SHRP (1994), em geral, um baixo valor do módulo dinâmico conduz a uma maior resistência à fadiga em ensaios em extensão controlada e que a componente viscosa do módulo ( $E_2$ ) é um indicador da resistência à fadiga, sendo desejável um baixo valor para este parâmetro. Entretanto, o SHRP (1994) complementa que este valor não é um indicador suficientemente satisfatório para assegurar ou prever o melhor desempenho à fadiga.

A partir dos resultados obtidos nesta investigação, para prever o comportamento à fadiga através de  $E_2$  ( $E^* \cdot \sin \delta$ ), é necessário avaliar também o valor do ângulo de fase ( $\delta$ ) e da percentagem de betume. Em outras palavras, mesmo que ocorra um aumento da rigidez da mistura, que conduziria teoricamente a um desempenho inferior quanto à resistência à fadiga, o valor do ângulo de fase acaba por influenciar esta previsão.

Relativamente à percentagem de betume da mistura é importante avaliar se a percentagem óptima de betume obtida através da metodologia Marshall conduziu ou não à percentagem óptima ideal de betume para as misturas com betume modificado. Assim, a avaliação dos resultados obtidos para as misturas da Fase 3 e da Fase 4 foram fundamentadas para esta análise.

Considerando que os ensaios de fadiga foram realizados à frequência de 10 Hz e à temperatura de 20 °C, a avaliação dos parâmetros  $E^*$  e  $\delta$  também foi realizada nestas mesmas condições, a partir dos resultados obtidos no ensaio de módulo.

Os Quadros 7.5 e 7.6 apresentam os valores de módulo dinâmico, ângulo de fase ( $\delta$ ) e do parâmetro módulo dissipativo  $E^* \cdot \text{sen} \delta$  ( $E_2$ ) para as misturas da Fase 3 e da Fase 4, respectivamente.

Quadro 7.5 – Módulo dinâmico, ângulo de fase e módulo dissipativo das misturas da Fase 3 (frequência de 10 Hz e temperatura de 20 °C)

Mistura	Porcentagem de betume (%)	Volume de vazios (%)	Módulo dinâmico (MPa)	Ângulo de fase (°)	$E^* \cdot \text{sen} \delta$ (MPa)
ABB20	7,5	6,0	4089	21	1471
CBB20	7,5	6,0	4810	21	1701
IBB15	6,0	5,0	5399	19	1747
ABBbB	7,5	6,0	3809	21	1351
CBBbB	8,0	6,0	4593	20	1539
IBBbB	7,0	5,0	5014	18	1556

Quadro 7.6 – Módulo dinâmico, ângulo de fase e módulo dissipativo das misturas da Fase 4 (frequência de 10 Hz e temperatura de 20 °C)

Mistura	Porcentagem de betume (%)	Volume de vazios (%)	Módulo dinâmico (MPa)	Ângulo de fase (°)	$E^* \cdot \text{sen} \delta$ (MPa)
ABB201	8,5	6,0	5454	21	1927
CBB201	8,5	6,0	4864	21	1753
IBB151	7,0	5,0	4909	19	1631
ABBbB1	8,5	6,0	5217	19	1734
CBBbB1	9,0	6,0	5994	18	1866
IBBbB1	8,0	5,0	4989	18	1552

De acordo com os Quadros 7.5 e 7.6, para a temperatura e frequência consideradas, pode concluir-se que:

- o módulo dinâmico aumentou para as misturas *gap graded* com mais 1% de betume com betume-borracha, para os dois tipos de betume, *continuous blend* e *terminal blend*;
- o módulo diminuiu para as misturas *dense graded* AI com mais 1% de betume em relação, para os dois tipos de betume-borracha;

- em geral o ângulo de fase diminuiu para as misturas com percentagem de betume mais elevada (mais 1%), mas sem variação significativa;
- a ângulo de fase aumentou para as misturas CBB201 e IBB151.

De modo a pormenorizar esta avaliação, o módulo dinâmico e o ângulo de fase foram analisados para todas as sete frequências ensaiadas, através de uma análise gráfica das misturas duas a duas, em função da sua percentagem de betume. Assim, à temperatura de 20 °C, as Figuras 7.26, 7.28, 7.30, 7.32, 7.34 e 7.36 apresentam a variação do módulo dinâmico e do ângulo de fase para as sete frequências estudadas e a comparação da resistência à fadiga obtida com o incremento da percentagem de betume. Nestas figuras foi adoptada a nomenclatura da própria mistura para representar o módulo dinâmico em função da frequência e a nomenclatura da mistura acrescida das letras “AF” para representar o ângulo de fase e “M” para representar o módulo.

Nesta avaliação foi realizada também uma comparação entre as curvas de fadiga obtidas agrupando-se o par de misturas com a percentagem de betume óptima (Marshall) e mais 1% de betume, apresentada nas Figuras 7.27, 7.29, 7.31, 7.33, 7.35 e 7.37.

**Misturas ABB20 e ABB201**

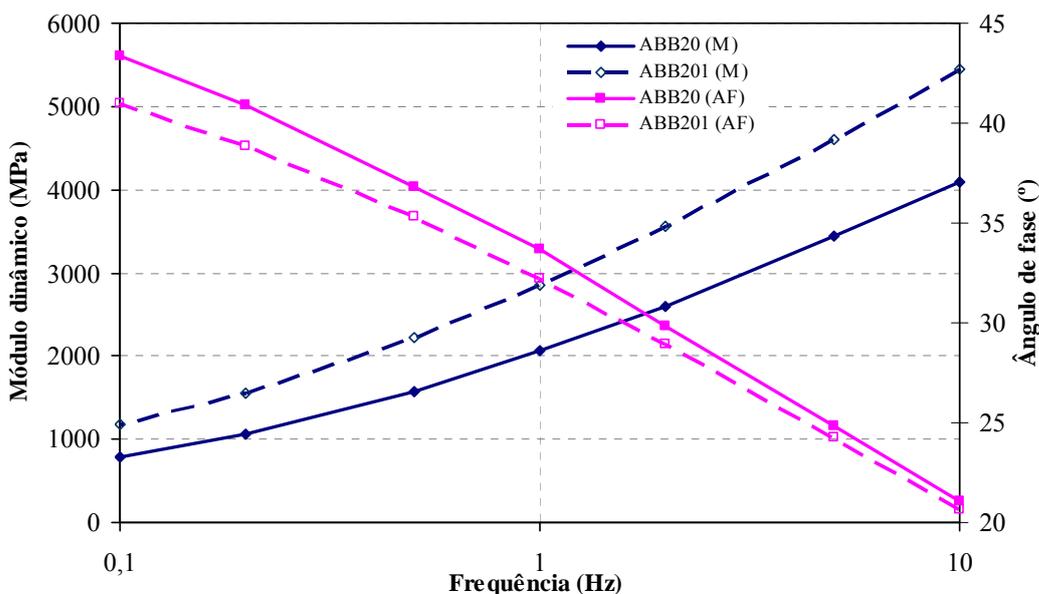


Figura 7.26 – Variação do módulo e do ângulo de fase das misturas ABB20 e ABB201

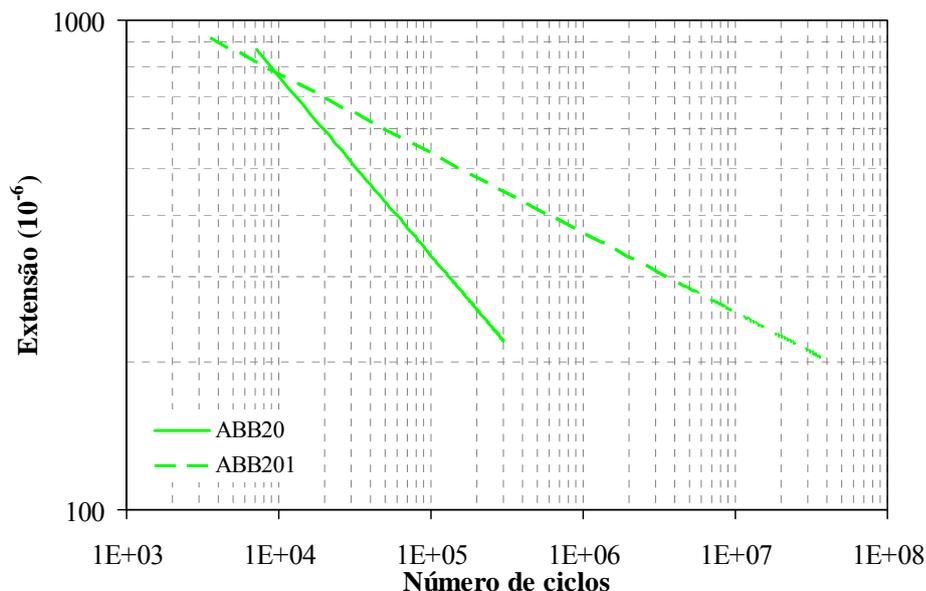


Figura 7.27 – Curvas de fadiga das misturas ABB20 e ABB201

O aumento de 1% de betume na mistura ABB20 promoveu um aumento do módulo dinâmico e uma pequena diminuição do ângulo de fase para todas as frequências (Figura 7.26). A comparação da resistência à fadiga das duas misturas (Figura 7.27) mostrou que a mistura com mais 1% de betume obteve uma maior resistência à fadiga. Como se verifica nos Quadros 7.5 e 7.6, o módulo dissipativo aumentou, de modo que este não foi um indicador da melhoria da resistência à fadiga.

**Misturas CBB20 e CBB201**

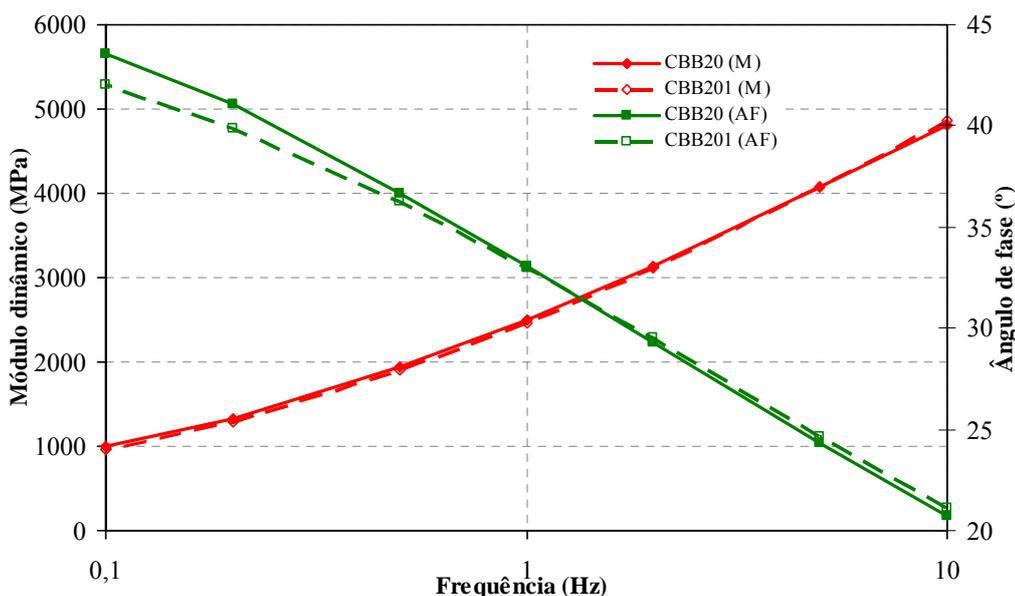


Figura 7.28 – Variação do módulo e do ângulo de fase das misturas CBB20 e CBB201

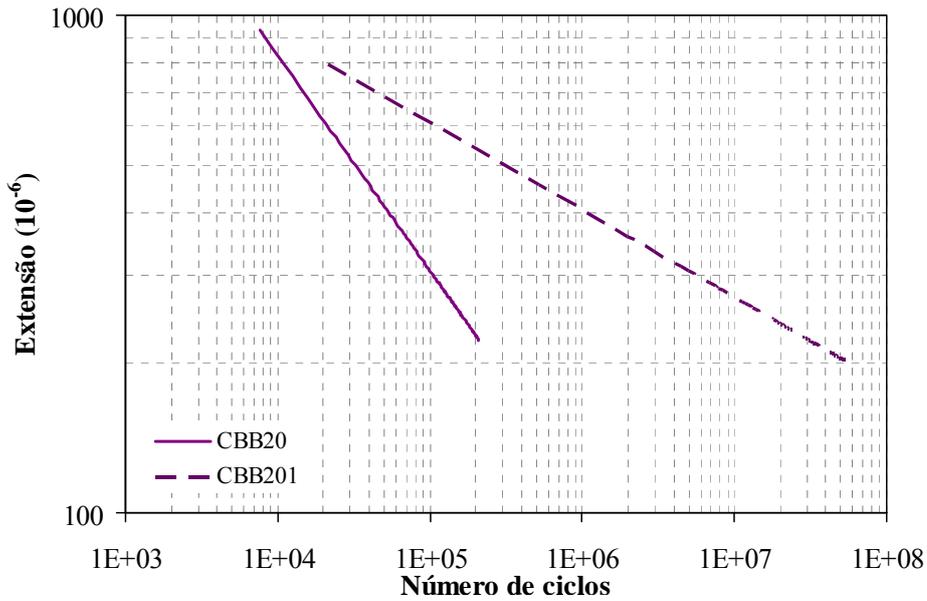


Figura 7.29 – Curvas de fadiga das misturas CBB20 e CBB201

O aumento de 1% de betume na mistura CBB20 não promoveu um aumento do módulo dinâmico nem alterações do ângulo de fase (Figura 7.28). Assim, consequentemente o módulo dissipativo (Quadros 7.5 e 7.6) pouco se alterou. No entanto, a comparação da resistência à fadiga das duas misturas (Figura 7.29), mostra que a mistura com mais 1% de betume obteve um melhor desempenho. Também neste caso, o módulo dissipativo não foi um indicador da resistência à fadiga.

**Misturas CBBbB e CBBbB1**

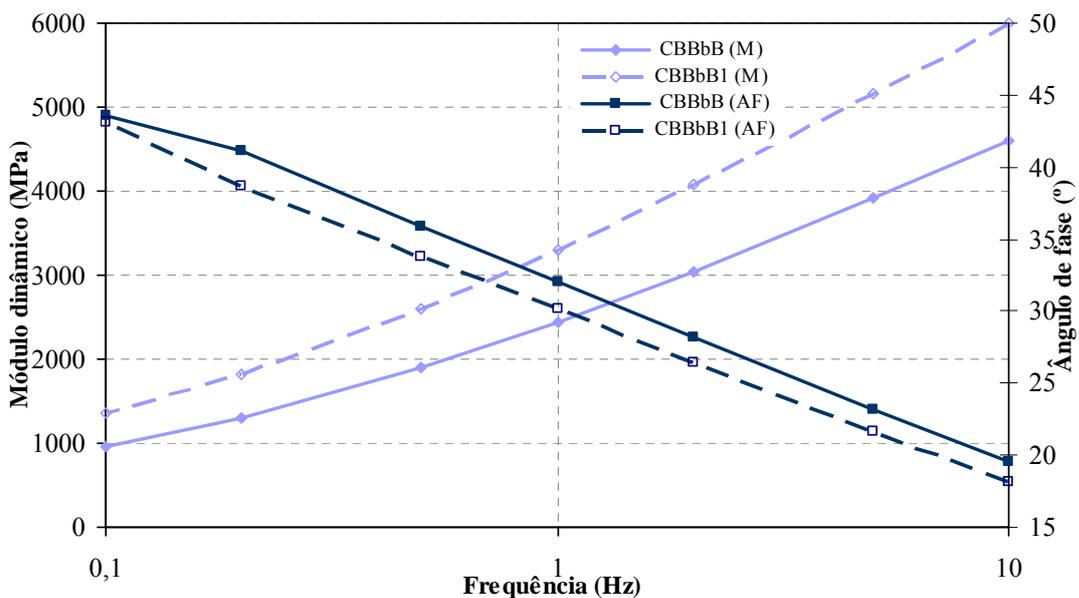


Figura 7.30 – Variação do módulo e do ângulo de fase das misturas CBBbB e CBBbB1

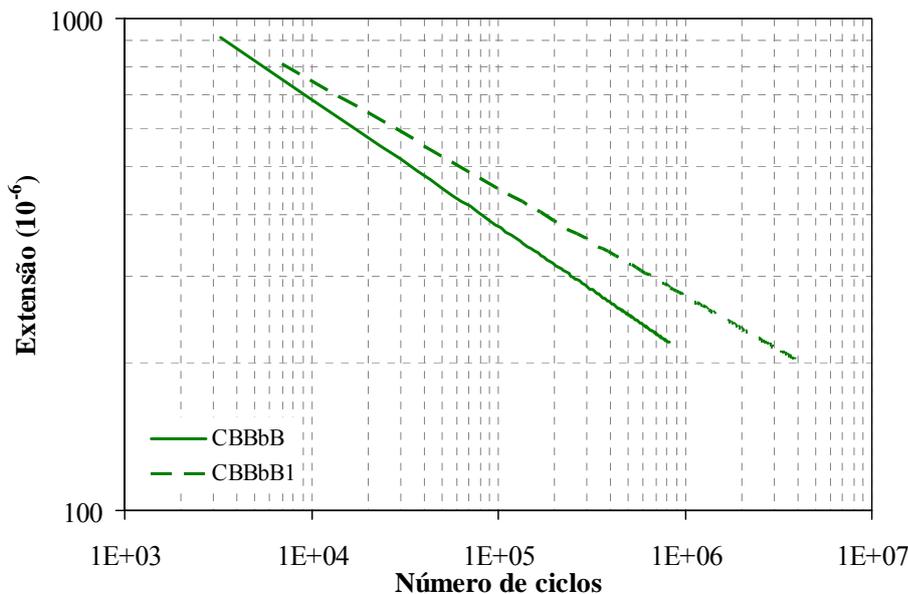


Figura 7.31 – Curvas de fadiga das misturas CBBbB e CBBbB1

O incremento de betume promoveu um aumento do módulo dinâmico e uma diminuição do ângulo de fase para todas as frequências (Figura 7.30). O módulo dissipativo (Quadros 7.5 e 7.6) aumentou com o aumento da percentagem de betume. A comparação entre as duas misturas (Figura 7.31) mostrou que a mistura CBBbB1 obteve um desempenho semelhante para elevadas extensões e um desempenho superior a baixas extensões em relação à mistura CBBbB. Assim, o módulo dissipativo não foi um indicador da resistência à fadiga.

**Misturas IBB15 e IBB151**

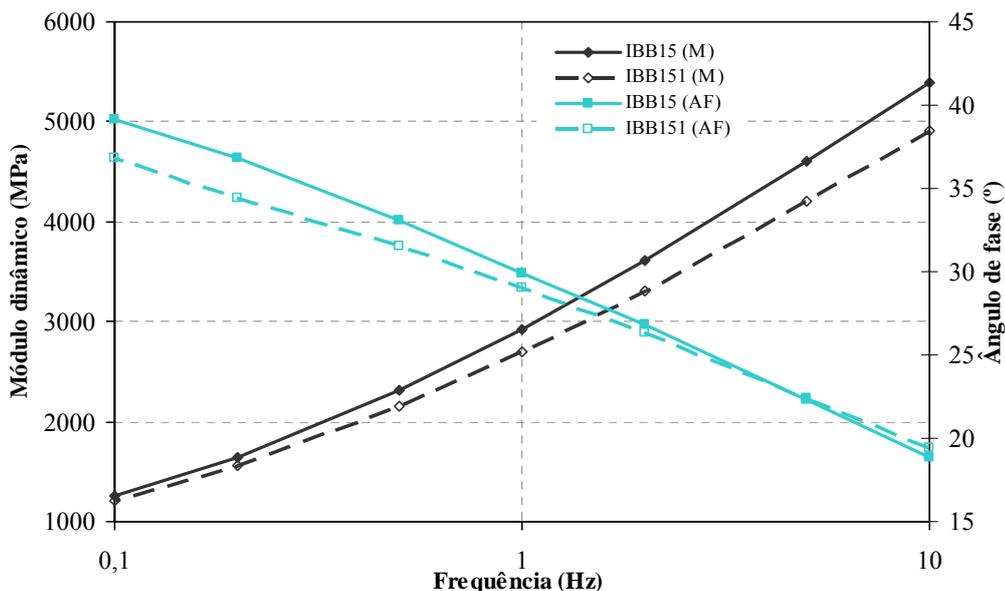


Figura 7.32 – Variação do módulo e do ângulo de fase das misturas IBB15 e IBB151

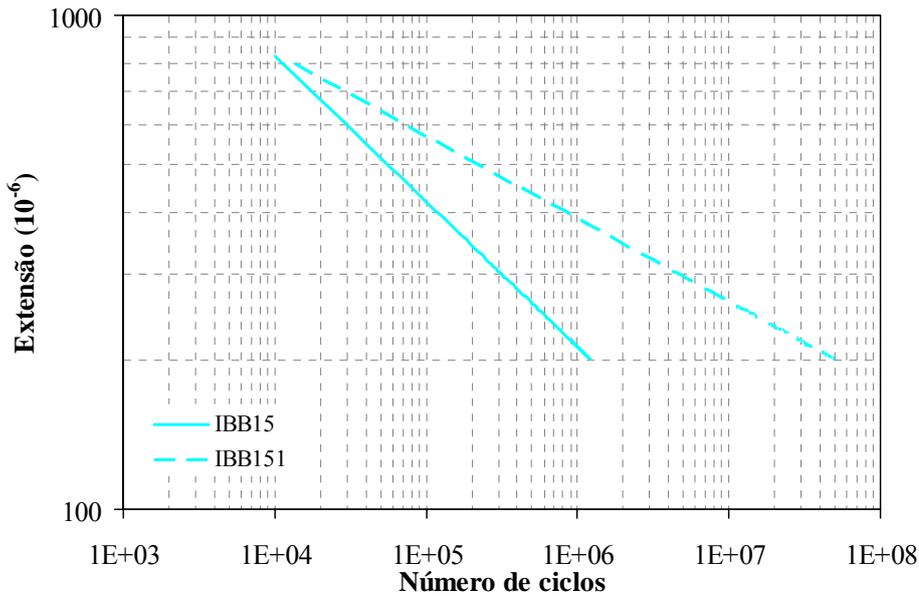


Figura 7.33 – Curvas de fadiga das misturas IBB15 e IBB151

De acordo com a Figura 7.32, com o aumento da percentagem de betume, em geral ocorreu uma diminuição do módulo e do ângulo de fase e, conseqüentemente o módulo dissipativo também diminuiu (Quadros 7.5 e 7.6). Como a resistência à fadiga foi superior para a mistura IBB151 (Figura 7.33), neste caso, o módulo dissipativo foi um indicador da resistência à fadiga.

**Misturas IBBbB e IBBbB1**

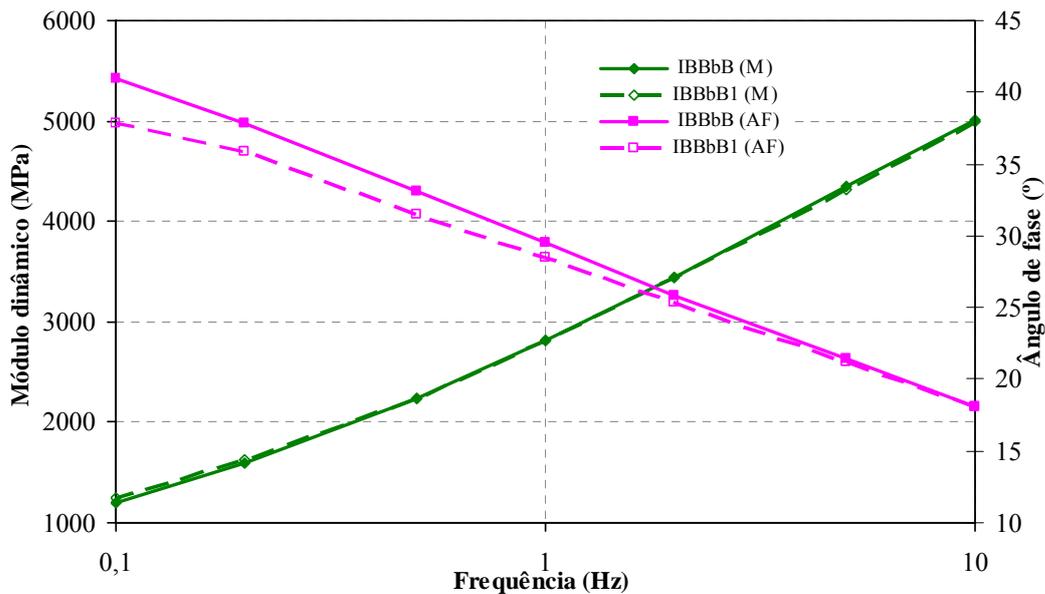


Figura 7.34 – Variação do módulo e do ângulo de fase das misturas IBBbB e IBBbB1

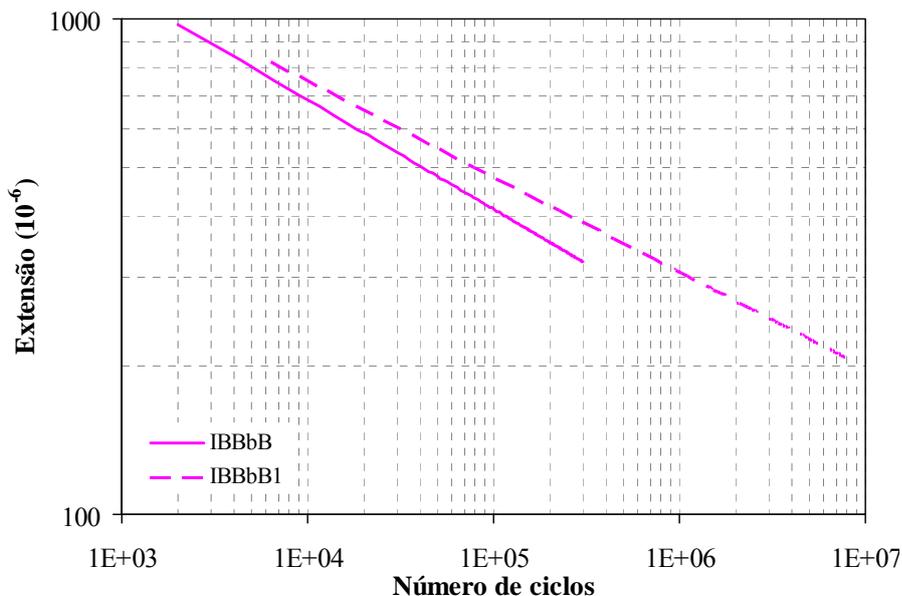


Figura 7.35 – Curvas de fadiga das misturas IBBbB e IBBbB1

Para as misturas IBBbB e IBBbB1 o módulo não sofreu mudanças significativas com o aumento da percentagem de betume e o ângulo de fase diminuiu para todas as frequências mais baixas (Figura 7.34). O módulo dissipativo (Quadros 7.5 e 7.6) diminuiu e, apesar de ser um indicador de aumento da resistência à fadiga, este aumento não foi significativo, como apresenta a Figura 7.35.

**Misturas ABBbB e ABBbB1**

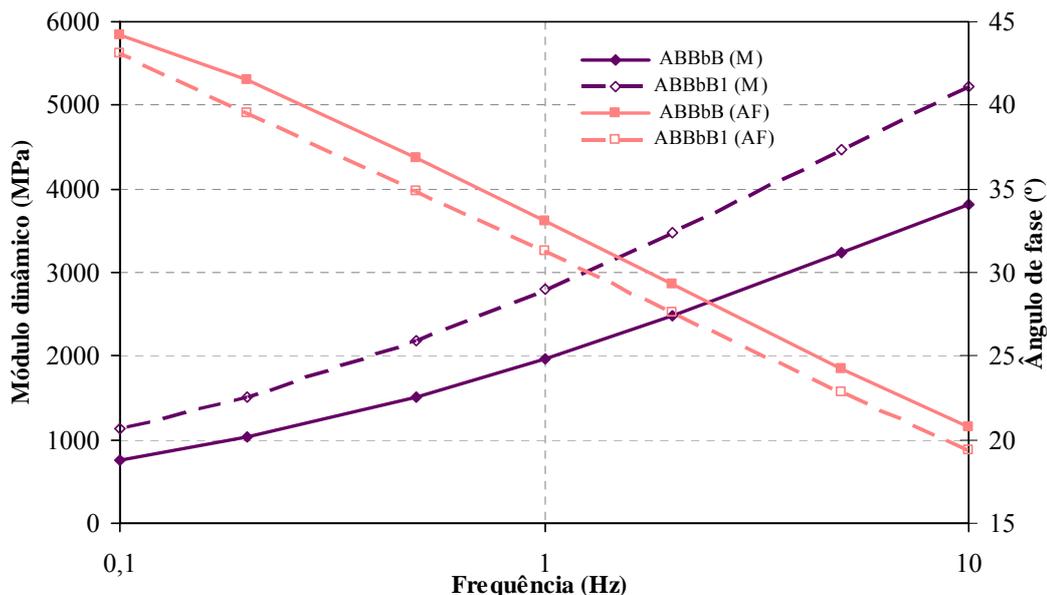


Figura 7.36 – Variação do módulo e do ângulo de fase das misturas ABBbB e ABBbB1

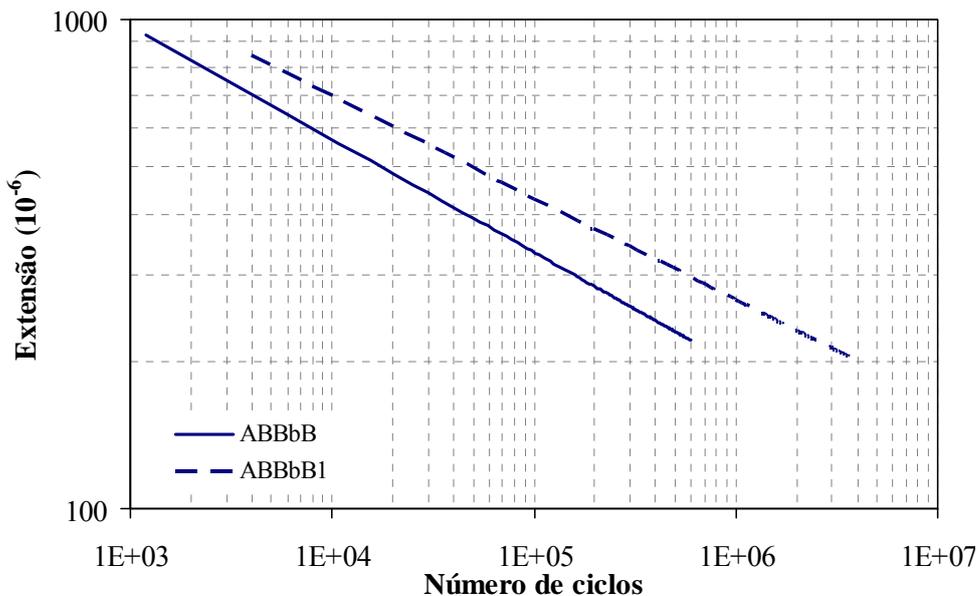


Figura 7.37 – Curvas de fadiga das misturas ABBbB e ABBbB1

O estudo das misturas ABBbB e ABBbB1 mostrou que o módulo aumentou com o aumento da percentagem de betume e o ângulo de fase diminuiu (Figura 7.36). Através dos Quadros 7.5 e 7.6 verificou-se que o módulo dissipativo aumentou. Tendo em conta o aumento observado da resistência à fadiga (Figura 7.37), este parâmetro não foi um indicador da resistência à fadiga destas misturas.

Como resultado desta análise comparativa entre as misturas produzidas com a percentagem de betume óptima obtida através da metodologia Marshall e as misturas confeccionadas com 1% a mais e, na tentativa de utilizar uma analogia do comportamento das misturas betuminosas, utilizando o parâmetro  $E^* \cdot \text{sen} \delta$ , como indicador da previsível resistência à fadiga, obteve-se como resultado, que este parâmetro nem sempre é um bom indicativo da resistência à fadiga.

Ao comparar-se o desempenho à fadiga das misturas, duas a duas, foi possível observar que o aumento da percentagem de betume alterou mais sensivelmente a resistência das misturas *terminal blend* do que as misturas *continuous blend*.

### Módulo de corte e deformação permanente

A Figura 7.38 apresenta os módulos de corte obtidos no ensaio RSST-CH (10 Hz e 60 °C) para as misturas com mais 1% de betume em relação à percentagem óptima da metodologia

Marshall. A Figura 7.39 mostra os módulos de corte das misturas correspondentes (percentagem Marshall + 1% de betume) e a mistura BBB.

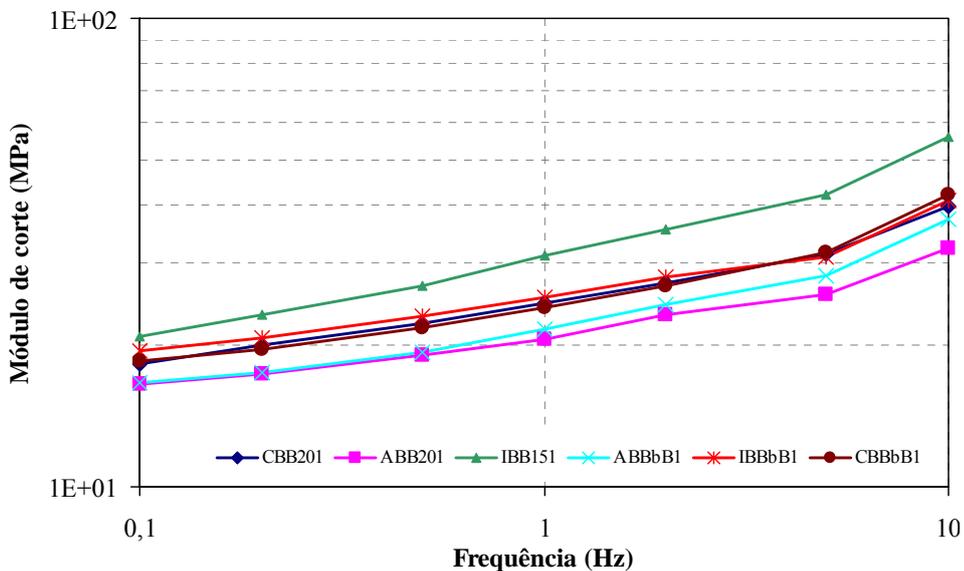


Figura 7.38 – Módulo de corte das misturas betuminosas da Fase 4 (com mais 1% de betume)

De acordo com a Figura 7.38, pode observar-se três grupos de valores de módulo de corte, para os quais, no grupo superior está a mistura IBB151, no grupo intermediário encontram-se as misturas IBBbB1, CBB201 e CBBbB1 e, no grupo inferior, as misturas ABBbB1 e ABB201.

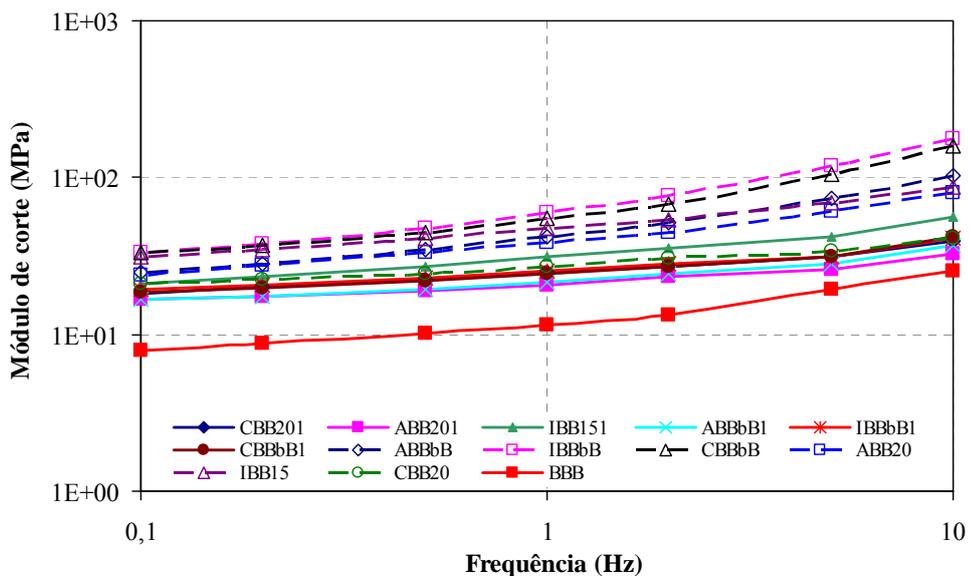


Figura 7.39 – Módulo de corte das misturas betuminosas estudadas e a mistura BBB

O comparativo entre as misturas (Figura 7.39) mostra que, em geral, as misturas com betume-borracha com percentagem de betume menor apresentaram um módulo de corte mais elevado. Entre todas as misturas, a convencional de referência BBB apresentou um menor valor de módulo de corte, que representa uma maior tendência à formação de rodeiras.

A previsão do desempenho à deformação permanente pode ser avaliada através do parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$ . Os Quadros 7.7 e 7.8 apresentam os valores de módulo de corte, do ângulo de fase ( $\delta$ ) e do parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  na frequência de 10 Hz e temperatura de 60 °C, para as misturas da Fase 3 e da Fase 4, respectivamente.

Quadro 7.7 – Módulo de corte, ângulo de fase e  $G^*/\text{sen}\delta$  das misturas da Fase 3 (frequência de 10 Hz e temperatura de 60 °C)

Mistura	Percentagem de betume (%)	Volume de vazios (%)	Módulo de corte (MPa)	Ângulo de fase (°)	$G^*/\text{sen}\delta$ (Pa)
ABB20	7,5	6,0	80	43	118,2
CBB20	7,5	6,0	41	34	74,3
IBB15	6,0	5,0	88	39	140,2
ABBbB	7,5	6,0	103	48	138,8
CBBbB	8,0	6,0	161	50	210,4
IBBbB	7,0	5,0	176	50	230,6

Quadro 7.8 – Módulo de corte, ângulo de fase e  $G^*/\text{sen}\delta$  das misturas da Fase 4 (frequência de 10 Hz e temperatura de 60 °C)

Mistura	Percentagem de betume (%)	Volume de vazios (%)	Módulo de corte (MPa)	Ângulo de fase (°)	$G^*/\text{sen}\delta$ (Pa)
ABB201	8,5	6,0	32	38	52,2
CBB201	8,5	6,0	40	40	61,5
IBB151	7,0	5,0	56	40	85,9
ABBbB1	8,5	6,0	37	45	61,5
CBBbB1	9,0	6,0	42	46	58,0
IBBbB1	8,0	5,0	41	42	61,0

Como apresentado nos Quadros 7.7 e 7.8, os valores do módulo de corte, do ângulo de fase e do parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  diminuiram com o aumento da percentagem de betume nas misturas estudadas.

Comparativamente, o desempenho à deformação permanente destas misturas, e também da mistura BBB, é apresentado na Figura 7.40 para rodeiras de 12,7 mm e na Figura 7.41 para rodeiras de 20,0 mm.

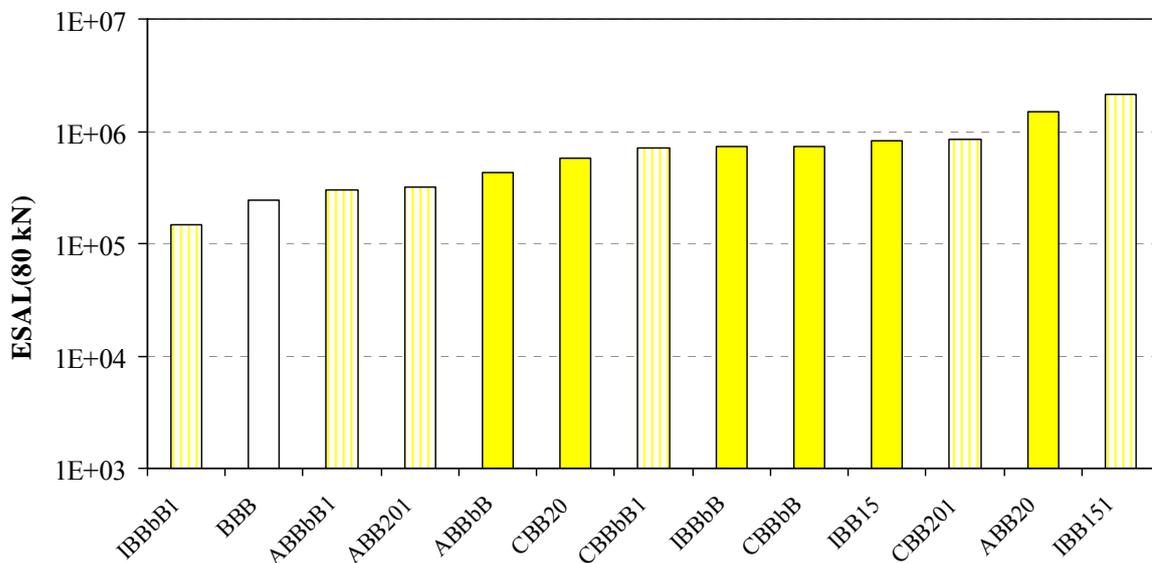


Figura 7.40 – ESAL que origina uma rodeira de 12,7 mm nas misturas

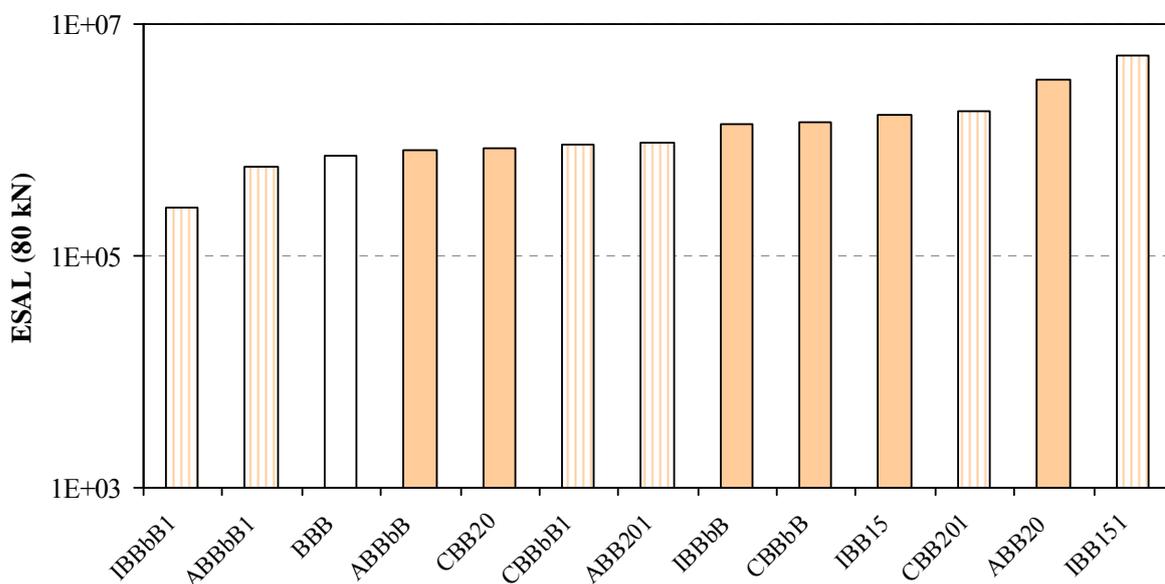


Figura 7.41 – ESAL que origina uma rodeira de 20,0 mm nas misturas

Através da análise dos resultados apresentados nos Quadros 7.7 e 7.8 e das Figuras 7.40 e 7.41, concluiu-se que:

- o aumento de 1% de betume na mistura ABB20 produziu uma diminuição do módulo de corte e também do ângulo de fase. Para as misturas ABB20 e ABB201, de acordo com os

parâmetros de  $G^*/\text{sen}\delta$ , a mistura ABB20 deveria apresentar um melhor desempenho à deformação permanente, o que foi confirmado através dos ensaios realizados;

- o aumento de 1% de betume na mistura CBB20 produziu uma pequena diminuição do módulo de corte e um aumento do ângulo de fase. Com o aumento da percentagem de betume, o parâmetro de  $G^*/\text{sen}\delta$  diminuiu. No entanto, a mistura CBB201 apresentou um melhor desempenho à deformação permanente;
- para as misturas CBBbB e CBBbB1, o aumento de 1% de betume produziu uma diminuição do módulo de corte, do ângulo de fase e de  $G^*/\text{sen}\delta$ . O desempenho à deformação permanente foi semelhante;
- nas misturas IBB15 e IBB151, o aumento da percentagem de betume promoveu uma diminuição do ângulo de fase. O módulo de corte e  $G^*/\text{sen}\delta$  diminuíram. O desempenho à deformação permanente da mistura IBB151 foi superior;
- nas misturas IBBbB e IBBbB1, o aumento da percentagem de betume promoveu uma diminuição do ângulo de fase, do módulo de corte e de  $G^*/\text{sen}\delta$ . Neste caso, o parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  indicou que desempenho à deformação permanente seria menor, pois a mistura IBBbB1 obteve uma resistência inferior;
- o aumento de 1% de betume na mistura ABBbB, denominada mistura ABBbB1 produziu uma diminuição do módulo de corte e também do ângulo de fase. A mistura ABBbB obteve um maior valor de  $G^*/\text{sen}\delta$  e também um melhor desempenho à deformação permanente.
- o parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  pode ser um bom indicador da resistência à deformação permanente, caso a percentagem de betume esteja em torno da percentagem de betume óptima ou com + 1%, como foi mostrado através do desempenho das misturas *continuous blend*;
- para as misturas *terminal blend* (CBB20 e IBB15), o acréscimo de + 1% de betume aumentou a resistência à deformação permanente, o que permite concluir que a metodologia Marshall não conduziu ao valor óptimo de betume em relação à deformação permanente.

Os parâmetros  $E^*.\text{sen}\delta$  e  $G^*/\text{sen}\delta$  podem ser bons indicativos da resistência à fadiga e à deformação permanente caso a percentagem de betume seja realmente aquele que conduz a um melhor desempenho das misturas betuminosas, o que não se verifica com a metodologia Marshall, averiguando-se a necessidade do desenvolvimento ou do emprego de outras metodologias de formulação para misturas com betume-borracha.

### 7.4. COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MISTURAS ESTUDADAS

As Figuras 7.42 e 7.43 apresentam as curvas de fadiga de todas as misturas avaliadas nesta investigação (Fases 3 e 4), podendo concluir-se que as misturas betuminosas com betume-borracha do tipo *terminal blend* (com mais 1% de betume) apresentaram uma resistência à fadiga superior às demais misturas. As misturas *continuous blend* de granulometria AI e betume base PEN 35/50, apresentam igualmente um bom desempenho.

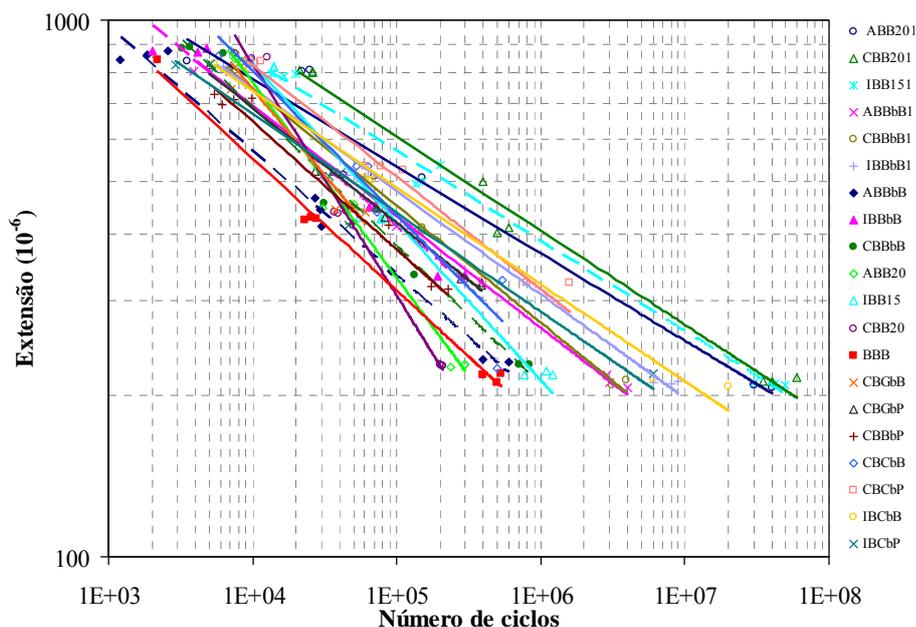


Figura 7.42 – Resultados de fadiga das misturas avaliadas na investigação

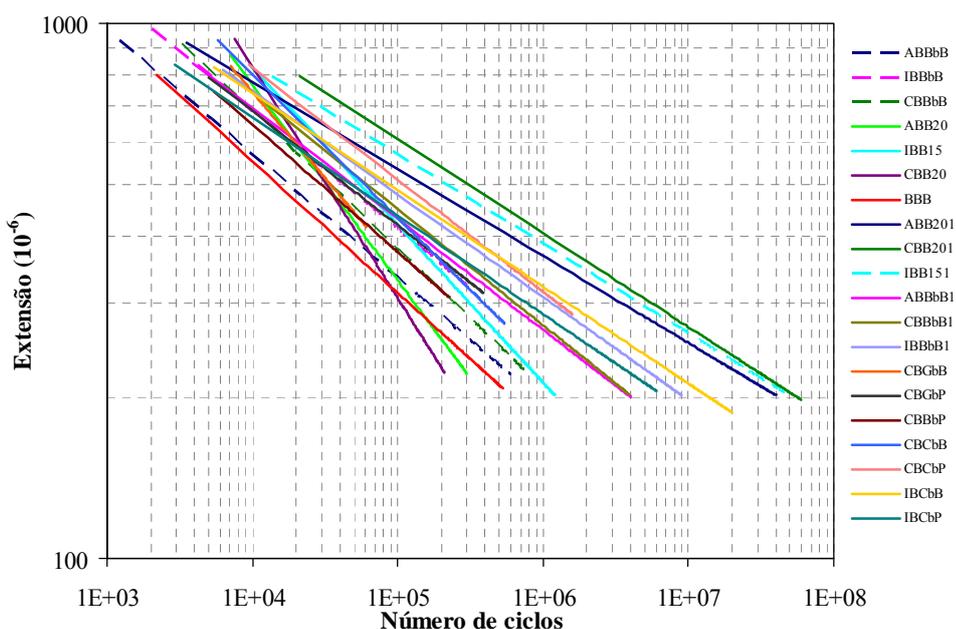


Figura 7.43 – Curvas de fadiga das misturas avaliadas na investigação

De acordo com as curvas de fadiga obtidas, as misturas brasileiras com betume-borracha do tipo *terminal blend* com melhor desempenho foram aquelas em que se procedeu o aumento da percentagem de betume em relação à percentagem óptima, definida através da metodologia Marshall, nomeadamente as misturas IBB151, CBB201 e ABB201. Dentre as misturas brasileiras do tipo *continuous blend*, a que obteve uma elevada resistência à fadiga foi a mistura IBBbB1. Em relação à mistura de referência (BBB), as misturas *continuous blend*, em geral obtiveram um desempenho mais elevado. As misturas com materiais portugueses que apresentaram uma elevada resistência à fadiga foram a IBCbP e a CBCbP. As misturas que resultaram da combinação de materiais portugueses e brasileiros com maior resistência à fadiga foram a IBCbB e a CBCbB.

De acordo com os resultados de desempenho à fadiga das misturas foi realizado um comparativo com a previsão de desempenho através dos dados obtidos de reologia dos betumes apresentados no Capítulo 6, em termos de  $G^* \cdot \sin \delta$  (na temperatura de 20 °C). A Figura 7.44 apresenta os resultados de  $G^* \cdot \sin \delta$  e a Figura 7.45, do ângulo de fase, ambos para frequências de 1 a 10 Hz, na temperatura de 20 °C.

Com base nas Figuras 7.44 e 7.45, as seguintes constatações podem ser feitas:

- os betumes BCbP, BCbB, BBbP e BGbP apresentaram o melhor desempenho à fadiga avaliado através do parâmetro  $G^* \cdot \sin \delta$ ;
- os betumes BBbB e BB15 apresentaram um desempenho médio;
- os betumes BGbB, BB e BB20 apresentaram um desempenho inferior;
- de acordo com o ângulo de fase, os betumes com uma componente viscosa maior são os betumes BGbB, BB e BB20;
- de acordo com o ângulo de fase, os betumes com componentes elásticas maiores são os betumes BCbP, BCbB, BBbP, BGbP, BBbB e BB15;
- como os resultados de desempenho à fadiga mostraram que as misturas de melhor desempenho são IBB151, CBB201 e ABB201, pode concluir-se que a granulometria *gap graded* propicia um bom desempenho à fadiga e que o betume BB20, associado à esta granulometria reflecte em um bom desempenho;
- da mesma forma, a granulometria *dense graded* com o betume BB15 apresentou uma elevada resistência à fadiga;

- as misturas com o betume BCbP apresentaram uma elevada vida de fadiga, compatível com a previsão através dos ensaios de reologia;
- a previsão de um desempenho inferior para a mistura BBB, com betume convencional BB foi confirmada através dos ensaios de reologia.

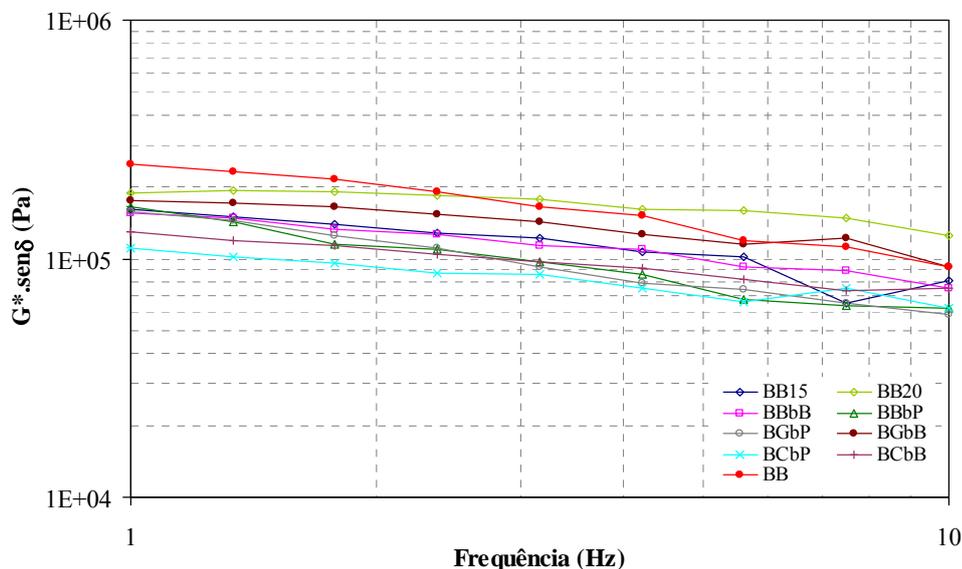


Figura 7.44 – Variação de  $G^*.sen\delta$  para frequências de 1 a 10 Hz a 20 °C

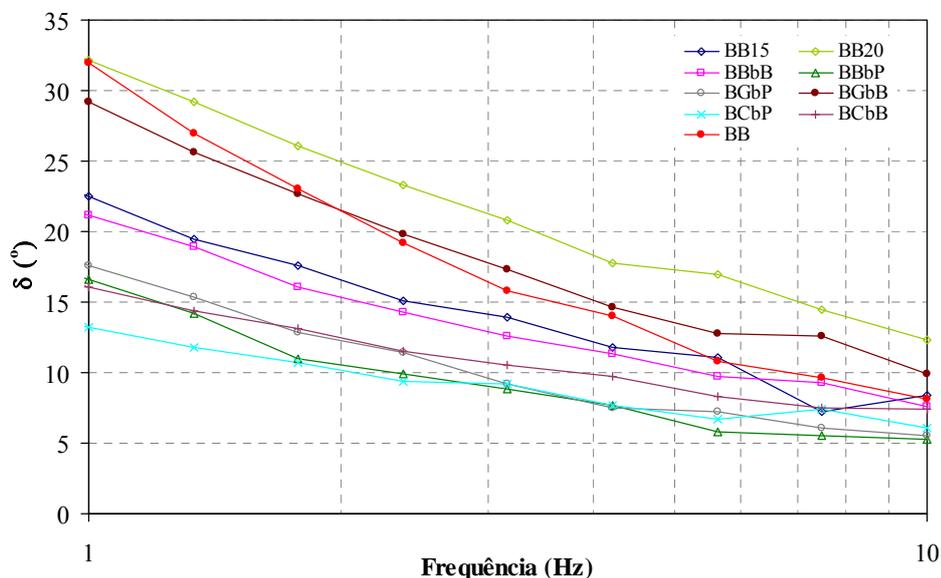


Figura 7.45 – Variação de  $\delta$  para frequências de 1 a 10 Hz a 20 °C

Relativamente à deformação permanente, as Figuras 7.46 e 7.47 apresentam os resultados de ESAL (80 kN) que originam rodeiras de 12,7 mm e 20,0 mm obtidos para todas as misturas avaliadas, respectivamente.

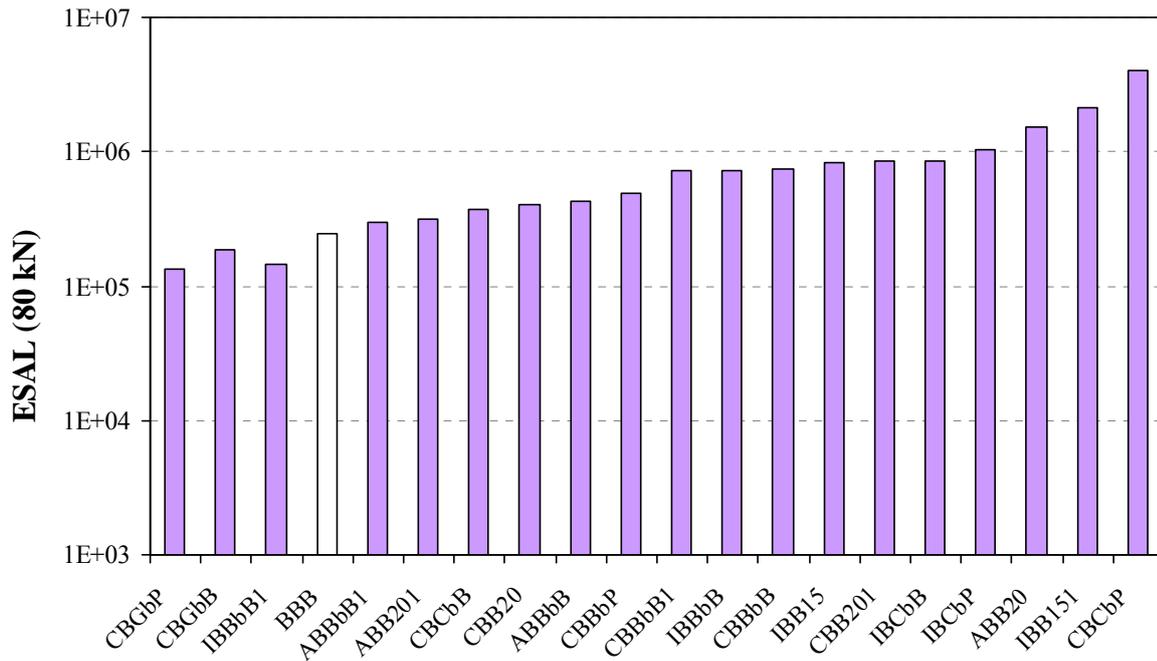


Figura 7.46 – ESAL que origina uma rodeira de 12,7 mm nas misturas avaliadas

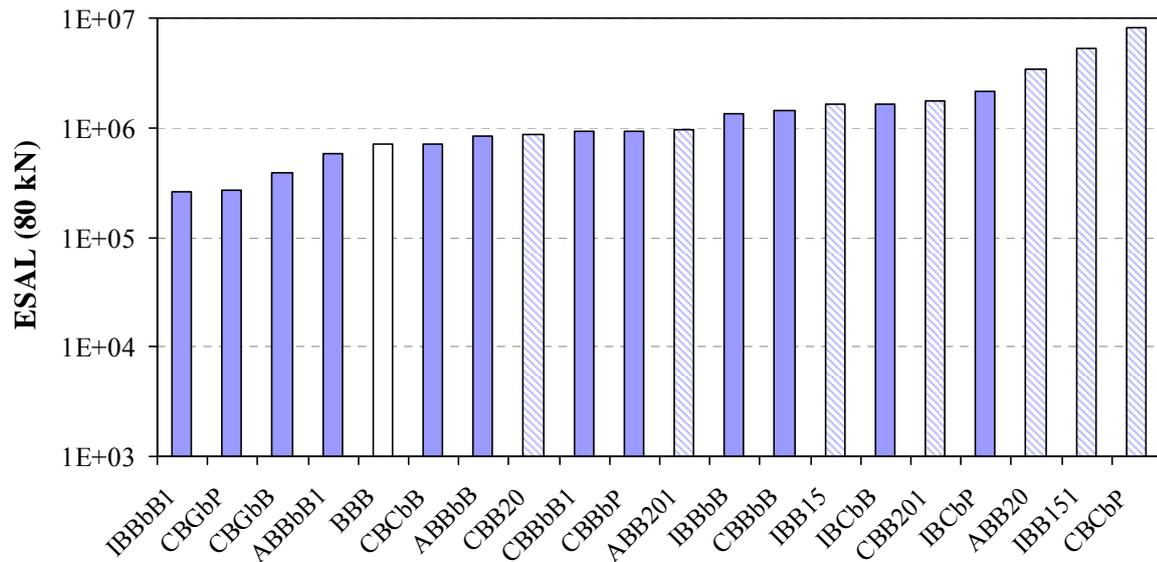


Figura 7.47 – ESAL que origina uma rodeira de 20,0 mm nas misturas avaliadas

A Figura 7.48 apresenta os resultados de  $G^*/\text{sen}\delta$  (betumes) e a Figura 7.49, do ângulo de fase ambos para frequências de 1 a 10 Hz, na temperatura de 60 °C.

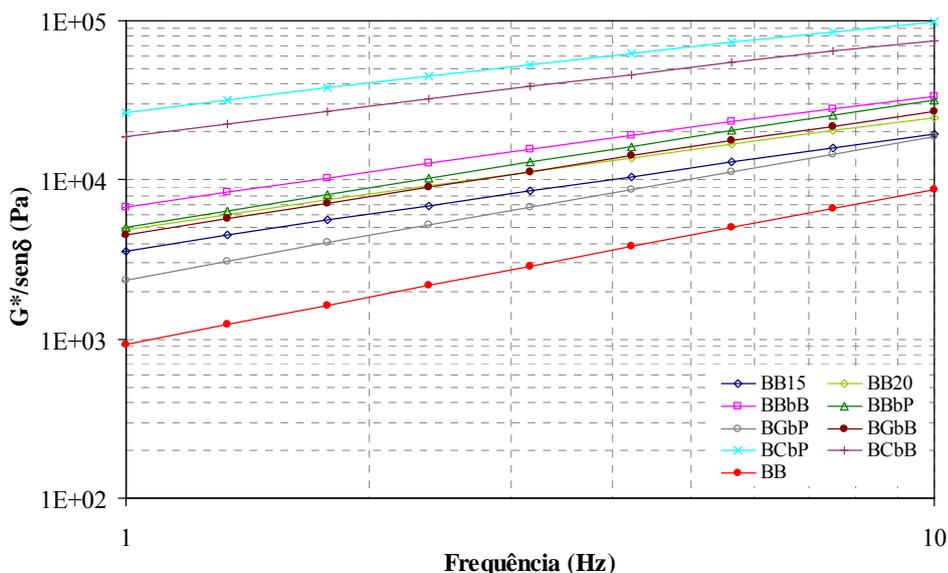


Figura 7.48 – Variação de  $G^*/\text{sen}\delta$  para frequências de 1 a 10 Hz a 60 °C

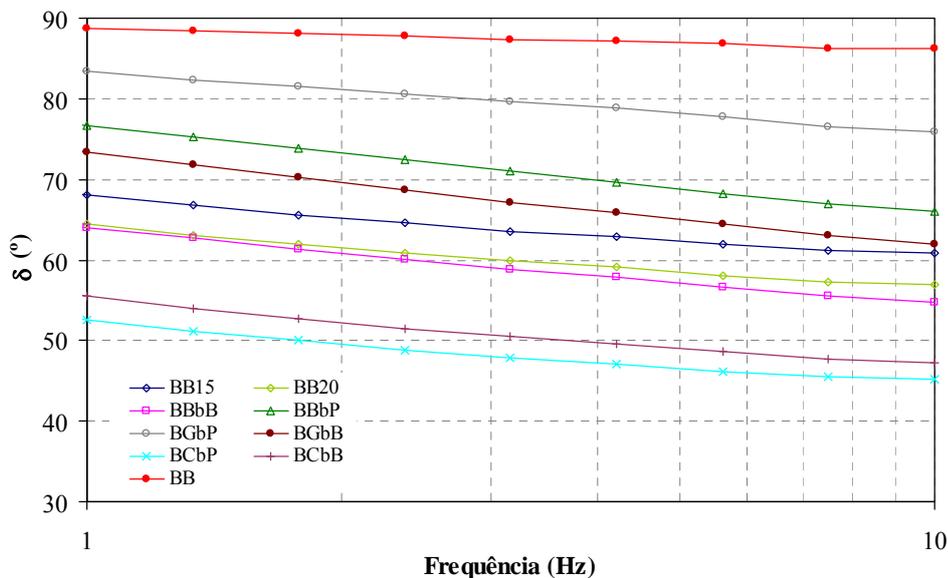


Figura 7.49 – Variação de  $\delta$  para frequências de 1 a 10 Hz a 60 °C

Com base nas Figuras 7.47, 7.48 e 7.49, as seguintes observações podem ser feitas:

- os betumes BCbP e BCbB apresentaram o melhor desempenho à deformação permanente avaliado através do parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$ , sendo o mais fraco para os betumes BGbP e BB;
- os outros betumes apresentaram um desempenho razoável, porém inferior aos betumes-borracha produzidos com um betume base mais rígido;
- a mistura de melhor desempenho à deformação permanente foi CBCbP, o que confirma a previsão de desempenho indicada pelo parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  e ainda, que misturas *gap*

*graded*, que promovem o contacto grão a grão, realmente melhoram a resistência à deformação permanente;

- a mistura IBB151, com desempenho igualmente considerável em termos de deformação permanente, leva a concluir que a utilização do betume *terminal blend* BB15 permite obter misturas com elevada resistência à deformação permanente.

Ainda em relação à resistência à deformação permanente, as misturas de melhor desempenho (Figura 7.47) foram as produzidas com betume-borracha *terminal blend* e a mistura *continuous blend* com um betume base mais rígido e granulometria *gap graded* Caltrans. Comparando a influência da granulometria com o betume-borracha PEN 35/50 e borracha portuguesa (BCbP), para as misturas CBCbP e IBCbP, a mistura *gap graded* apresentou a maior resistência à deformação permanente. Com a mesma granulometria e mesmo betume PEN 35/50 e borrachas diferentes, o desempenho das misturas IBCbP e IBCbB resultou numa maior resistência à deformação permanente para o betume-borracha com borracha criogénica (BCbP).

## 7.5. MISTURAS SELECCIONADAS NA FASE 4

Os resultados obtidos nos ensaios de desempenho (fadiga e deformação permanente) foram avaliados e comparados, sem no entanto, determinar-se a mistura de melhor desempenho, isto porque, para além da comparação de resultados de ensaios ou por extrapolação, é imprescindível que a avaliação das propriedades mecânicas seja estabelecida mediante o dimensionamento de uma estrutura de pavimento, através do qual a mistura de melhor desempenho possa ser obtida, tendo em conta a consideração conjunta das suas elevadas potencialidades quanto a resistência à fadiga, resistência à deformação permanente e seu módulo dinâmico e da sua compatibilidade com as demais camadas que compõem a estrutura do pavimento.

Considerando que o trabalho executado nesta investigação levou a um número considerável de misturas betuminosas e ensaios de desempenho, optou-se por realizar dimensionamento do somente para as misturas de melhor desempenho.

Para estas misturas, além do dimensionamento, foram realizados ensaios de deformação permanente com o simulador de tráfego *Wheel Tracking* com a finalidade de comparar os resultados obtidos entre este e o RSST-CH.

A selecção das misturas de melhor desempenho foi realizada tendo em consideração os seguintes critérios de decisão:

- tipos de granulometria (*gap graded* e *dense graded*);
- tipos de ligantes betume-borracha (*continuous* e *terminal blend*);
- análise dos resultados de fadiga e de deformação permanente.

O esquema adoptado através dos critérios de decisão é apresentado na Figura 7.50.

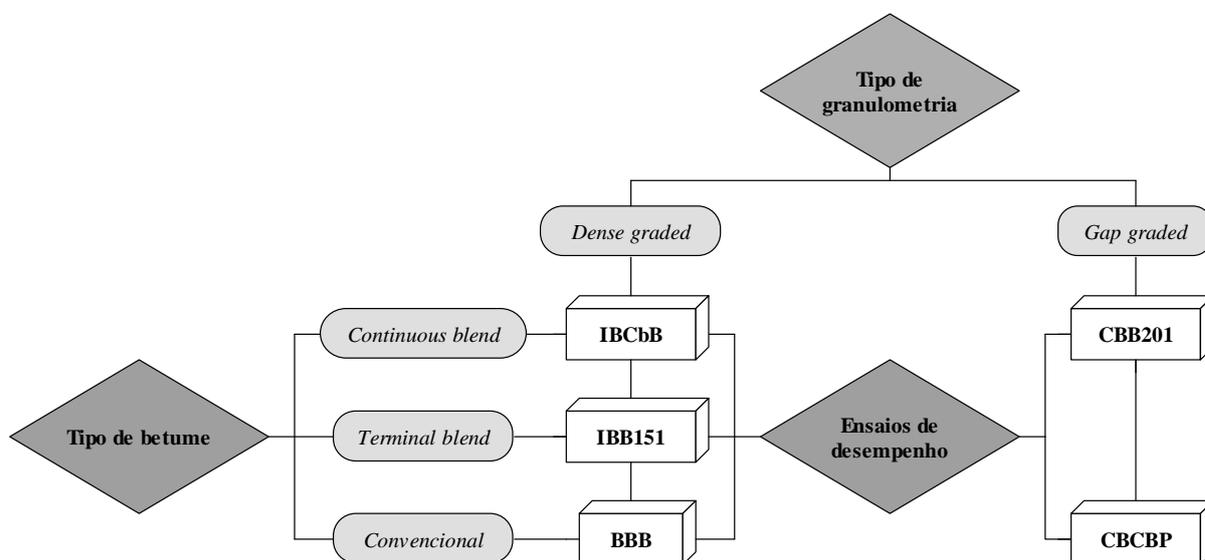


Figura 7.50 – Critérios de decisão

Relativamente à granulometria das misturas, primeiro critério de decisão, nesta investigação foram utilizadas misturas do tipo *gap graded* e *dense graded*. Por esta razão, foram seleccionadas uma mistura *gap graded* e uma mistura *dense graded*. Tendo em conta os dois sistemas para produção de betume-borracha utilizados nesta investigação, de acordo com o segundo critério de decisão, foi seleccionada uma mistura de cada sistema. O terceiro critério de decisão seleccionou as misturas que apresentaram o melhor desempenho avaliado através dos ensaios de fadiga e de deformação permanente, estando esta escolha relacionada aos critérios anteriores.

O critério de melhor desempenho das misturas foi obtido com base nos resultados apresentados na Figura 7.51, na qual as misturas seleccionadas estão marcadas com um círculo. A Figura 7.51 representa o valor da resistência à deformação permanente (ESAL, rodadeiras de 12,7 mm) em função do número de ciclos para a extensão de  $100 \times 10^{-6}$  ( $N_{100}$ ) obtido no ensaio de fadiga, para todas as misturas estudadas. A mistura BBB foi seleccionada como mistura de referência.

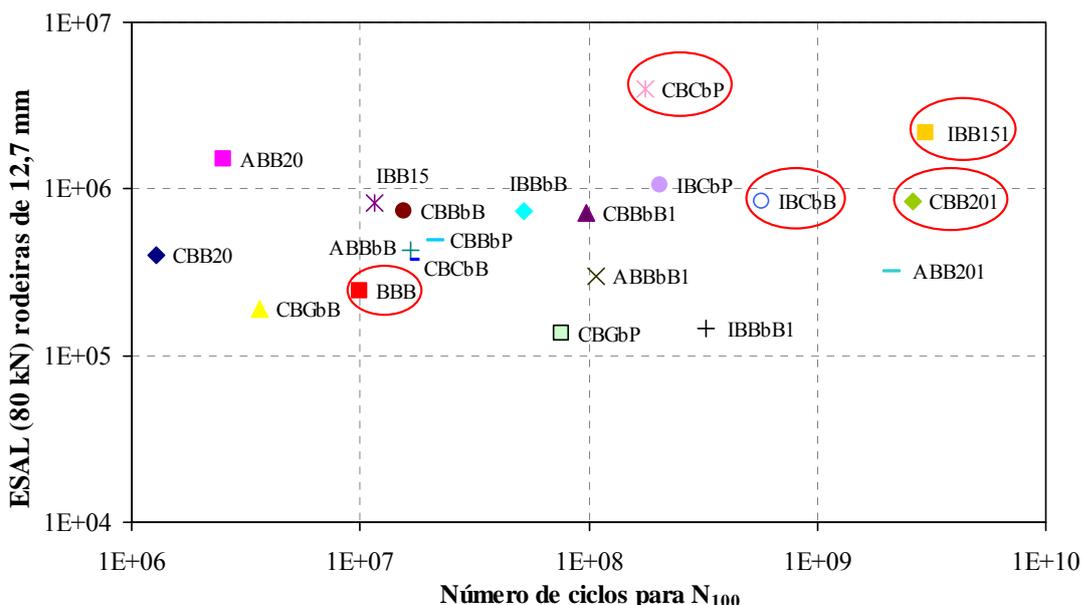


Figura 7.51 – Desempenho à fadiga e à deformação permanente das misturas estudadas

Considerando os critérios de decisão adoptados, as misturas seleccionadas na Fase 4 foram as seguintes:

- IBB151: granulometria *dense graded* do *Asphalt Institute*, betume brasileiro sistema *terminal blend* com 15% de borracha;
- IBCbB: granulometria *dense graded* do *Asphalt Institute*, betume português “C” (PEN 35/50) e borracha brasileira, sistema *continuous blend* com 17% de borracha;
- CBCbP: granulometria *gap graded* Caltrans, betume português “C” (PEN 35/50), borracha portuguesa, sistema *continuous blend* com 17% de borracha;
- CBB201: granulometria *gap graded* Caltrans, betume brasileiro sistema *terminal blend* com 20% de borracha;
- BBB: mistura de referência, granulometria *dense graded* do DNIT, Faixa “C”, betume convencional brasileiro CAP 50/70.

### 7.5.1. Ensaio *Wheel Tracking*

Os ensaios de deformação permanente com o simulador de tráfego *Wheel Tracking* foram realizados na Universidade de Coimbra de acordo com a norma espanhola NLT 173 (1984) (*Resistência a la Deformación Plástica de las Mezclas Betuminosas Mediante la pista de Ensayo de Laboratorio*).

Na investigação com *Wheel Tracking*, o provete da mistura BBB (mistura de referência) foi moldado com 8 cm de espessura. Para as outras 4 misturas seleccionadas na Fase 4, o provete foi moldado em duas etapas sendo que 3 cm da mistura BBB foram substituídos por 3 cm de misturas com betume-borracha, de modo a simular a reabilitação de uma camada de desgaste reabilitada sobre uma camada betuminosa com betume convencional.

A Figura 7.52 ilustra a configuração adoptada, tomando-se como exemplo a mistura CBCbP. As lajetas com dimensões de 300x250x80 mm foram produzidas e compactadas através do mesmo procedimento utilizado para produção das lajes desta investigação.



Figura 7.52 – Configuração adoptada das lajetas para o ensaio *Wheel Tracking*

O ensaio *Wheel Tracking* consiste em submeter as lajetas ao carregamento de uma roda móvel em determinadas condições de pressão e temperatura, medindo-se periodicamente a profundidade da deformação da rodeira produzida. Nesta investigação, a pressão utilizada foi de 500 kPa à uma frequência de 1 Hz (ida e volta), e temperatura do ensaio de 60 °C, tendo em conta ter sido esta a temperatura utilizada no ensaio de deformação permanente RSST-CH.

Antes do início do ensaio, é realizado um condicionamento da câmara de ensaio e da lajeta durante 4 horas a 60 °C. Posteriormente, procede-se à aplicação do carregamento, a velocidade constante, e medição do valor da rodeira produzida a cada minuto, sendo que o critério adoptado de interrupção de ensaio foi o tempo de 120 minutos. Os resultados são apresentados em velocidades (taxas) de deformação<sup>3</sup> verificadas entre determinados intervalos.

Os valores limites propostos pela *Dirección General de Carreteras* da Espanha (D.G. Carreteras, 2004) para análise dos resultados deste ensaio dependem da intensidade do tráfego e da zona climática. Para as condições mais desfavoráveis, correspondentes as classes de tráfego T0, T1 e zona climática quente, o valor limite considerado para a velocidade de deformação entre 105 e 120 minutos ( $v_{105/120}$ ) é de  $1,5 \times 10^{-2}$  mm/minuto. De acordo com a D.G. Carreteras, a pressão do ensaio é de 700 kPa, sendo que na Espanha o eixo padrão utilizado para o dimensionamento de pavimentos é de 130 kN.

A Figura 7.53 apresenta a evolução das rodeiras de cada mistura seleccionada, na qual se pôde observar que a deformação atingida pela mistura convencional foi superior a das misturas com betume-borracha.

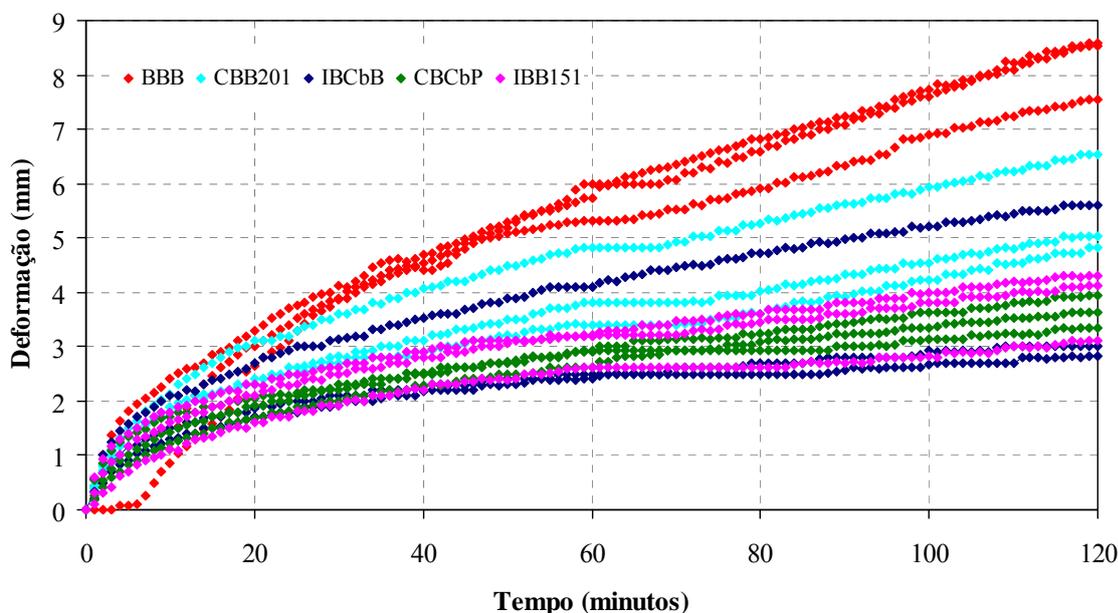


Figura 7.53 – Evolução da deformação das misturas no ensaio *Wheel Tracking*

<sup>3</sup> A velocidade de deformação corresponde à inclinação da curva Deformação *versus* Tempo.

Nesta investigação foi realizada uma comparação das velocidades de deformação de  $v_{45/60}$  (entre 45 e 60 minutos),  $v_{60/120}$  (entre 60 e 120 minutos) e  $v_{105/120}$  para as cinco misturas estudadas. O Quadro 7.9 apresenta os resultados obtidos para as velocidades de deformação de  $v_{45/60}$ ,  $v_{60/120}$  e  $v_{105/120}$ , enquanto que as Figuras 7.54, 7.55 e 7.56 ilustram as velocidades de deformação ( $v_{45/60}$ ,  $v_{60/120}$  e  $v_{105/120}$ ) das misturas e o ponto de amolecimento dos betumes.

Quadro 7.9 – Velocidades de deformação de  $v_{45/60}$ ,  $v_{60/120}$  e  $v_{105/120}$

Mistura	$v_{45/60}$ (mm/minuto)	$v_{60/120}$ (mm/minuto)	$v_{105/120}$ (mm/minuto)
BBB	$5,18 \times 10^{-2}$	$4,24 \times 10^{-2}$	$4,00 \times 10^{-2}$
IBB151	$1,49 \times 10^{-2}$	$1,40 \times 10^{-2}$	$1,38 \times 10^{-2}$
CBCbP	$1,84 \times 10^{-2}$	$1,37 \times 10^{-2}$	$1,20 \times 10^{-2}$
CBB201	$3,29 \times 10^{-2}$	$2,41 \times 10^{-2}$	$2,60 \times 10^{-2}$
IBCbB	$1,84 \times 10^{-2}$	$1,34 \times 10^{-2}$	$1,16 \times 10^{-2}$

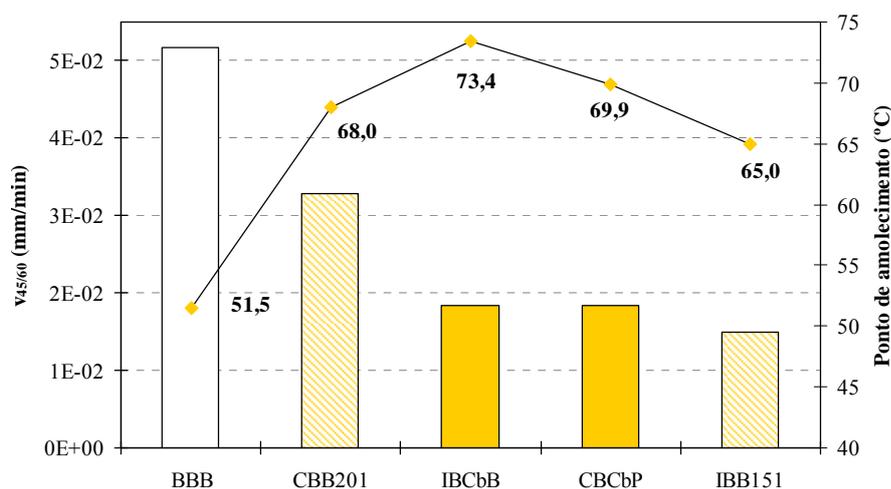


Figura 7.54 – Velocidade de deformação  $v_{45/60}$  e ponto de amolecimento

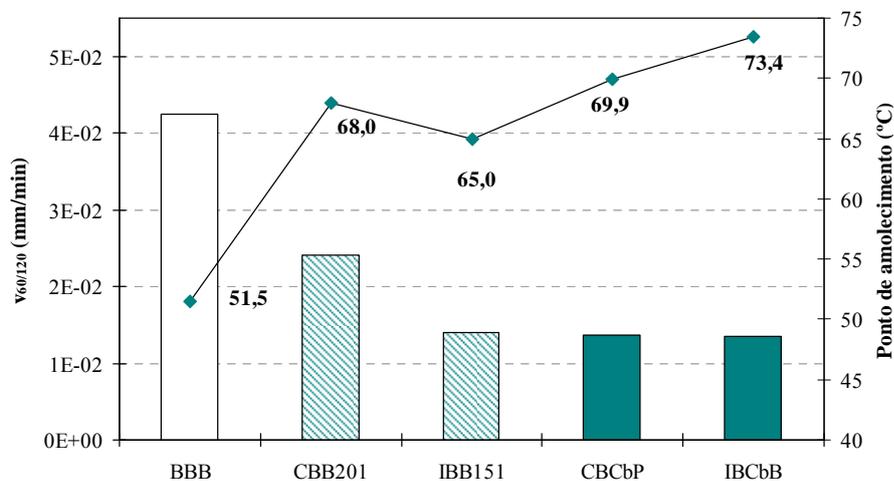


Figura 7.55 – Velocidade de deformação  $v_{60/120}$  e ponto de amolecimento

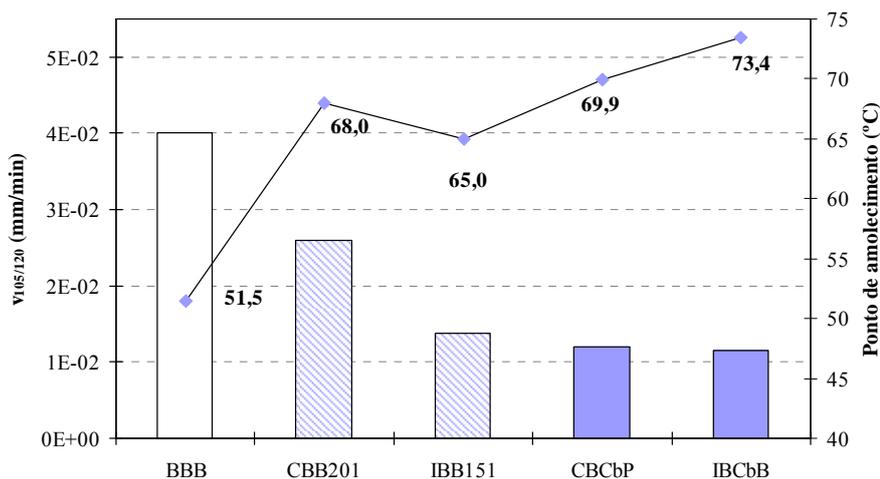


Figura 7.56 – Velocidade de deformação  $v_{105/120}$  e ponto de amolecimento

Os resultados obtidos mostram que a mistura BBB apresenta uma elevada taxa de velocidade de deformação e que de acordo com D.G. Carreteras (2004) inviabilizaria o seu emprego em camadas de desgaste.

Por outro lado, a substituição nas lajetas de parte da mistura BBB por misturas com betume-borracha mostrou uma significativa redução na deformação permanente total da lajeta, como pode ser observado no Quadro 7.9. Como exemplo, na velocidade de deformação  $v_{60/120}$ , para a lajeta com a mistura IBB151 a taxa da velocidade de deformação passou de  $4,24 \times 10^{-2}$  (da mistura BBB) para  $1,40 \times 10^{-2}$ , representando uma redução de 67% na deformação. Se espera que caso a lajeta fosse todo produzida com a mistura IBB151, a velocidade de deformação seria ainda menor e que, portanto, esta mistura atenderia ao preconizado de D.G. Carreteras (2004).

Os ensaios de deformação permanente (RSST-CH e *Wheel Tracking*) foram realizados na temperatura de 60 °C, sendo este o valor recomendado pela norma utilizada e ainda, de referência em ensaios de deformação permanente comumente utilizados no Brasil e também o preconizado pela norma espanhola NLT 173 (1984).

Considerando que o pavimento dimensionado esteja locado na região da Grande Florianópolis (Sul do Brasil), foram levantados os dados de temperatura do ar de 30 anos, e latitude local e aplicados na Equação 3.2, para estabelecer a temperatura máxima atingida na espessura de 20 mm da camada betuminosa. O valor encontrado foi de 52 °C. Desta forma, os ensaios de

deformação permanente, realizados na temperatura de 60 °C, são um pouco severos para a região, com uma temperatura máxima de 52 °C.

## 7.6. ENSAIOS COMPLEMENTARES

### Escorrimento

Para cada mistura ensaiada, as características de escorrimento (*Draindown Test*, AASHTO T 305, 1997), foram determinadas a duas temperaturas, sendo a primeira temperatura de produção da mistura e a segunda a mais 15 °C, considerando que na primeira temperatura não houve escorrimento do betume. Assim, foram realizados ensaios às temperaturas de 175 °C e 190 °C. O tempo de permanência em estufa foi de 120 minutos.

Mesmo para as misturas produzidas com mais 1% de betume, nenhuma mistura apresentou valor de escorrimento superior a 0,7 g. Assim, as misturas com betume-borracha não apresentam problemas relativos ao escorrimento durante o transporte, armazenagem ou espalhamento.

### Adesividade

O resultado (visual) do ensaio de adesividade (DNER ME 078, 1994) é ilustrado na Figura 7.57, na qual, comparou-se uma percentagem de 9,0% de betume-borracha com a percentagem de 5,5% de betume convencional (BB).



(a) betume convencional (5,5%)      (b) betume-borracha (9,0%)

Figura 7.57 – Comparação visual entre a adesividade dos betumes ao agregado

A análise visual mostrou que mesmo para elevadas percentagens de betume-borracha, não houve descolagem da película do ligante. A comparação foi realizada com o betume convencional CAP 50/70 (BB), que se mostrou com muita sensibilidade à presença da água.

### Macrotextura

O ensaio de mancha de areia (ASTM E 965, 1996) foi realizado sobre as lajes produzidas em laboratório, antes dos ensaios de módulo e de fadiga. A Figura 7.58 apresenta os resultados de altura de areia obtidos nas misturas estudadas nesta fase da investigação.

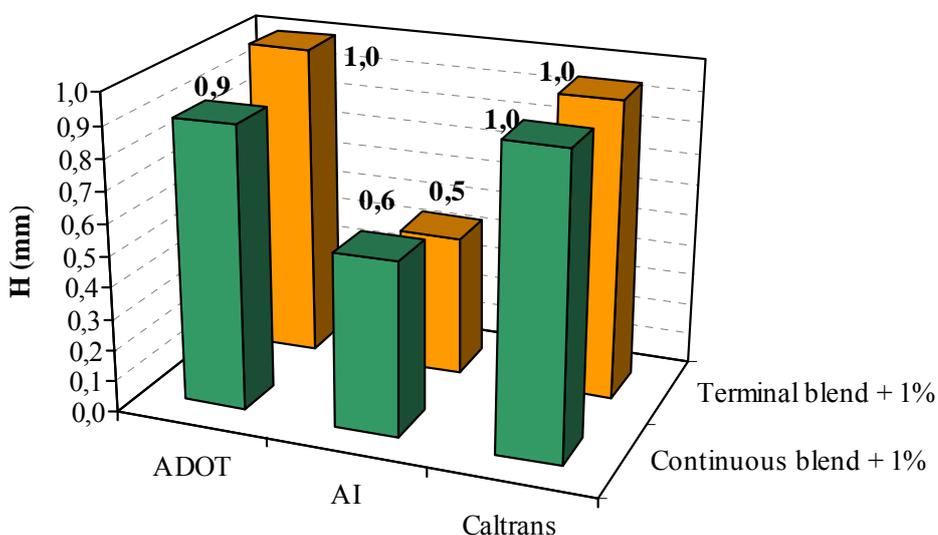


Figura 7.58 – Resultados dos ensaios de mancha de areia das misturas da Fase 4

As misturas *dense graded* apresentaram um valor baixo de macrotextura, independente do tipo de betume-borracha. As misturas do tipo *terminal blend* com granulometria *gap graded* apresentaram um valor mais elevado de macrotextura em relação às misturas *continuous blend*.

### Microtextura

A microtextura foi avaliada através do Pêndulo Britânico (ASTM D 303, 1993) sendo os resultados expressos pelo valor no BPN (*British Pendulum Number*). Os resultados obtidos para as misturas da Fase 4 são apresentados na Figura 7.59.

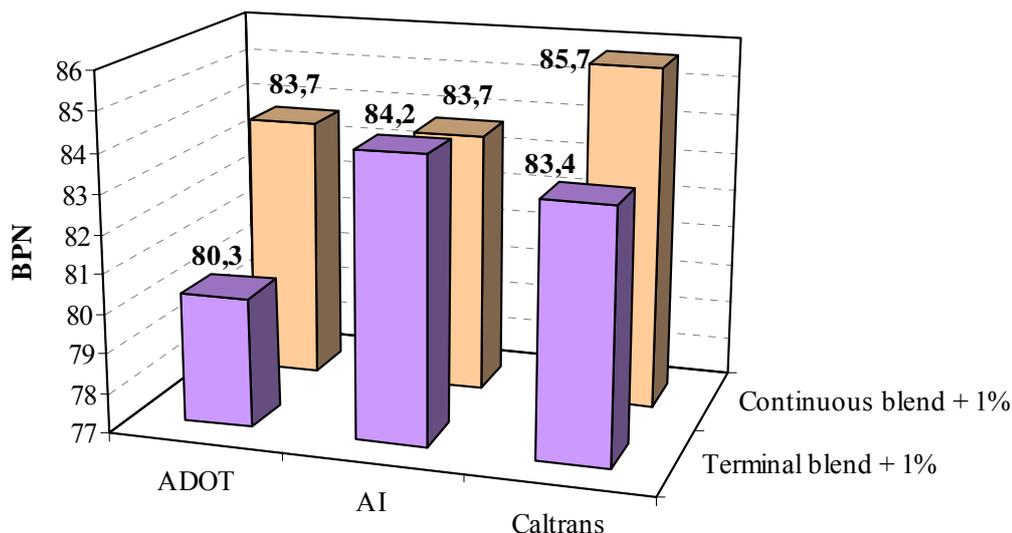


Figura 7.59 – Microtextura das misturas da Fase 4

As misturas *continuous blend* com granulometria *gap graded* apresentaram uma microtextura superior em relação às misturas *terminal blend* com mesma granulometria. Para as misturas *dense graded AI*, a mistura *terminal blend* apresentou uma macrotextura um pouco superior à mistura *continuous blend*.

### Índice de Atrito Internacional

Para todas as texturas medidas das misturas betuminosas foi calculado o Índice de Atrito (Fricção) Internacional (IFI). O Quadro 7.10 apresenta as medidas de textura (Tx) obtidas com a mancha de areia, de atrito (FRS) obtida com o pêndulo britânico e os valores obtidos do IFI para as misturas estudadas na Fase 4.

Quadro 7.10 – Valores do IFI das misturas da Fase 4

Misturas	Tx (mm) (mancha)	Classificação <sup>(i)</sup>	FRS (BPN) (pêndulo)	Classificação <sup>(ii)</sup>	IFI	
					Sp	F <sub>60</sub>
ABB201	1,0	Grossa	80,3	Muito rugosa	102,0	0,45
ABBbB1	0,9	Grossa	83,7	Muito rugosa	90,4	0,44
IBB151	0,5	Média	84,2	Muito rugosa	45,2	0,28
IBBbB1	0,6	Média	83,7	Muito rugosa	56,6	0,33
CBB201	1,0	Grossa	83,4	Muito rugosa	102,0	0,46
CBBbB1	1,0	Grossa	85,7	Muito rugosa	102,0	0,48

Observações referentes ao Quadro 7.10:

(i) DNIT (2006);

(ii) ABPv (1999).

A partir do IFI pode representar-se as curvas de referência de cada mistura betuminosa, a qualquer velocidade de deslizamento. A Figura 7.60 apresenta as curvas de referência das misturas estudadas na Fase 4 e a mistura convencional de referência (BBB).

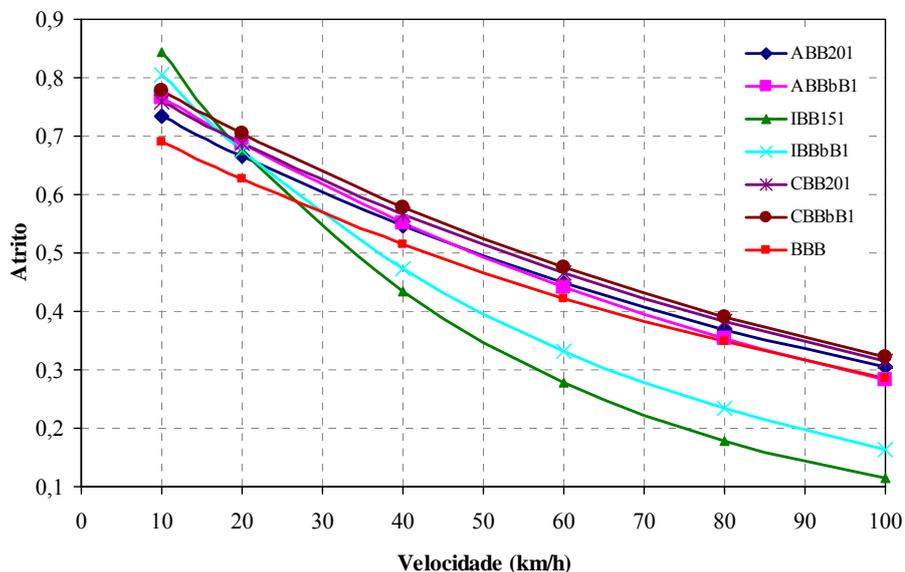


Figura 7.60 – Curvas de referência das misturas da Fase 4

Os resultados obtidos na Figura 7.60 mostraram-se semelhantes aos determinados para as misturas com a percentagem de betume óptima (Figura 6.129), ou seja, as misturas *gap graded* com betume-borracha possuem um atrito mais elevado a elevadas velocidades em comparação com as misturas *dense graded* com betume-borracha.

As misturas *dense graded* com betume-borracha apresentaram menor atrito do que a mistura *dense graded* com betume convencional. A mistura *dense graded* com betume *terminal blend* apresentou um valor de IFI inferior à mistura com a mesma granulometria e betume *continuous blend*.

A comparação entre as misturas com a percentagem de betume óptima e com mais 1% de betume e a mistura convencional é apresentada na Figura 7.61.

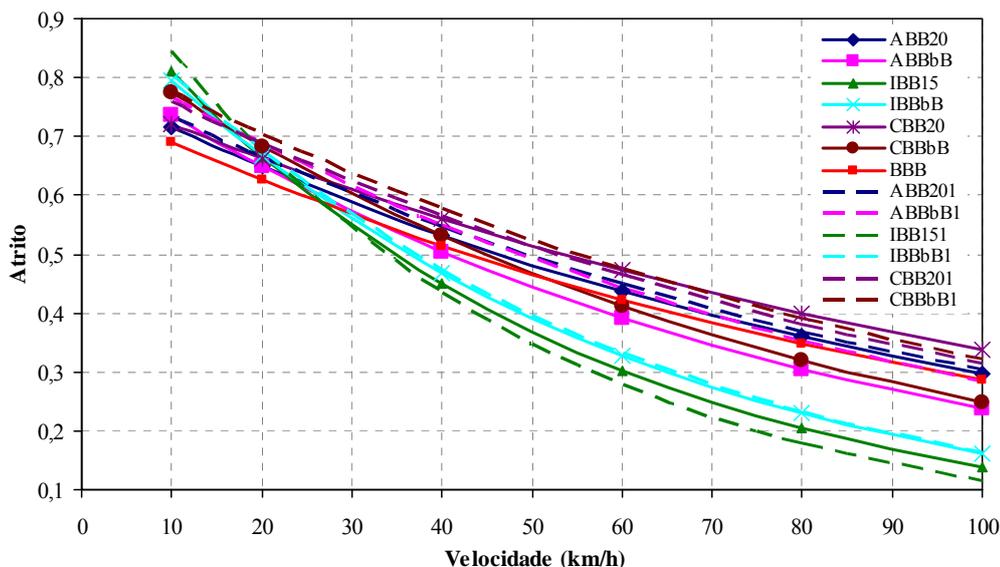


Figura 7.61 – Comparativo entre as curvas de referência das misturas

De acordo com a Figura 7.61, pode-se observar que a elevadas velocidades:

- em geral, as misturas *gap graded* com betume *terminal blend* apresentaram um IFI superior às misturas de mesma granulometria com betume *continuous blend*. Este facto só não foi observado para a mistura *gap graded* com betume *continuous blend* CBBbB1;
- o acréscimo de 1% de betume não reduziu o valor do IFI para as misturas *gap graded* CBBbB1, ABB201 e ABBbB1;
- as misturas *dense graded* com granulometria AI e betume *continuous blend* obtiveram o mesmo valor de IFI para as duas percentagens de betume (óptima e com mais 1%);
- as misturas *dense graded* com a granulometria AI, independente do tipo e da percentagem de betume, obtiveram os valores de IFI inferiores em relação às mistura *gap graded* e à mistura convencional (BBB);
- as misturas de pior desempenho relativamente ao atrito foram as misturas *dense graded* com a granulometria AI, produzidas com betume-borracha *terminal blend* (IBB15 e IBB151). No caso destas misturas, o aumento de 1% na percentagem de betume reduziu o valor do IFI.

Relativamente à microtextura, todas as misturas apresentaram uma textura muito rugosa. Até velocidades de 50 km/h, todas as misturas estão classificadas com o valor do IFI ( $F_{60}$ ) como óptimo (superiores a 0,35, de acordo com Aps, 2006).

No entanto, para altas velocidades, na qual a parcela de contribuição do atrito está relacionada com a macrotextura, as superfícies grossas são desejáveis. Apesar que, através dos resultados de mancha de areia, a superfície das misturas com granulometria AI e betume-borracha (IBB15, IBB151, IBBbB e IBBbB1) foram classificadas como média, este valor isolado não assegurou a previsão de um desempenho satisfatório em relação ao atrito a elevadas velocidades.

De acordo com os resultados do IFI (Figura 7.61), as misturas produzidas foram classificadas em relação ao atrito, através dos limites estabelecidos por Aps (2006), como:

- até 70 km/h, todas as misturas possuem a classificação de muito bom a óptimo;
- o atrito a 100 km/h, para as misturas CBB20, CBBbB1, CBB201, ABB201, ABB20, BBB, ABBbB1, CBBbB e ABBbB, possuem a classificação muito bom;
- o atrito entre 70 e 80 km/h, para as misturas IBBbB e IBBbB1, possuem a classificação muito bom e, a partir daí até 100 km/h, a classificação do atrito é bom;
- o atrito entre 70 e 80 km/h, para as misturas IBB15 e IBB151, possuem a classificação bom e, a partir daí até 100 km/h, a classificação do atrito é regular.

Tendo em conta que os ensaios foram realizados em lajes produzidas em laboratório, os valores de atrito, quando medidos em campo podem ser superiores. No entanto, a partir dos resultados obtidos, as misturas *dense graded* com betume-borracha, independente da percentagem de betume, possuem um atrito baixo a elevadas velocidades.

## **7.7. DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO**

### **7.7.1. Introdução**

O dimensionamento da estrutura de um pavimento tem como objectivo o cálculo de espessuras e a escolha de materiais de forma que a vida útil do mesmo corresponda a um certo número projectado de solicitações de carga, tendo em conta determinados estados limites de utilização, de forma económica. Assim, além da avaliação da estrutura é necessário ainda realizar uma análise de custo benefício da estrutura projectada.

Apesar do processo de dimensionamento parecer simples, a sua aplicação a pavimentos rodoviários é complexa devida principalmente a dificuldade de estimativas confiáveis de factores como: (i) volume e magnitude do tráfego incidente; (ii) interferência das condições climáticas; (iii) caracterização mecânica dos materiais constituintes; (iv) comportamento mecânico dos materiais ao longo do período de projecto; (v) ausência de metodologia adequada de dimensionamento; (vi) factores ligados ao projecto executivo; (vii) gestão da manutenção da rodovia.

Os procedimentos adoptados pelos métodos de dimensionamento empíricos tiveram início através de experiência de campo, com base na observação do desempenho de pavimentos ao longo do tempo. Posteriormente, foram desenvolvidos os métodos empírico-mecanicistas que permitem a análise do estado de tensão e deformação ao qual o conjunto pavimento-solo de fundação está submetido. Os modelos de cálculo dos métodos empírico-mecanicistas baseiam-se na teoria da elasticidade admitindo comportamento linear ou não linear das camadas do pavimento.

No Brasil, comumente tem sido utilizados métodos empírico ou empírico-mecanicistas para o dimensionamento de pavimentos flexíveis. Entretanto, a partir da década de 80 do século passado, com o desenvolvimento de programas computacionais para a análise tensão e deformação de sistemas em camadas, a popularização dos computadores pessoais e a capacitação de laboratórios para a realização de ensaios representativos das condições de campo, a análise mecanicista passou a ser contemplada objectivando a melhoria do dimensionamento da estrutura projectada.

De facto, os métodos empírico-mecanicistas podem ser completados, contudo, por análises que permitam considerar, no dimensionamento de pavimentos novos, o fendilhamento por fadiga das camadas betuminosas através da aplicação de modelos de previsão de desempenho do tipo mecanicistas. Uma outra vantagem desses modelos, em relação àqueles puramente empíricos é a possibilidade de se otimizar o dimensionamento da estrutura, tomando-se partido da capacidade de cada camada em resistir aos processos de degradação provocados pelas cargas do tráfego. No caso de projectos de reabilitação, o dimensionamento das camadas betuminosas de reforço contra a propagação de fendas e a consideração dos efeitos de camadas especiais intermediárias podem ser efectuados de forma confiável apenas por meio de modelos mecanicistas (DNIT, 2006).

No âmbito desta investigação foi realizado o dimensionamento de uma estrutura de pavimento flexível para dois tipos de tráfego para se poder avaliar o impacto da adopção de camadas de desgaste confeccionadas com betume-borracha em substituição às misturas convencionais. Um tráfego médio,  $N$  igual a  $10^7$  solicitações equivalentes ao eixo padrão de 80 kN (calculados de acordo com a metodologia do *United States Army Corps of Engineers* – USACE), e outro pesado,  $N$  igual a  $10^8$  solicitações do eixo padrão (80 kN) foram utilizados no dimensionamento.

A estrutura do pavimento para os dois tráfegos foi dimensionada pelo método empírico do DNIT, DNER/81, empregado no Brasil. O uso desta metodologia teve como objectivo meramente de fornecer uma estrutura inicial para a posterior análise empírico-mecanicista das estruturas, a qual foi realizada utilizando-se o programa BISAR 3.0.

### 7.7.2. Método empírico do DNIT (DNER/81)

#### Descrição da Metodologia

O método de dimensionamento empírico mais utilizado no Brasil é o método do DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, actual DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes), desenvolvido pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza e tem como base a metodologia do *United States Army Corps of Engineers* (USACE), e nos resultados obtidos na pista experimental da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) que visam a protecção do solo de fundação (subleito) contra a geração de deformações plásticas excessivas durante o período de projecto.

A capacidade de suporte dos solos e dos materiais granulares é obtida através do Índice de Suporte Califórnia (CBR<sup>4</sup>) de acordo com a norma DNER – ME 049 (1994), sendo estes resultados representativos da condição *in-situ* da resistência destes materiais. Durante o dimensionamento, o método DNER/81 pode ser completado por análises que permitam considerar, no dimensionamento, o problema do fendilhamento por fadiga das camadas asfálticas nos pavimentos flexíveis, caso dos métodos empírico-mecanicistas.

---

<sup>4</sup> CBR – California Bearing Ratio.

O primeiro passo no dimensionamento através do método DNER/81 consiste no levantamento do tráfego e a determinação do parâmetro de tráfego (N – número equivalente de operações de um eixo tomado como padrão), durante o período de projecto escolhido.

Sobre as estradas circulam cargas, configurações de eixo e combinações de pneus diferentes, de modo que foi estabelecido um eixo de referência que é utilizado para a conversão de todo o universo de eixos e cargas em um número equivalente de repetições deste eixo. Foi então escolhido o eixo simples padrão de 80 kN (8,2 tf) e pressão de pneu de 5,6 kgf/cm<sup>2</sup>. Para o dimensionamento da estrutura de um pavimento é necessário determinar o valor de N, que é o número de repetições do eixo simples padrão (ESP) durante a vida de projecto de "t" anos, calculado através da Equação 7.2:

$$N = 365 \times \text{VMD} \times t \times \text{FV} \times \text{FR} \quad (7.2)$$

onde:

N = número de repetições do eixo simples padrão de 80 kN;

VMD = volume médio diário de veículos que passa na faixa da via mais solicitada;

t = período de projecto (anos);

FV = factor de veículos;

FR = factor climático regional.

O FV é obtido em função do factor de carga (FC) e do factor de eixos (FE), como apresentado na Equação 7.3:

$$\text{FV} = \text{FC} \times \text{FE} \quad (7.3)$$

O volume médio diário de veículos (VMD) é determinado para o ano de abertura e projectada uma taxa de crescimento para todo o período de projecto. Faz-se uma contagem do tráfego na estrada que se está considerando através da contagem do número total de eixos e pesam-se todos esses eixos, excepto para os veículos de passeio. FE é um factor de eixos, isto é, um número que, multiplicado pelo número de veículos, dá o número de eixos correspondentes. FC é um factor de carga, ou seja, um número que, multiplicado pelo número de eixos que operam, dá o número de eixos equivalentes ao eixo padrão. Assim, o FV é um factor de veículo, um número que multiplicado pelo número de veículos que operam, fornece, directamente, o número de eixos equivalentes ao eixo padrão.

O segundo passo do dimensionamento trata da avaliação da capacidade de suporte dos materiais componentes do pavimento base, sub-base, reforço do solo de fundação e solo de fundação, que compreendem as camadas granulares e os solos, através do CBR. Neste método, são adoptados coeficientes de equivalência estrutural obtidos na pista experimental da AASHTO, como por exemplo  $K = 1$  para camadas granulares e  $K = 2$  para camadas com concreto betuminoso ou mistura betuminosa).

O método estabelece ainda determinadas exigências no respeitante à qualidade dos materiais empregues no pavimento através da fixação de valores mínimos de CBR das camadas de reforço do solo de fundação, de sub-base e de base. Através dos valores de  $N$  e o CBR dos materiais (camadas granulares e solos), o método DNER/81 estabelece a metodologia de cálculo a seguir apresentada.

#### **(i) espessura total do pavimento ( $H_t$ )**

A espessura total do pavimento, em função de  $N$  e do CBR do solo de fundação é dada pela Equação 7.4:

$$H_m = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR_{SF}^{-0,598} \quad (7.4)$$

onde:

$H_t$  = espessura total do pavimento necessária para proteger o solo de fundação com  $CBR_{SF}$ ;

$N$  = número de repetições do eixo simples padrão de 80 kN durante a vida de projecto;

$CBR_{SF}$  = Índice de Suporte Califórnia do solo de fundação.

Esta espessura é calculada em termos de material com  $K = 1$ , ou seja, em termos de base granular. No caso de ocorrência de materiais com  $CBR_{SF}$  inferior a 2 deve-se fazer a substituição, na espessura de, pelo menos, 1 metro, por material com CBR superior a 2.

#### **(ii) espessura mínima do revestimento ( $R$ )**

A da espessura mínima dos revestimentos betuminosos neste método depende do número  $N$  (Quadro 7.11) e visa proteger a camada de base dos esforços impostos pelo tráfego e evitar a rotura do próprio revestimento por esforços repetidos de tracção.

Quadro 7.11 – Espessura mínima do revestimento

N	Espessura mínima do revestimento betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

A espessura construtiva mínima das camadas granulares é de 15 cm. A Figura 7.62 apresenta simbologia utilizada no dimensionamento do pavimento.

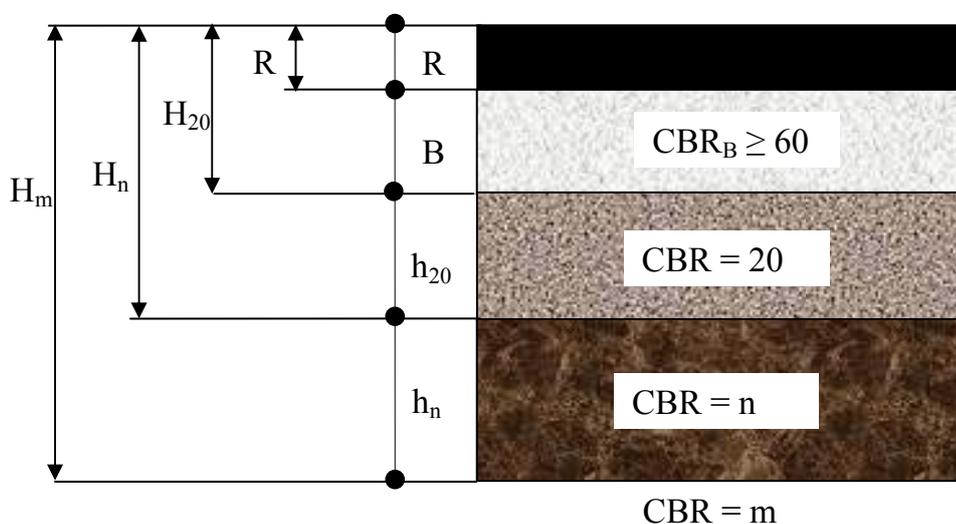


Figura 7.62 – Simbologia adotada no método DNER/81

Na Figura 7.62, a simbologia adotada representa o seguinte:

- $H_m$  designa a espessura total de pavimento necessário para proteger um material com  $CBR = m$ ;
- $h_n$  representa a espessura de camada do pavimento com  $CBR = n$ ;
- $H_{20}$  caracteriza a espessura de pavimento sobre a sub-base. Mesmo que o CBR da sub-base seja superior a 20, a espessura do pavimento necessário para protegê-la é determinada como se esse valor fosse 20 e, por esta razão, usam-se sempre os símbolos,  $H_{20}$  e  $h_{20}$  para designar as espessuras de pavimento sobre sub-base e a espessura de sub-base, respectivamente;
- os símbolos B e R designam, respectivamente, as espessuras de base e de revestimento.

Uma vez determinadas as espessuras  $H_m$ ,  $H_n$ ,  $H_{20}$ , através da Equação 7.4, e de  $R$  pelo Quadro 7.11, as espessuras de base ( $B$ ), sub-base ( $h_{20}$ ) e reforço do solo de fundação ( $h_n$ ), são obtidas pela resolução sucessiva das seguintes inequações:

$$RK_r + BK_b \geq H_{20} \tag{i}$$

$$RK_r + BK_b + h_{20}K_S \geq H_n \tag{ii}$$

$$RK_r + BK_b + h_{20}K_S + h_nK_{rev} \geq H_m \tag{iii}$$

Quando o CBR da sub-base for maior ou igual a 40 e para  $N \leq 10^6$ , admite-se substituir na inequação (i),  $H_{20}$  por  $0,8xH_{20}$ . Para  $N > 10^7$ , recomenda-se substituir, na inequação (i),  $H_{20}$  por  $1,2xH_{20}$ .

### Dimensionamento das estruturas

O dimensionamento da estrutura do pavimento foi realizado para as misturas seleccionadas na Fase 4 e considerando-se um factor de equivalência estrutural ( $k$ ) igual a 2. Para o tráfego médio ( $N = 10^7$ ) e tráfego pesado ( $N = 10^8$ ), o dimensionamento resultou nas estruturas apresentadas nas Figuras 7.63 e 7.64, respectivamente.



Figura 7.63 – Estrutura dimensionada pelo método DNER/81 para  $N = 10^7$

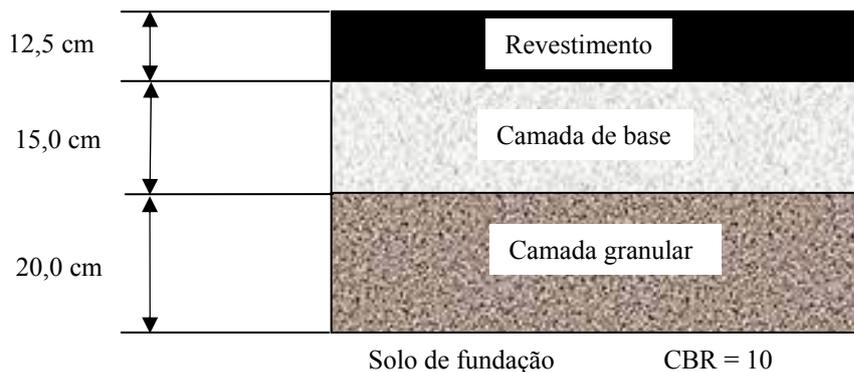


Figura 7.64 – Estrutura dimensionada pelo método DNER/81 para  $N = 10^8$

### 7.7.3. Análise empírico-mecanicista

Nos métodos empírico-mecanicistas as degradações consideradas preponderantes para o dimensionamento de pavimentos flexíveis novos são o fendilhamento por fadiga das camadas betuminosas (devido ao tráfego e às acções climáticas) e a deformações permanentes das camadas inferiores.

Na análise empírico-mecanicista de uma estrutura de pavimento os principais parâmetros avaliados são os seguintes, apresentados na Figura 7.65: (i) deformação de tracção ( $\epsilon_t$ ) na fibra inferior da camada betuminosa, para controlo do fendilhamento por fadiga; (ii) estado de tensão no topo da camada de base, importante em estruturas com revestimento delgados para se controlar a rotura por corte; (iii) tensão ( $\sigma_v$ ) ou deformação vertical ( $\epsilon_v$ ) no topo do solo de fundação para controlo da deformação permanente.

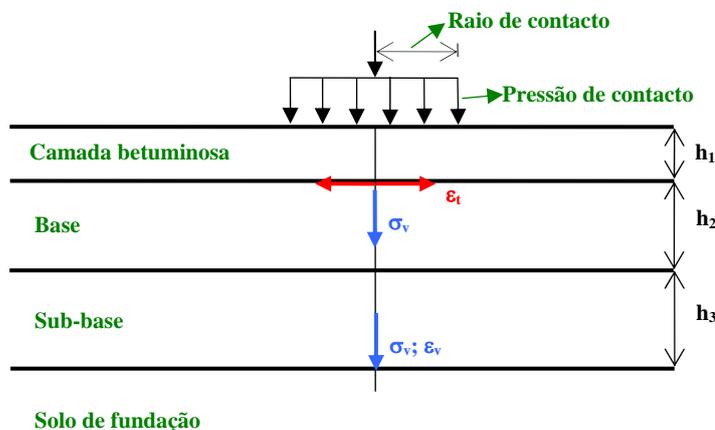


Figura 7.65 – Parâmetros avaliados na análise empírico-mecanicista

O estado de tensão e deformação ao qual o pavimento está submetido é calculado através de programas computacionais que simulam o comportamento da estrutura quando submetida à acção das cargas, que pode ser elástico linear ou não linear.

Na análise linear, cada camada é simulada por um meio elástico linear, homogéneo e isotrópico, de modo a ter-se um modelo estrutural simples e capaz de reproduzir as tensões e deformações como as obtidas em pavimentos instrumentados. Além disto, este modelo incorpora a dependência dos módulos de elasticidade dos materiais constituintes do pavimento em função do estado de tensões ao qual o pavimento está submetido.

Em 1885, Boussinesq desenvolveu uma teoria para um semi-espaço homogéneo, isotrópico e elástico linear que permite calcular a tensão em qualquer ponto no interior da massa e o deslocamento na superfície provocado por uma carga actuante em um ponto qualquer da superfície do meio elástico. A partir da teoria de Boussinesq, em 1945, Burmister desenvolveu soluções para um sistema constituído por três camadas. Com auxílio de programas computacionais de análise tensão-deformação, estas soluções são bastante utilizadas nos estudos envolvendo camadas múltiplas.

Na solução de problemas de sistema de camadas elásticas, consideraram-se algumas suposições básicas como: (i) cada camada é homogénea, isotrópica, e elástica linear com módulo elástico ( $E$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ); (ii) as camadas são admitidas infinitas na direcção lateral e finitas em profundidade; (iii) a camada final (solo de fundação) é considerada infinita em profundidade.

A análise mecanicista (linear) foi realizada através do Programa BISAR 3. A geometria utilizada no carregamento foi eixo simples de roda dupla de 80 kN, carga em cada pneu de 20 kN e espaçamento entre rodas de 0,1575 m. Para a aplicação do programa, foram adoptados os módulos das misturas betuminosas e as leis de fadiga obtidos nos ensaios.

Para a simulação no programa BISAR 3 foi adoptada a estrutura mostrada no Quadro 7.12, sendo que foram variados, a cada simulação, os módulos e as espessuras das camadas betuminosas e, mantidas as características das camadas inferiores. O Quadro 7.13 apresenta os módulos dinâmicos obtidos nos ensaios para as misturas betuminosas utilizadas no dimensionamento.

Quadro 7.12 – Estruturas avaliadas

Camada	Espessura (cm)	Módulo (MPa)	Coef. de Poisson
Revestimento <sup>5</sup>	6 a 18	Variável	0,35
Base BG	15	400	0,40
Camada granular	20	200	0,40
Solo de fundação	∞	100	0,45

Quadro 7.13 – Módulos dinâmicos das misturas

Misturas	IBB151	CBB201	IBCbB	BBB	CBCbP
Módulo (MPa)	4909	4864	6273	6314	5192

### *Análise da rotura por fadiga*

O Quadro 7.14 apresenta o valor de N (vida de fadiga obtida através das leis de fadiga dos ensaios) em função da deformação específica de tracção na fibra inferior da camada betuminosa, para cada mistura e para cada espessura atribuída à camada. As Figuras 7.66 e 7.67 apresentam o valor de N em função da espessura.

Quadro 7.14 – Resultados obtidos de N em função da deformação ( $\epsilon_t$ ) e da espessura

Espessura (cm)	N				
	IBB151	CBB201	IBCbB	BBB	CBCbP
6	$1,10 \times 10^8$	$1,11 \times 10^8$	$3,41 \times 10^7$	$1,25 \times 10^6$	$1,41 \times 10^7$
7	$1,08 \times 10^8$	$1,09 \times 10^8$	$3,73 \times 10^7$	$1,33 \times 10^6$	$1,42 \times 10^7$
8	$1,24 \times 10^8$	$1,25 \times 10^8$	$4,58 \times 10^7$	$1,55 \times 10^6$	$1,61 \times 10^7$
10	$2,08 \times 10^8$	$2,02 \times 10^8$	$8,25 \times 10^7$	$2,40 \times 10^6$	$2,45 \times 10^7$
12	$3,97 \times 10^8$	$3,73 \times 10^8$	$1,62 \times 10^8$	$3,97 \times 10^6$	$4,12 \times 10^7$
13	$5,59 \times 10^8$	$5,15 \times 10^8$	$2,30 \times 10^8$	$5,14E+06$	$5,42 \times 10^7$
14	$7,91 \times 10^8$	$7,16 \times 10^8$	$3,27 \times 10^8$	$6,65 \times 10^6$	$7,13 \times 10^7$
15	$1,12 \times 10^9$	$9,98 \times 10^8$	$4,62 \times 10^8$	$8,63 \times 10^6$	$9,40 \times 10^7$
16	$1,59 \times 10^9$	$1,39 \times 10^9$	$6,51 \times 10^8$	$1,11 \times 10^7$	$1,24 \times 10^8$
17	$2,25 \times 10^9$	$1,93 \times 10^9$	$9,14 \times 10^8$	$1,43 \times 10^7$	$1,62 \times 10^8$
18	$3,17 \times 10^9$	$2,67 \times 10^9$	$1,28 \times 10^9$	$1,83 \times 10^7$	$2,13 \times 10^8$

<sup>5</sup> Para a mistura BBB, houve necessidade de calcular espessuras de revestimento de até 26,0 cm.

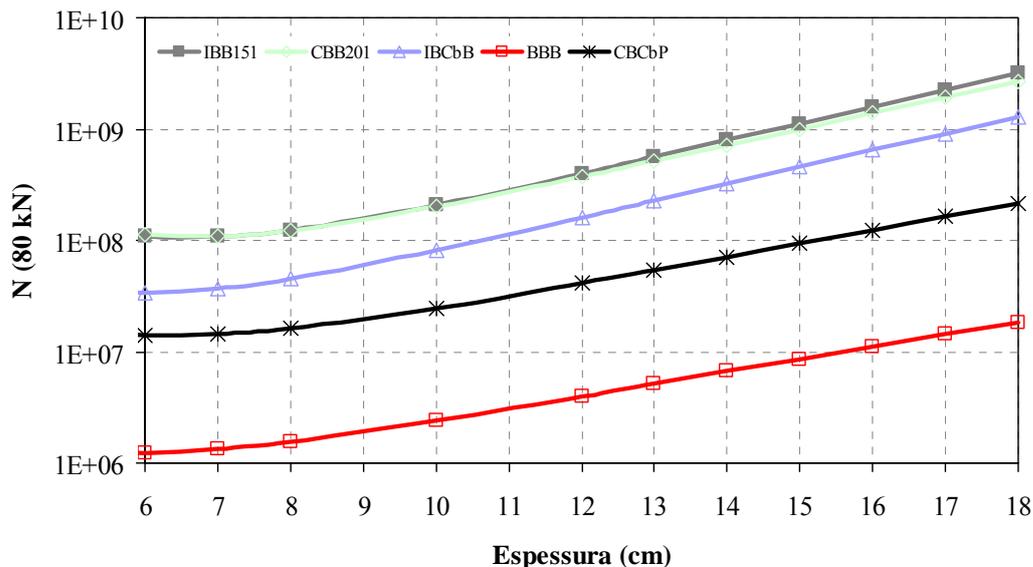


Figura 7.66 – Evolução de N em função da espessura da camada betuminosa

De acordo com os resultados obtidos na análise linear, as misturas que obtiveram uma elevada resistência à fadiga foram a IBB151 e a CBB201. As misturas IBCbB e CBCbP estariam em uma posição intermediária, enquanto que a mistura com fraco desempenho foi a mistura de referência BBB produzida com betume convencional. Estes resultados mostram que as misturas com betume-borracha, aplicadas em camadas de desgaste, prolongam a vida do pavimento em relação ao quesito fadiga.

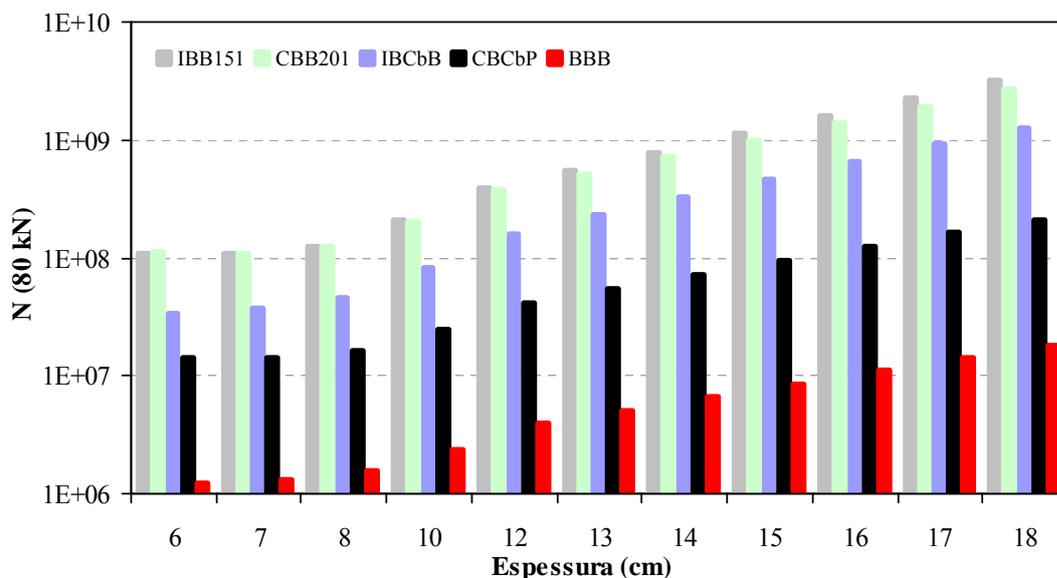


Figura 7.67 – N em função da espessura da camada betuminosa, para cada tipo de mistura

De acordo com a metodologia de dimensionamento DNER/81, a qual não faz diferença entre uma mistura convencional e uma mistura com betume modificado, para se obter um N de  $10^7$

seria necessário uma camada betuminosa de 8,0 cm e para um N igual a  $10^8$ , uma espessura de 12,5 cm. Através da análise empírico-mecanicista, para a mistura BBB, pode observar-se para se atingir um N igual a  $10^7$ , seria necessária uma espessura de 16,0 cm. Para um N de  $10^8$ , os cálculos resultaram em uma espessura necessária de 26,0 cm ( $\epsilon_t = 54,9$ ;  $N = 1,12 \times 10^8$ ).

Este facto leva a crer que as rodovias brasileiras, dimensionadas a partir desta metodologia não atingem a vida útil para a qual foi projectada, pois não leva em conta o fenómeno de fadiga dos materiais betuminosos de acordo com a análise empírico-mecanicista.

Na análise linear realizada foram avaliados os resultados referentes à variação da deformação na fibra inferior da camada betuminosa, para cada tipo de mistura, e a espessura, como apresentado na Figura 7.68.

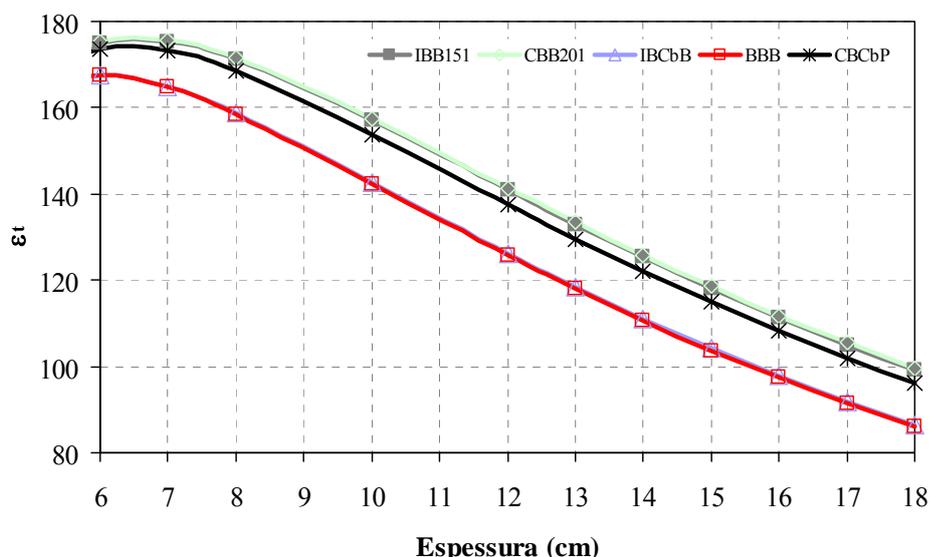


Figura 7.68 – Deformação ( $\epsilon_t$ ) em função da espessura (e)

No cálculo da deformação específica de tracção, o módulo dinâmico da mistura é uma variável com grande influência. Assim, pode verificar-se que, em geral, as menores deformações foram encontradas para as misturas BBB e IBCbB, com valores de módulos mais elevados. Entretanto, o valor do módulo não actua independentemente, mas sim no conjunto da estrutura, para o qual o resultado do dimensionamento depende da lei e fadiga obtida em laboratório. Ainda, o facto das misturas com betume-borracha apresentarem uma deformação mais elevada também está associada à sua componente elástica, ou seja, se por um lado a carga conduz a uma deformação elevada, por outro lado, a recuperação também se daria na mesma proporção; mas ainda assim, obtendo uma maior vida de fadiga.

### ***Análise da rotura por deformação permanente***

Os resultados de resistência à deformação permanente através do ensaio RSST-CH, apresentados nas Figuras 7.46 e 7.47 para rodeiras de 12,7 mm e 20,0 mm, mostraram que para as misturas seleccionadas o valor de N seria de aproximadamente  $10^7$ . Entretanto, este ensaio apresenta determinadas características que devem ser avaliadas como ser extremamente severo, ser conduzido em provetes de 5,0 cm de espessura ensaio a uma temperatura de 60 °C. Assim, considerando as peculiaridades do ensaio RSST-CH, os ensaios de deformação permanente conduzidos no equipamento *Wheel Tracking*, para as misturas seleccionadas na Fase 4 permitiram avaliar melhor este desempenho.

Os resultados de resistência à deformação permanente com o ensaio *Wheel Tracking* mostram que a mistura convencional BBB apresentou uma elevada deformação, o que inviabilizaria o seu emprego em camadas de desgaste (Quadro 7.9). No caso das misturas com betume-borracha, as taxas de deformação encontradas formam muito inferiores em relação à mistura convencional. Da mesma forma que nos ensaios de fadiga, para os ensaios de deformação permanente não se dispõe de factores de equivalência laboratório-campo, sendo aqui aplicado um coeficiente igual a 1, o qual poderia ser superior, aumentando a resistência à deformação permanente das misturas estudadas.

A configuração dos provetes, adoptada neste ensaio (5,0 cm na parte inferior de mistura BBB e 3,0 cm na parte superior de mistura com betume-borracha) permitiu avaliar a capacidade oferecida pelas misturas modificadas na redução significativa da deformação permanente total do provete, em até 67%. Isto leva a crer que as taxas de deformação seriam muito reduzidas no caso de provetes confeccionados com betume-borracha em toda a sua espessura.

Considerando ainda que a temperatura máxima atingida no pavimento da região de 52 °C (20 mm de profundidade) e que os ensaios (RSST-CH e *Wheel Tracking*) foram realizados na temperatura de 60 °C, os resultados obtidos de resistência à deformação permanente podem ser majorados, ou seja, a resistência em campo seria superior. De acordo com o dimensionamento do pavimento, as espessuras de camada de desgaste calculadas são superiores àquelas utilizadas nos provetes (3,0 cm para *Wheel Tracking* e 5,0 cm para RSST-CH), o que contribuiria para uma maior vida útil em relação à deformação permanente.

### ***Considerações sobre o dimensionamento efectuado***

A partir das leis de fadiga obtidas no âmbito desta investigação e considerando-se o factor laboratório-campo<sup>6</sup> igual a 1, a análise empírico-mecanista conduzida mostrou que, uma camada de desgaste de 6,0 cm de espessura confeccionada com betume-borracha IBB151 e CBB201 seria suficiente para suportar um N de  $10^8$ . Todavia, a experiência da prática de dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil levanta a dúvida de que esta espessura seria insuficiente para atender a um tráfego de  $10^8$ , mesmo com uma mistura de betume-borracha.

Desta forma, uma vez que no âmbito desta investigação as misturas ensaiadas não foram aferidas em pistas experimentais, buscou-se estabelecer para estas duas misturas a equivalência estrutural das misturas com betume-borracha em relação à mistura convencional, tomando como referência o estudo de redução de espessura estabelecido pelo Caltrans (1992).

#### **7.7.4. Consideração da redução da espessura das camadas de desgaste**

A consideração da redução de espessura da camada de desgaste foi realizada a partir de uma proposição de adaptação para pavimentos novos dos procedimentos indicados no *Reduced Thickness Design Guide* (Caltrans, 1992; Van Kirk, 2003), apresentados no Capítulo 4 (item 4.4.7.). Na adaptação, considerou-se que a primeira camada a que se refere o procedimento, a qual seria em mistura convencional, seria substituída por uma camada de betume borracha com a mesma espessura recomendada.

Esta adaptação foi realizada para mistura do tipo *gap graded* CBB201 também para a mistura IBB151 tendo em conta os resultados obtidos nos ensaios de desempenho. Na adaptação, considerou-se que a primeira camada a que se refere o procedimento, o qual seria executada em mistura convencional, foi substituída por uma camada de betume borracha com a mesma espessura recomendada. O Quadro 7.15 apresenta os valores recomendados pelo Caltrans (1992) e a proposição apresentada.

---

<sup>6</sup> O equipamento utilizado nesta investigação ainda não foi calibrado de modo a obter o factor laboratório-campo. Em geral, para o equipamento de flexão em 4 pontos, este factor varia entre 0,5 e 20 (Brown & Brunton (1985).

Quadro 7.15 – Valores de espessuras recomendados pelo Caltrans (1992) e a proposição apresentada, considerando a redução da espessura das camadas de desgaste

Espessura calculada para a mistura convencional (cm)	Espessuras recomendadas pelo Caltrans (1992)		Espessuras propostas em misturas com betume-borracha (cm)
	Mistura convencional (cm)	Mistura com betume-borracha (cm)	
4,0	-	3,0 <sup>(i)</sup>	4,5 <sup>(ii)</sup>
5,0	-	3,0 <sup>(i)</sup>	4,5 <sup>(ii)</sup>
6,0	-	3,0	4,5 <sup>(ii)</sup>
7,6	-	4,5	4,5
8,0	-	4,5	4,5
9,0	-	4,5	4,5
10,5	-	6,0	5,0
12,0	-	6,0	6,0
13,0	-	6,0	6,5
14,0	4,5	4,5	9,0
15,0	6,0	4,5	10,5
16,0	6,0	4,5	11,0
17,0	4,5	6,0	11,5
18,0	6,0	6,0	12,0
26,0	<sup>(iii)</sup>	<sup>(iii)</sup>	16,0

Observações referentes ao Quadro 7.15:

(i) A espessura mínima permitida pelo Caltrans (1992) é de 3,0 cm;

(ii) No Brasil, por razões construtivas (considerando a granulometria e a viscosidade do betume-borracha), a espessura mínima é de 4,5 cm;

(iii) As espessuras do Caltrans (1992) devem ser compostas.

Desta forma, de acordo com a proposição apresentada, a consideração da redução da espessura da camada de desgaste seria utilizada do seguinte modo:

- determinação da espessura da camada de desgaste em mistura convencional através da análise mecanicista;
- determinação da espessura equivalente da mistura com betume-borracha conforme Quadro 7.15.

Para o dimensionamento realizado, as espessuras da camada de desgaste requerida para uma mistura convencional foram as seguintes (Quadro 7.14):

- para  $N = 10^7$ , são necessários 16,0 cm de espessura de mistura convencional (BBB);
- para  $N = 10^8$ , são necessários 26,0 cm de espessura de mistura convencional (BBB).

De acordo com o Quadro 7.15 as espessuras da camada de desgaste confeccionada em mistura betume-borracha tipo CBB201 e IBB151 seriam as seguintes:

- para  $N = 10^7$ , são necessários 11,0 cm de espessura de mistura betume-borracha tipo CBB201 ou IBB151;
- para  $N = 10^8$ , são necessários 16,0 cm de espessura de mistura betume-borracha tipo CBB201 ou IBB151.

Considerando a situação mais severa, para rodeiras de 12,7 mm, o dimensionamento da estrutura poderia ser realizado levando-se em conta a mistura que obteve o melhor desempenho à fadiga e à deformação permanente, de modo a projectar uma camada de desgaste dividida em duas. Assim, na primeira metade seria colocada uma mistura com um betume mais rígido e na segunda metade uma mistura com o melhor desempenho à fadiga.

Os resultados obtidos neste trabalho de investigação são apresentados em termos de resultados de laboratório, não possuindo portanto, de factores de laboratório-campo, que permitiria a calibração destes resultados. A avaliação, assim como o acompanhamento do desempenho das misturas estudadas através de pistas experimentais que conduziriam à obtenção do factor laboratório-campo é imprescindível e importantíssimo para validação dos resultados aqui obtidos.

#### **7.7.5. Análise simplificada do custo/benefício da solução proposta**

Após o dimensionamento do pavimento importa realizar uma análise económica, apresentando-se no Quadro 7.16 o custo das soluções propostas para 1000 metros de via simples (7,5 metros de largura).

De acordo com o Quadro 7.16, pode concluir-se que:

- o preço de aplicação de mistura com betume-borracha (R\$ 253,25) é 22,94% mais elevado que o da mistura convencional (R\$ 206,00);
- para um  $N = 10^7$ , a solução proposta em mistura com betume-borracha, a qual apresenta uma redução da espessura de 5,0 cm, resulta numa economia de 18,33% em comparação à solução com mistura convencional;
- para um  $N = 10^8$ , a redução de espessura é de 10,0 cm, sendo que o seu custo é 32,17% inferior ao da solução com mistura convencional.

Quadro 7.16 – Análise de custo da solução proposta

N (80 kN)	10 <sup>7</sup>		10 <sup>8</sup>	
Parâmetros de análise	Mistura convencional	Mistura com betume-borracha	Mistura convencional	Mistura com betume-borracha
Espessura (cm)	16	11	26	16
Massa <sup>(i)</sup> (t)	2880	1980	4680	2880
Custo <sup>(iii)</sup> / tonelada (Reais, R\$)	206,00	253,25	206,00	253,25
Custo / tonelada (Euros <sup>(iii)</sup> , €)	71,03	87,33	71,03	87,33
Custo total (Reais, R\$)	593280,00	501435,00	964080,00	729331,20
Custo total (Euros, €)	204566,40	172913,40	332420,40	251510,40
Diferença (%)	18,33		32,17	

Observações referentes ao Quadro 7.16:

(i) Baridade aparente adoptada: 2,4 g/cm<sup>3</sup>;

(ii) Valores médios praticados na região de Florianópolis/SC, base Abril/2009 e remuneram os insumos e a aplicação da massa na pista;

(iii) Taxa de câmbio entre o Euro (€) e o Real (R\$) em Abril/2009 = 2,90.

Além da redução de custo, quando se aplica uma mistura com betume-borracha em relação à mistura convencional, deve ter-se em consideração o tempo de aplicação da mistura com betume-borracha na pista, uma vez que, devido à redução da espessura, o cronograma será reduzido tendo em conta a menor quantidade de massa aplicada, o que reduz o custo fixo das instalações industriais e de mão-de-obra.

## 7.8. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 7

Com o objectivo de elevar a resistência à fadiga das misturas betuminosas estudadas na Fase 3, foram produzidas misturas com betume-borracha com a mesma granulometria mas com uma percentagem de betume com mais 1% em relação à percentagem óptima obtida através da metodologia Marshall (Fase 4). Ainda nesta fase, foram produzidas também misturas com a granulometria AI, utilizando betume-borracha do tipo *continuous blend* com betume base PEN 35/50 e borrachas ambiente e criogénica para avaliar o desempenho desta granulometria com betume base mais rígido.

A avaliação da resistência à fadiga e à deformação permanente das misturas da Fase 4 foi realizada através dos ensaios mecânicos de desempenho. Quanto à fadiga, os resultados dos ensaios mostraram que o aumento da percentagem de betume aumentou significativamente a resistência à fadiga das misturas estudadas. Relativamente à resistência à deformação

permanente, o aumento de 1% de betume nas misturas mostrou que, em geral, não houve decréscimo deste parâmetro.

O elevado número de misturas estudadas conduziu à selecção de cinco misturas com melhor desempenho para o dimensionamento. A selecção das misturas com betume-borracha foi realizada a partir de critérios de decisão com base nos resultados de resistência à fadiga e à deformação permanente (de todas as misturas estudadas na Fase 3 e na Fase 4), no tipo de granulometria (*dense* e *gap graded*) e no tipo de betume (*terminal blend* e *continuous blend*). A mistura com betume convencional também foi seleccionada por ser a mistura de referência.

Para as cinco misturas seleccionadas foram também realizados ensaios de deformação permanente com o simulador de tráfego *Wheel Tracking*. Neste ensaio, o provete da mistura BBB (mistura de referência) foi moldado com 8 cm de espessura. Para as outras 4 misturas seleccionadas na Fase 4, o provete foi moldado em duas etapas sendo que 3 cm da mistura BBB foram substituídos por 3 cm de misturas com betume-borracha, de modo a simular a reabilitação de uma camada de desgaste reabilitada sobre uma camada betuminosa com betume convencional.

Os resultados obtidos mostram que a mistura BBB apresenta uma elevada taxa de velocidade de deformação e que de acordo com D.G. *Carreteras* (2004) inviabilizaria o seu emprego em camadas de desgaste. Por outro lado, a substituição nas lajetas de parte da mistura BBB por misturas com betume-borracha mostrou uma significativa redução na deformação permanente total da lajeta, o que mostra que as misturas com betume-borracha efectivamente apresentam maior resistência à deformação permanente.

O dimensionamento do pavimento foi realizado utilizando-se como camada de desgaste as misturas seleccionadas e a mistura de referência (BBB). Numa primeira etapa a estrutura do pavimento foi dimensionada a partir da metodologia brasileira do DNIT (DNER/81) e posteriormente foi realizada a análise empírico-mecanicista.

De acordo com a metodologia de dimensionamento DNER/81, e para o pavimento em estudo, para se obter uma vida do pavimento (N) de  $10^7$  seria necessário uma camada betuminosa de 8,0 cm e para um N igual a  $10^8$ , uma espessura de 12,5 cm. Através da análise empírico-mecanicista, para a mistura BBB, pode observar -se que para se atingir um N igual a

$10^7$ , seria necessária uma espessura de 16,0 cm. Para um N de  $10^8$ , os cálculos resultaram em uma espessura de 26,0 cm.

A partir das leis de fadiga obtidas na investigação, a análise empírico-mecanista mostrou que, uma camada de desgaste de 6,0 cm de espessura confeccionada com betume-borracha IBB151 e CBB201 seria suficiente para suportar um N de  $10^8$ . Todavia, a experiência da prática de dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil levanta a dúvida de que esta espessura seria insuficiente para atender a um tráfego de  $10^8$ , mesmo com uma mistura de betume-borracha. A partir desta consideração procurou estabelecer-se para estas duas misturas a equivalência estrutural das misturas com betume-borracha em relação à mistura convencional, tomando como referência o estudo de redução de espessura estabelecido pelo Caltrans (1992).

Como resultado, as espessuras da camada de desgaste confeccionada em mistura betume-borracha tipo CBB201 e IBB151 seriam as seguintes:

- para  $N = 10^7$ , são necessários 11,0 cm de espessura de mistura betume-borracha tipo CBB201 ou IBB151;
- para  $N = 10^8$ , são necessários 16,0 cm de espessura de mistura betume-borracha tipo CBB201 ou IBB151.

Finalmente, foi realizada uma análise de custo/benefício considerando-se a redução de espessura das camadas betuminosas de desgaste, que com base na solução obtida no trabalho, a utilização de uma mistura com betume-borracha em relação a uma mistura convencional conduziu à uma economia de até 32%, além da redução do custo fixo das instalações industriais e de mão-de-obra.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO TP8, 1994. (Reapproved 1996, Reconfirmed in 2001). Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending). Standard based on SHRP Product 1019. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C., USA.
- Aps, M., 2006. Classificação da Aderência Pneu-Pavimento pelo Índice Combinado IFI – International Friction Index para Revestimentos Asfálticos. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, SP, Brasil.
- Bennert, T.; Maher, A.; Smith, J., 2004. Evaluation of Crumb Rubber in Hot Mix Asphalt. Final Report. USDOT, Research and Special Programs Administration. Washington, DC, USA.
- Brown, S.F. & Brunton, J.M., 1985. An Introduction to the Analytical Design of Bituminous Pavements. University of Nottingham. Nottingham, U.K.
- Caltrans, 1992. Design Guide for ARHM-GG. California Department of Transportation. Division of New Technology, Materials and Research. Sacramento, California, USA.
- DNER, 1994. ME 049 (Método de Ensaio. Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras Não Trabalhadas). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, Brasil.  
Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)
- Dantas Neto, S.A., 2004. Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, DF, Brasil.

Dirección General de Carreteras, 2004. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes. Año vigente 2004. 543 Mezclas Bituminosas Discontinuas en Caliente para Capas de Rodadura. Madrid, España.

DNIT, 2006. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, 2ª Edição. Ministério dos Transportes – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação IPR 720. Rio de Janeiro, Brasil.

Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/)

Mohammad, L.N.; Huang, B.; Roberts, F.; Rasoulían, M., 2000. Accelerated Loading Performance and Laboratory Characterization of Crumb Rubber Asphalt Pavements. Asphalt Rubber 2000 Proceedings. Vilamoura, Portugal.

NLT 173, 1984. Resistência a la Deformación Plástica de las Mezclas Bituminosas mediante la Pista de Ensayo de Laboratorio. Centro de Estudios de Carreteras. España.

PIARC, 1995. International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements, PIARC Publication 01.04.T, Permanent International Association of Road Congresses, Paris, France.

Sousa, J.B.; Fonseca, P.; Freire, A.; Pais, J.C., 1999. Comparação da Vida à Fadiga e Deformação Permanente entre Misturas com Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus Convencionais. Relatório Consulpav EST 99-07. Portugal.

Van Kirk, J., 2003. Thin is in – The Development of the Caltrans Reduced Thickness Guidelines. Asphalt-Rubber Association, Tempe, Arizona, USA.

Way, G.B., 2003. OGFC Meets CRM: Where the Rubber Meets the Rubber: 15 Years of Durable Success. Asphalt Rubber 2003, Proceedings. Brasilia, Brazil.

## Capítulo 8

# RESISTÊNCIA À PROPAGAÇÃO DE FENDAS

### 8.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é realizada a Fase 5 do trabalho, **Propagação de Fendas**, tratando-se do estudo da propagação de fendas das misturas seleccionadas na Fase 4 recorrendo a um modelo numérico e a ensaios laboratoriais, de acordo com o esquema já apresentado na Figura 5.1 (e).

A simulação numérica foi realizada utilizando os modelos de propagação de fendas desenvolvidos por Minhoto (2007), incorporado ao programa de elementos finitos ANSYS 10.0 (*Multiphysics*), para avaliar o dano na camada de reforço de um pavimento devido ao efeito do tráfego e das variações de temperatura. Os modelos determinam o nível de extensão deviatória de Von Mises a que o reforço do pavimento está submetido e, utilizando a lei de fadiga da mistura obtida nos ensaios da fadiga por flexão alternada em 4 pontos (Fases 3 e 4), é avaliada a vida útil do reforço do pavimento e o dano relativamente a um determinado tráfego actuante. A partir do dano obtido, foi seleccionada a melhor mistura que atendeu ao critério de desempenho à propagação de fendas.

No estudo laboratorial, a resistência à propagação de fendas foi avaliada recorrendo ao ensaio de propagação de fendas com o *Reflective Cracking Device* (RCD), desenvolvido por Sousa *et al.* (1996). A partir dos resultados dos ensaios de laboratório, expressos em termos de extensões de Von Mises, e utilizando uma simulação numérica, foi possível obter a vida do reforço para as misturas em estudo nesta fase do trabalho.

## 8.2. MODELAÇÃO NUMÉRICA DA PROPAGAÇÃO DE FENDAS

### 8.2.1. Caracterização dos modelos utilizados

A análise da progressão das fendas foi realizada utilizando o programa ANSYS 10.0 (*Multiphysics*) com os modelos desenvolvidos por Minhoto (2007). Os modelos calculam o estado de tensão/extensão no reforço de um pavimento devido ao efeito conjunto do tráfego e das variações de temperatura.

O modelo para estudo do efeito da acção do tráfego, desenvolvido em regime elástico linear, considera a aplicação de uma carga vertical simulando um eixo de um veículo. O modelo para consideração das variações de temperatura foi desenvolvido em regime viscoelástico considerando as temperaturas verificadas no Sul do Brasil, região de Florianópolis, a partir de dados de medição da temperatura<sup>1</sup> do ar em 30 anos.

A análise numérica consistiu na modelação mecânica de um pavimento, e o respectivo reforço, simulando-se a acção do tráfego e das variações de temperatura para numa fase posterior ser avaliada a ocorrência simultânea destas duas acções. O comportamento mecânico das misturas betuminosas necessário para aplicação dos modelos, nomeadamente o módulo dinâmico e a resistência à fadiga, foram obtidos nos Capítulos 6 e 7. Nesta modelação foram utilizadas as propriedades viscoelásticas das misturas betuminosas obtidas por Minhoto (2007) para misturas com e sem betume-borracha.

Na Figura 8.1 apresenta-se o modelo de elementos finitos utilizado na simulação numérica, o qual é composto por uma camada representando a fundação do pavimento, duas camadas (betuminosa e granular) representando o pavimento antigo e uma camada de reforço. Na camada betuminosa do pavimento existente é simulada uma fenda representando o fendilhamento do pavimento. O modelo foi criado utilizando elementos do tipo sólido de 8 nós e três graus de liberdade por nó (elemento *SOLID* 185 do software ANSYS 10.0 *Multiphysics*).

---

<sup>1</sup> O levantamento dos dados de temperatura do ar foi realizado em 2006, a partir de dados colectados em 30 anos através do EPAGRI/CIRAM (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina/Centro de Informação de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (Brasil)).

A fenda, localizada na camada fendilhada do pavimento antigo, foi considerada com uma largura de 1 cm, de modo a simular uma fenda real de 2 a 3 mm e uma zona superficial de bordos degradados, abrangendo então a largura de 1 cm.

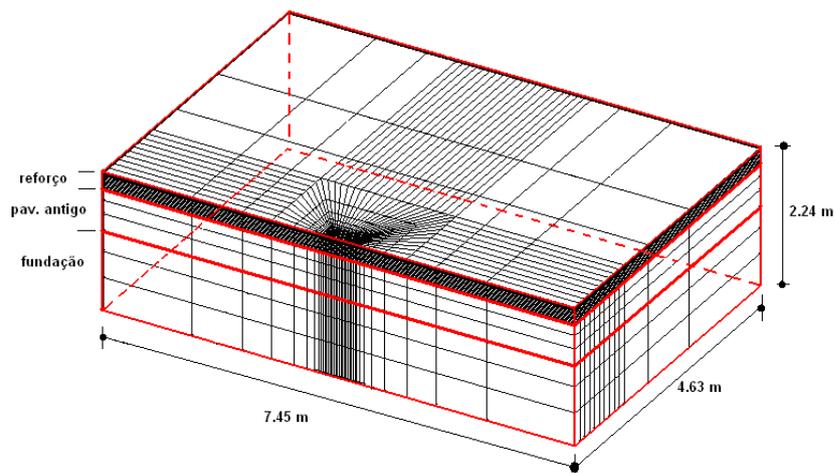


Figura 8.1 – Modelo do pavimento para estudo da propagação de fendas (Minhoto, 2007)

A geometria adoptada no modelo para a definição das camadas do pavimento foi baseada nas seguintes espessuras:

- reforço de pavimento: 0,12 m;
- camada betuminosa existente fendilhada: 0,21 m;
- camada granular: 0,20 m;
- camada de fundação: 1,60 m.

O material da camada betuminosa do pavimento antigo (fendilhado) foi caracterizado através do seu módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson (modelo de Minhoto, 2007), para uma frequência de 10 Hz, de acordo com os valores apresentados no Quadro 8.1.

As propriedades consideradas para a caracterização dos materiais da camada de base granular e da camada de fundação são as apresentadas no Quadro 8.2.

A determinação da vida do reforço do pavimento à propagação de fendas foi realizada para a estrutura de pavimento apresentada, aplicando-se na camada de reforço cada uma das cinco misturas betuminosas seleccionadas na Fase 4 deste trabalho.

Quadro 8.1 – Propriedades da mistura betuminosa da camada fendilhada (Minhoto, 2007)

Temperatura (°C)	Módulo de deformabilidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
-5	12000	0,35
0	9000	0,35
5	6500	0,35
10	4000	0,35
15	2500	0,35
25	680	0,35

Quadro 8.2 – Propriedades da camada granular e do solo de fundação

Camada	Módulo de deformabilidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
Base granular	270	0,35
Solo de fundação	90	0,35

Como o estudo da propagação de fendas é realizado tendo em consideração o efeito das variações de temperatura a que o pavimento está sujeito durante o seu período de vida, os módulos de deformabilidade das misturas betuminosas têm de ser expressos em função da temperatura.

Deste modo, para a camada de reforço do pavimento, tanto para o caso de utilização da mistura betuminosa convencional como para o caso de utilização das misturas betuminosas com betume-borracha, os módulos de deformabilidade considerados para a análise de elementos finitos tiveram por base os determinados nos ensaios de módulo às temperaturas de 15 °C, 20 °C e 25 °C, e apresentados nos Capítulos 6 e 7.

A partir dos resultados obtidos em laboratório para o módulo dinâmico de cada mistura para as temperaturas de 15 °C, 20 °C e 25 °C e para a frequência de 10 Hz (Capítulos 6 e 7), foi desenvolvida uma lei de variação do módulo com a temperatura. Para temperaturas superiores a 25 °C, considerou-se que a variação do módulo segue a lei expressa na Equação 8.1 e para temperaturas inferiores a 25 °C, a lei de variação do módulo é dada pela Equação 8.2.

$$\log E = a + T \times b \quad (8.1)$$

$$E = a + T \times b \quad (8.2)$$

onde:

E = módulo dinâmico (MPa);

T = temperatura (°C);

a, b = constantes experimentais.

No Quadro 8.3 são apresentados os parâmetros das leis de variação do módulo dinâmico das misturas betuminosas para as diferentes temperaturas, enquanto no Quadro 8.4 são mostrados os módulos calculados para as temperaturas de -5; 5; 15; 20; 25; 40 e 50 °C, à frequência de 10 Hz.

Quadro 8.3 – Parâmetros das leis de variação do módulo dinâmico

Temperatura	Parâmetro	IBB151	CBB201	IBCbB	CBCbP	BBB
Acima de 25 °C	a	4,196	4,259	4,133	4,165	4,364
	b	-0,025	-0,030	-0,018	-0,023	-0,028
Abaixo de 25 °C	a	1,025x10 <sup>4</sup>	1,110x10 <sup>4</sup>	1,098x10 <sup>4</sup>	1,054x10 <sup>4</sup>	1,471x10 <sup>4</sup>
	b	-268,285	-314,355	-242,232	-268,285	-412,855

Quadro 8.4 – Módulo dinâmico a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Misturas e Módulos (MPa)				
	IBB151	CBB201	IBCbB	CBCbP	BBB
-5	11587	12667	12188	11881	16773
5	8904	9523	9766	9199	12644
15	6222	6380	7344	6516	8516
20	4880	4808	6132	5174	6451
25	3539	3236	4921	3833	4387
40	1532	1181	2691	1746	1678
50	870	596	1795	1026	871

Os valores apresentados no Quadro 8.4 são representados na Figura 8.2 evidenciando a forma como os modelos anteriores extrapolam o módulo dinâmico. Os valores do módulo obtidos em laboratório para 15, 20 e 25 °C seguem uma variação linear (Equação 8.2) com a temperatura, facto que conduziu à utilização do modelo linear para esta gama de temperaturas

e para temperaturas inferiores a estas. A aplicação deste modelo a temperaturas superiores a 25 °C conduziria a módulos negativos para temperaturas superiores a 30 °C pelo que se optou pelo modelo logaritmo (Equação 8.1).

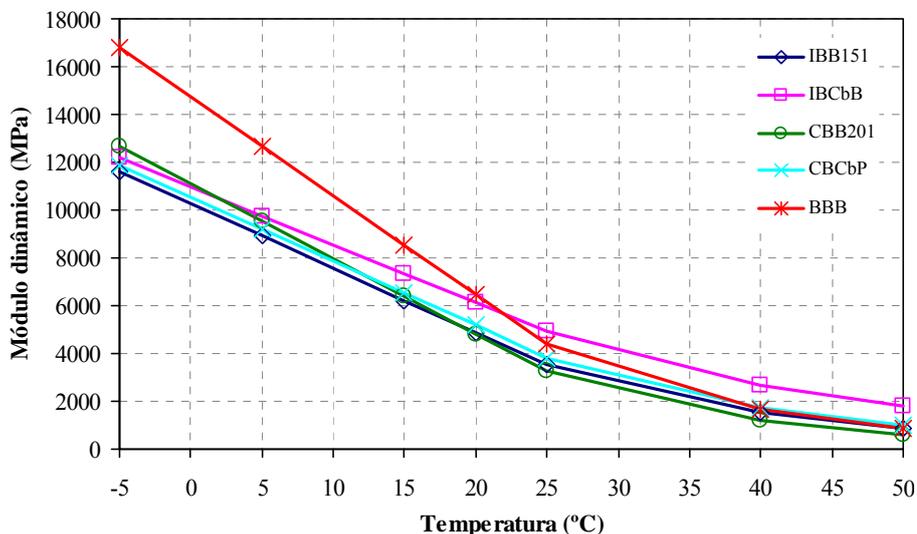


Figura 8.2 – Variação do módulo dinâmico com a temperatura para as misturas estudadas

O comportamento viscoelástico das misturas betuminosas para simulação da resposta do pavimento às variações de temperatura foi expresso pelo módulo de relaxação por corte e volumétrico, expresso em termos de séries de Prony, de acordo com as Equações 8.3 e 8.4:

$$G = G_{\infty} + \sum_{i=1}^{n_G} G_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^G}\right) \tag{8.3}$$

$$K = K_{\infty} + \sum_{i=1}^{n_K} K_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^K}\right) \tag{8.4}$$

onde:

G = módulo de relaxação por corte;

K = módulo de relaxação volumétrico;

G<sub>i</sub> = módulo de corte elástico, associado às componentes i da série de Prony;

K<sub>i</sub> = módulo volumétrico elástico, associado às componentes i da série de Prony;

τ<sub>i</sub><sup>G</sup>, τ<sub>i</sub><sup>K</sup> = tempos de relaxação para cada componente da série de Prony;

G<sub>∞</sub> = módulo de corte, associado um carregamento de duração infinita;

K<sub>∞</sub> = módulo volumétrico, associado um carregamento de duração infinita.

O efeito da temperatura foi considerado pela aplicação do factor de escala  $A(T(t))$  de William-Landel-Ferry (WLF) de acordo com a Equação 8.5:

$$\log_{10}(A(T(\tau))) = \frac{C_1(T - T_r)}{C_2 + T - T_r} \tag{8.5}$$

Deste modo, as propriedades viscoelásticas das misturas betuminosas foram expressas pelos valores indicados no Quadro 8.5, para misturas betuminosas com e sem betume-borracha, de acordo com Minhoto (2007). Os coeficientes de retracção térmica adoptados neste estudo foram os apresentados no Quadro 8.6, obtidos por Minhoto (2007) para misturas betuminosas com e sem betume-borracha.

Quadro 8.5 – Propriedades viscoelásticas das misturas – parâmetros de Prony

	Parâmetros	Mistura com betume-borracha	Mistura sem betume-borracha
Parâmetros volumétricos	$K_\infty$	$1,379 \times 10^1$	$2,807 \times 10^1$
	$K_1$	$5,623 \times 10^2$	$7,845 \times 10^2$
	$K_2$	$1,116 \times 10^2$	$2,598 \times 10^2$
	$K_3$	$2,390 \times 10^1$	$3,071 \times 10^1$
	$\tau_1^K$	$6,054 \times 10^{-2}$	$5,853 \times 10^{-1}$
	$\tau_2^K$	$1,474 \times 10^1$	9,165
	$\tau_3^K$	$9,863 \times 10^3$	$9,922 \times 10^3$
Parâmetros de corte	$G_\infty$	5,108	$1,039 \times 10^1$
	$G_1$	$2,091 \times 10^2$	$2,894 \times 10^2$
	$G_2$	$4,134 \times 10^1$	$9,445 \times 10^1$
	$G_3$	$8,852 \times 10^1$	$1,135 \times 10^1$
	$\tau_1^G$	$6,032 \times 10^{-2}$	$5,991 \times 10^{-1}$
	$\tau_2^G$	$1,473 \times 10^1$	9,489
	$\tau_3^G$	$9,862 \times 10^3$	$9,999 \times 10^3$
WLF	$T_r$	$1,384 \times 10^1$	13,114544
	$C_1$	$2,228 \times 10^7$	$2,557 \times 10^7$
	$C_2$	$1,438 \times 10^8$	$1,395 \times 10^8$

Quadro 8.6 – Coeficientes de retracção térmica das misturas betuminosas

Parâmetro	Mistura com BMB	Mistura sem BMB
$\alpha$	$4,268 \times 10^{-05}$	$3,542 \times 10^{-05}$

A aplicação do modelo de elementos finitos utilizado neste trabalho requer, para determinação da vida útil do reforço do pavimento, a lei da resistência à fadiga do material da camada de reforço, em função da temperatura. As leis de fadiga determinadas nos Capítulos 6 e 7 foram expressas função da extensão de tracção e obtidas para a temperatura de 20 °C pelo que não podem ser utilizadas directamente no modelo de elementos finitos.

Deste modo, para a modelação numérica, as leis de fadiga das misturas betuminosas foram expressas em função da extensão e do módulo dinâmico, de acordo com a Equação 8.6, captando, esta última variável, o efeito da temperatura. Os coeficientes obtidos são indicados no Quadro 8.7.

$$N = a \times E^b \times \epsilon^c \tag{8.6}$$

onde:

N = resistência à fadiga;

E = módulo dinâmico;

$\epsilon_t$  = extensão de tracção;

a, b, c = constantes experimentais.

Quadro 8.7 – Parâmetros das leis de fadiga de acordo com a Equação 8.6

Constantes	Misturas				
	IBB151	CBB201	IBCbB	CBCbP	BBB
a	-1,185x10 <sup>-4</sup>	-0,2367	-9,3182	-2,100x10 <sup>-3</sup>	-3,360x10 <sup>-4</sup>
b	-0,9368	-1,4172	-1,5236	-0,8066	-0,6320
c	-5,5705	-5,9711	-5,6842	-4,6954	-4,1910

As Figuras 8.3 a 8.7 apresentam, para cada mistura, a qualidade do ajuste da lei de fadiga, expressa de acordo com a Equação 8.6, e os correspondentes resultados obtidos em laboratório, verificando-se que as leis obtidas (Quadro 8.7) representam correctamente a resistência à fadiga das misturas betuminosas.

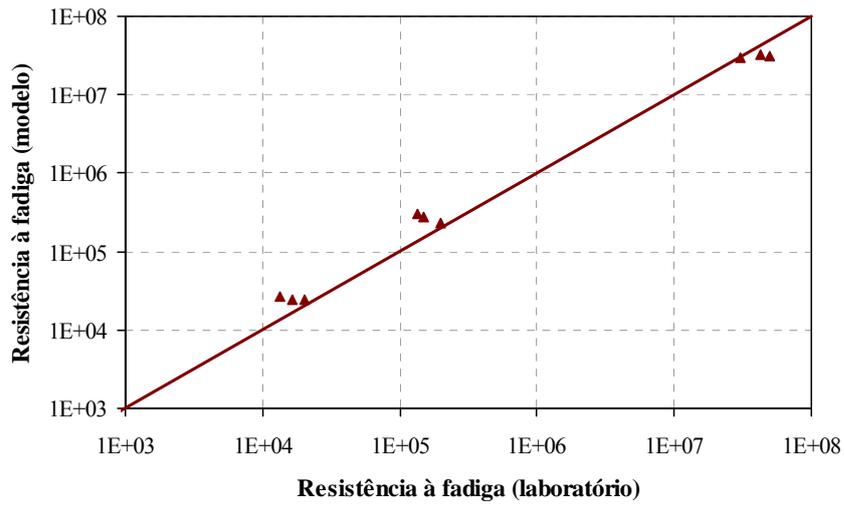


Figura 8.3 – Ajuste da lei de fadiga para a mistura IBB151

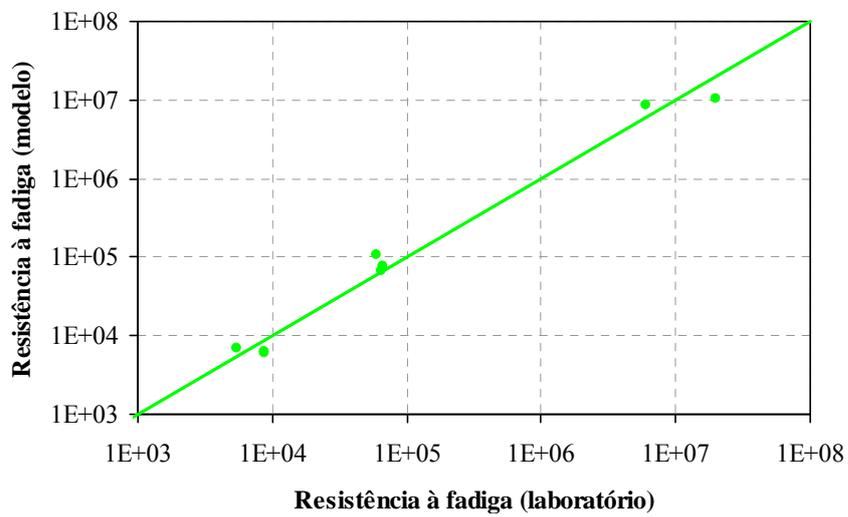


Figura 8.4 – Ajuste da lei de fadiga para a mistura IBCbB

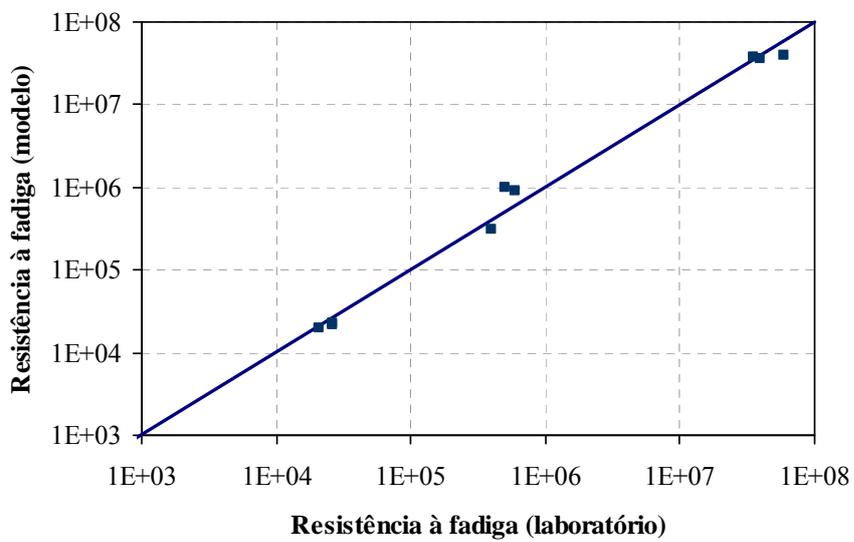


Figura 8.5 – Ajuste da lei de fadiga para a mistura CBB201

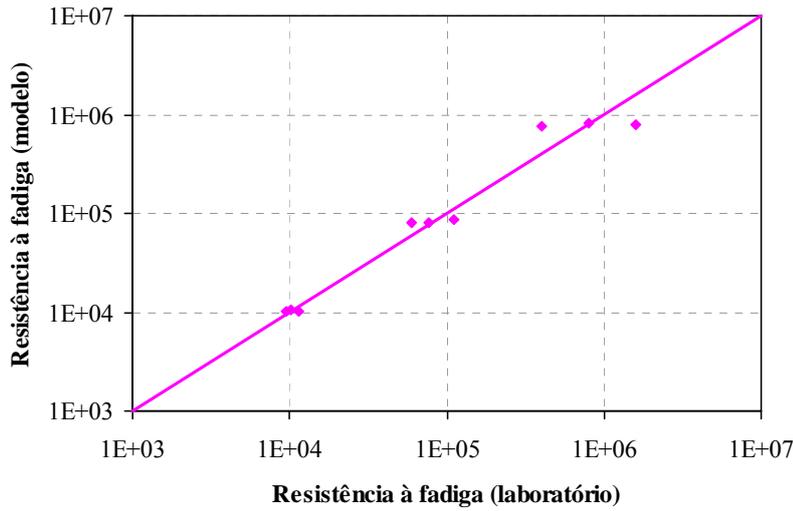


Figura 8.6 – Ajuste da lei de fadiga para a mistura CBCbP

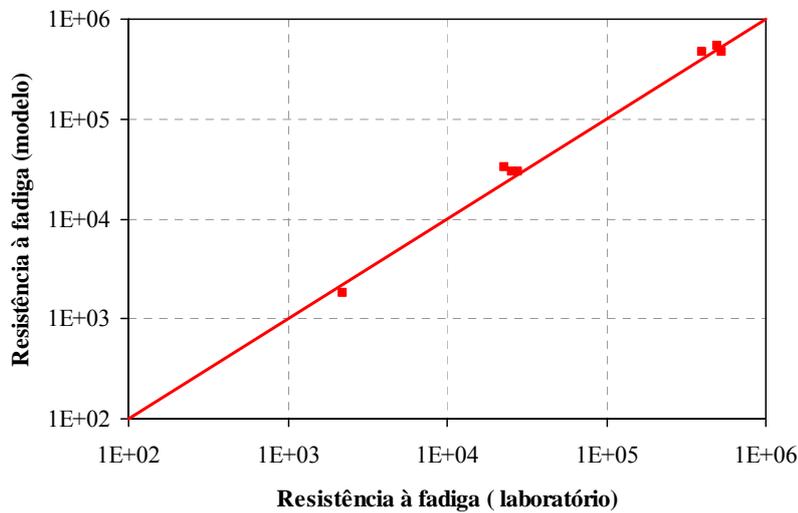


Figura 8.7 – Ajuste da lei de fadiga para a mistura BBB

O dano associado à ocorrência de propagação de fendas, obtido de acordo com a Equação 8.7, considerou um tráfego anual caracterizado pelas contagens de eixos indicadas no Quadro 8.8, correspondente ao tráfego observado no IP4, posto automático nº 5, localizado ao quilómetro 200, de acordo com os dados fornecidos pela Direcção Distrital de Bragança da Estradas de Portugal e utilizados por Minhoto (2007).

$$\text{Dano} = \frac{N}{\text{Tráfego}} \tag{8.7}$$

onde:

N = vida previsível do reforço;

Tráfego = obtido através do estudo de tráfego (equivalente ao eixo padrão de 80 kN).

Quadro 8.8 – Tráfego anual utilizado para determinação do dano do reforço

Intervalo da carga (kN)	Número de eixos	Intervalo da carga (kN)	Número de eixos
20 – 30	1997851	100 – 120	28851
30 – 40	130468	120 – 130	14745
40 – 50	99957	130 – 140	16736
50 – 60	94146	140 – 150	3189
60 – 70	92291	150 – 160	3561
10 – 80	84085	160 – 170	3411
80 – 90	37504	170 – 180	0
90 – 100	40353	180 – 190	0
100 – 110	16233	> 190	0

### 8.2.2. Avaliação do dano

A aplicação dos modelos descritos para avaliação da propagação de fendas no reforço de um pavimento, é realizada para um período de tempo de 24 horas, a partir da hora em que se verifica a maior temperatura no pavimento, simulando a partir daí a relaxação e retracção do pavimento devido à variação diária de temperatura.

As medições da temperatura no pavimento realizadas por Minhoto (2007) mostraram que a temperatura apresenta uma variação diária aproximadamente sinusoidal, pelo que a simulação numérica da propagação de fendas pode ser realizada aplicando um perfil de temperaturas sinusoidal ao longo do dia.

Com a definição deste perfil de temperaturas é possível obter a resposta do reforço do pavimento, em termos de extensões de Von Mises, ao longo das 24 horas simuladas. A repetição do processo para todos os dias do mês permite obter a resposta ao longo do mês. A análise fica completa pela simulação deste processo para os 12 meses de um ano, o que permite determinar o dano anual do reforço do pavimento.

Também foi demonstrado por Minhoto (2007) que a temperatura do ar ao longo de um mês sofre variações muito pequenas ao longo dos anos, o que permite que a análise do comportamento do reforço do pavimento possa ser realizada apenas para um perfil de temperaturas representativo do mês, devendo adoptar-se para temperatura máxima, a média

das temperaturas máximas diárias que se verificam ao longo do mês, e para a temperatura mínima, a média das temperaturas mínimas diárias que se verificam ao longo do mês.

Este processo pode ser realizado para as temperaturas ao longo de um ano, através da consideração das temperaturas máxima e mínimas para cada mês, o que permite realizar o estudo para os 12 meses do ano.

O processo mais expedito de aplicação dos modelos de propagação de fendas consiste na determinação de leis de variação do dano com a temperatura máxima e mínima, ou com a temperatura máxima e a variação de temperatura, de acordo com a Equação 8.8:

$$\text{dano} = a \times T_{\text{max}}^b \times e^{c \times \Delta T} \tag{8.8}$$

onde:

$T_{\text{max}}$  = temperatura máxima diária do ar (°C);

$\Delta T$  = amplitude diária de temperatura do ar (°C);

$e$  = número neperiano;

$a, b, c$  = constantes experimentais de ajuste à evolução mensal do dano.

Tendo por base o exposto, a análise numérica da propagação de fendas foi realizada para cinco perfis de temperatura do ar (Quadro 8.9), a partir dos quais se obteve o dano mensal do reforço do pavimento, para cada uma das cinco misturas consideradas através das leis de fadiga indicadas no Quadro 8.7. Os resultados da análise numérica da propagação de fendas para as cinco condições de temperatura e para as cinco misturas em estudo permitiu obter os danos mensais indicados no Quadro 8.10.

Quadro 8.9 – Condições de temperatura simuladas na análise numérica da propagação de fendas

$T_{\text{máx}}$ (°C)	25	35	15	10	25
$\Delta T$ (°C)	25	10	15	10	15

A aplicação do modelo expresso na Equação 8.8 aos resultados do dano mensal obtido para as cinco condições de temperatura e para as misturas betuminosas em estudo, conduziu aos parâmetros indicados no Quadro 8.11, os quais permitem, a partir de agora, obter o dano mensal para qualquer mês do ano conhecendo a temperatura máxima e a amplitude térmica.

Quadro 8.10 – Danos mensais para as misturas em estudo

$T_{\text{máx}}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	IBB151	CBB201	IBCbB	CBCbP	BBB
25	25	$8,791 \times 10^{-5}$	$9,141 \times 10^{-5}$	$1,088 \times 10^{-4}$	$4,793 \times 10^{-4}$	$3,912 \times 10^{-3}$
35	10	$1,794 \times 10^{-2}$	$5,326 \times 10^{-2}$	$1,067 \times 10^{-2}$	$3,528 \times 10^{-2}$	$1,150 \times 10^{-1}$
15	15	$1,675 \times 10^{-5}$	$1,009 \times 10^{-5}$	$3,453 \times 10^{-5}$	$1,440 \times 10^{-4}$	$1,249 \times 10^{-3}$
10	10	$9,573 \times 10^{-6}$	$5,625 \times 10^{-6}$	$2,167 \times 10^{-5}$	$8,775 \times 10^{-5}$	$6,592 \times 10^{-4}$
25	15	$1,443 \times 10^{-4}$	$1,303 \times 10^{-4}$	$1,441 \times 10^{-4}$	$7,068 \times 10^{-4}$	$5,108 \times 10^{-3}$

Quadro 8.11 – Parâmetros do modelo do dano mensal (Equação 8.8)

Parâmetro	IBB151	CBB201	IBCbB	CBCbP	BBB
a	$3,44 \times 10^{-9}$	$3,85 \times 10^{-9}$	$4,05 \times 10^{-8}$	$1,94 \times 10^{-8}$	$2,17 \times 10^{-7}$
b	4,60	4,70	3,96	4,37	3,97
c	-0,223	-0,243	-0,232	-0,177	-0,130

A previsão do dano médio mensal de cada mistura, adaptado às condições climáticas do Sul do Brasil, referidas em termos de temperatura máxima do ar e amplitude diária, é apresentada no Quadro 8.12.

Quadro 8.12 – Dano mensal do reforço do pavimento

Mês	$T_{\text{máx}}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	IBB151	CBB201	IBCbB	CBCbP	BBB
Julho	10,14	8,06	$2,39 \times 10^{-5}$	$2,90 \times 10^{-5}$	$6,07 \times 10^{-5}$	$1,16 \times 10^{-4}$	$7,49 \times 10^{-4}$
Agosto	11,02	10,67	$1,96 \times 10^{-5}$	$2,28 \times 10^{-5}$	$4,61 \times 10^{-5}$	$1,05 \times 10^{-4}$	$7,43 \times 10^{-4}$
Setembro	11,69	9,95	$3,02 \times 10^{-5}$	$3,58 \times 10^{-5}$	$1,06 \times 10^{-4}$	$1,55 \times 10^{-4}$	$1,03 \times 10^{-3}$
Outubro	15,69	13,13	$5,74 \times 10^{-5}$	$6,59 \times 10^{-5}$	$3,15 \times 10^{-4}$	$3,20 \times 10^{-4}$	$2,19 \times 10^{-3}$
Novembro	19,68	12,29	$1,96 \times 10^{-4}$	$2,35 \times 10^{-4}$	$6,58 \times 10^{-4}$	$9,99 \times 10^{-4}$	$6,01 \times 10^{-3}$
Dezembro	28,13	15,22	$5,27 \times 10^{-4}$	$6,17 \times 10^{-4}$	$5,27 \times 10^{-4}$	$2,83 \times 10^{-3}$	$1,70 \times 10^{-2}$
Janeiro	27,68	15,17	$4,95 \times 10^{-4}$	$5,79 \times 10^{-4}$	$6,24 \times 10^{-4}$	$2,67 \times 10^{-3}$	$1,60 \times 10^{-2}$
Fevereiro	25,78	11,49	$8,11 \times 10^{-4}$	$1,01 \times 10^{-3}$	$1,11 \times 10^{-3}$	$3,75 \times 10^{-3}$	$1,95 \times 10^{-2}$
Março	25,16	16,46	$2,34 \times 10^{-4}$	$2,70 \times 10^{-4}$	$3,17 \times 10^{-4}$	$1,40 \times 10^{-3}$	$9,27 \times 10^{-3}$
Abril	16,75	9,12	$1,90 \times 10^{-4}$	$2,38 \times 10^{-4}$	$3,47 \times 10^{-4}$	$8,65 \times 10^{-4}$	$4,79 \times 10^{-3}$
Mai	10,09	9,13	$1,84 \times 10^{-5}$	$2,19 \times 10^{-5}$	$4,64 \times 10^{-5}$	$9,42 \times 10^{-5}$	$6,39 \times 10^{-4}$
Junho	9,08	9,45	$1,06 \times 10^{-5}$	$1,23 \times 10^{-5}$	$2,84 \times 10^{-5}$	$5,61 \times 10^{-5}$	$4,03 \times 10^{-4}$
Dano anual ( $\Sigma$ )			$2,62 \times 10^{-3}$	$3,14 \times 10^{-3}$	$3,72 \times 10^{-3}$	$1,34 \times 10^{-2}$	$7,83 \times 10^{-2}$

O somatório do dano mensal (aplicação da hipótese de Miner do dano acumulado), ao longo dos meses do ano, permite obter o dano anual, como apresenta a Figura 8.8, na qual se observa que o dano mais elevado foi observado na mistura convencional BBB. A vida do

reforço, em anos, calculada como o inverso do dano anual, é apresentada no Quadro 8.13 e ilustrada graficamente através da Figura 8.9, onde se observa a menor vida prevista para o reforço (12,0 cm) com a mistura BBB.

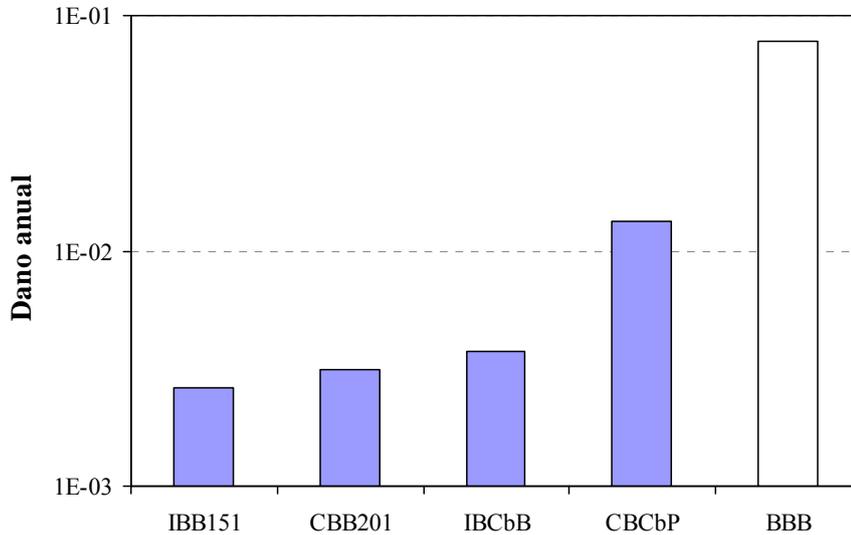


Figura 8.8 – Dano anual do reforço (12,0 cm) do pavimento com as misturas em estudo

Quadro 8.13 – Vida do reforço (12,0 cm) do pavimento

Parâmetros	Misturas				
	IBB151	CBB201	IBCbB	CBCbP	BBB
Vida propagação fendas (anos)	381,92	318,54	268,53	74,89	12,77
Vida propagação fendas (vida relativa)	29,9	24,9	21,0	5,9	1,0
N <sub>100</sub> (fadiga) (ciclos)	3,00x10 <sup>9</sup>	2,60x10 <sup>9</sup>	5,75x10 <sup>8</sup>	1,78x10 <sup>8</sup>	9,99x10 <sup>6</sup>
N <sub>100</sub> (fadiga) (vida relativa)	300,6	260,5	57,7	17,8	1,0

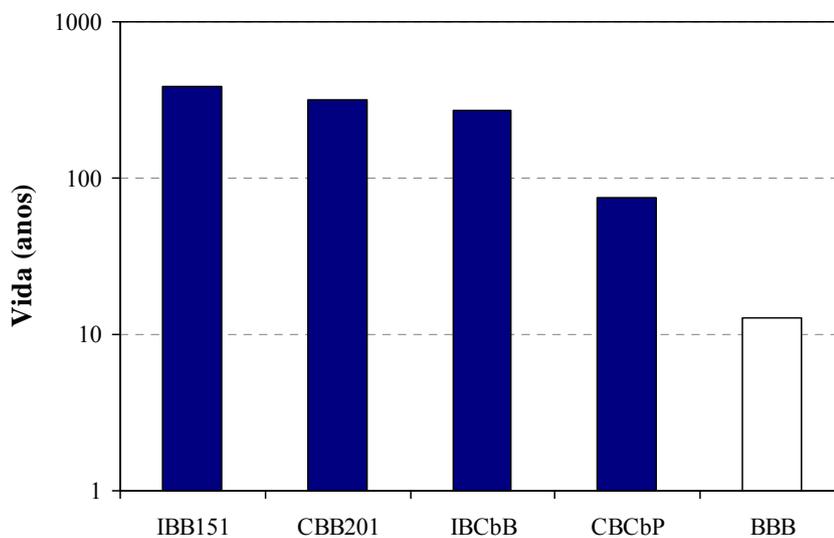


Figura 8.9 – Vida do reforço (12,0 cm) do pavimento

De acordo com os resultados apresentados no Quadro 8.13, pode observar-se que a aplicação da mistura convencional (sem borracha) no reforço do pavimento em estudo, conduz, teoricamente, a uma vida de 12,77 anos, enquanto que as misturas com betume-borracha teriam até 381 anos de vida. Isto representa, em termos relativos, uma vida de 1 para 29,9 vezes.

Os resultados obtidos na simulação numérica, em termos de propagação de fendas, apresentaram uma diferença muito elevada entre as misturas com betume-borracha e a mistura convencional, além de valores de vida extremamente elevados para as misturas modificadas.

A elevada diferença de vida entre as misturas, pode ser compreendida devido ao facto da comparação estar a ser realizada perante uma mistura com um desempenho fraco (BBB) e outras com um desempenho mecânico muito superior (misturas com betume-borracha), que foram optimizadas de modo a obter uma elevada resistência mecânica.

No Quadro 8.13 observa-se também uma comparação da resistência à fadiga obtida nos ensaios de flexão, para a extensão de  $100 \times 10^{-6}$ , para as cinco misturas em estudo, verificando-se que a resistência à fadiga das misturas com betume-borracha chega a ser 300 vezes superior à resistência à fadiga da mistura convencional de referência.

Este facto evidencia que os resultados da modelação da propagação de fendas parecem não serem muito elevados, comparativamente aos obtidos para a fadiga por flexão, além de mostrarem que a propagação de fendas é um fenómeno mais gravoso que a fadiga por flexão.

### **8.3. AVALIAÇÃO LABORATORIAL DA PROPAGAÇÃO DE FENDAS**

#### **8.3.1. Introdução**

A medição em campo da actividade das fendas realizada por Pais (1999) permitiu concluir que o deslocamento produzido pelos bordos das fendas, durante a passagem de um veículo sobre o pavimento, caracteriza-se por haver, em simultâneo, movimentos horizontais e verticais entre os dois bordos das fendas, tanto nas fendas longitudinais como nas

transversais. Após reforço do pavimento, as fendas existentes continuam a apresentar movimentos relativos entre os seus bordos, de maior intensidade na direcção vertical que na direcção horizontal. Os movimentos na direcção horizontal podem atingir valores quase nulos função da espessura do reforço.

Devido às variações de temperatura, o reforço está sujeito a um estado de tensão de compressão ou tracção, por relaxação e retracção, função da hora do dia, verificando-se que depois do pico da temperatura máxima diária, o reforço está sujeito a um estado de tensão horizontal de tracção, enquanto que após o pico da temperatura mínima diária, o reforço está sujeito a um estado de tensão horizontal de compressão.

A associação da acção do tráfego com as variações diárias de temperatura conduz a que os bordos das fendas estejam sujeitos a movimentos verticais e horizontais, podendo ser simulados laboratorialmente pela aplicação de um estado de tensão bi-dimensional, pelo que neste trabalho se optou por realizar os ensaios de propagação de fendas utilizando o *Reflective Cracking Device* (RCD), desenvolvido por Sousa *et al.* (1996).

Nesta parte do trabalho optou-se por ensaiar apenas as duas misturas com betume-borracha *continuous blend* (IBCbB e CBCbP) e a mistura de referência (BBB). As misturas com betume-borracha *terminal blend* (IBB151 e CBB201) não foram ensaiadas à propagação de fendas por não haver mais betume-borracha disponível e a utilização de um novo betume-borracha, mesmo que produzido com a mesma formulação, poderia conduzir a resultados não compatíveis com os anteriores.

### **8.3.2. Descrição do ensaio e do equipamento**

O equipamento para ensaio utilizado neste trabalho para estudo da propagação de fendas foi o RCD, desenvolvido por Sousa *et al.* (1996), o qual permite simular a zona da camada de reforço que se encontra sobre a camada antiga fendilhada, como se representa na Figura 8.10.

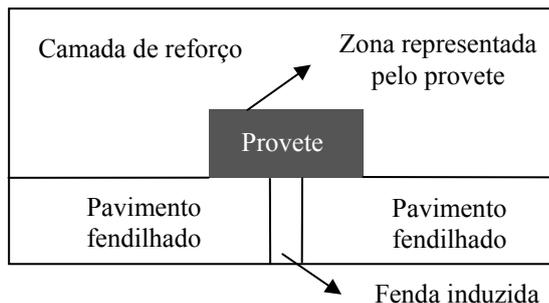


Figura 8.10 – Simulação da zona da camada de reforço submetida ao fendilhamento (adaptado de Sousa *et al.*, 1996)

O dispositivo de fendilhamento, apresentado esquematicamente na Figura 8.11, permite a aplicação simultânea de esforços horizontais e verticais. Este ensaio foi originalmente desenvolvido para determinação da vida à fadiga em propagação de fendas, sendo o tipo de carregamento definido pelos movimentos das fendas após a colocação de um reforço sobre um pavimento fendilhado.

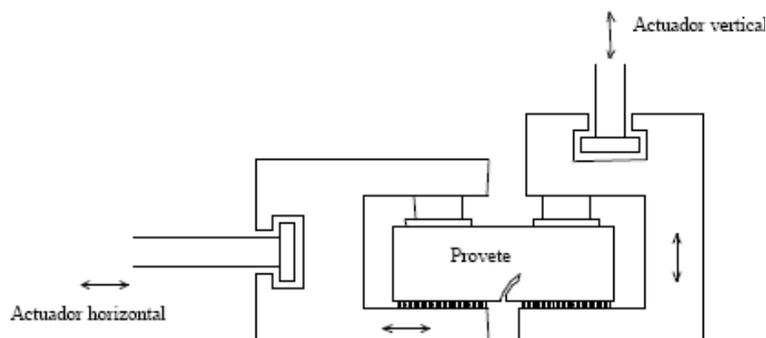


Figura 8.11 – Dispositivo de fendilhamento desenvolvido por Sousa *et al.* (1996)

Pais (1999) considera que o equipamento RCD consegue simular o fenómeno da propagação de fendas, caracterizado por requerer a aplicação de esforços em modo I e modo II de abertura de fendas. O ensaio pode ser realizado sobre provetes cilíndricos ou prismáticos.

Na Figura 8.12, apresenta-se um provete cilíndrico colado aos pratos inferiores do dispositivo de fendilhamento, observando-se também a abertura da fenda induzida. O dispositivo completo (Figura 8.13) é constituído por duas peças metálicas em forma de “U” deitado, no meio das quais o provete é fixado. Inferiormente, o provete é colado aos pratos metálicos enquanto que superiormente, quatro pistões aplicam um esforço simulando a carga aplicada pelo tráfego ao pavimento.

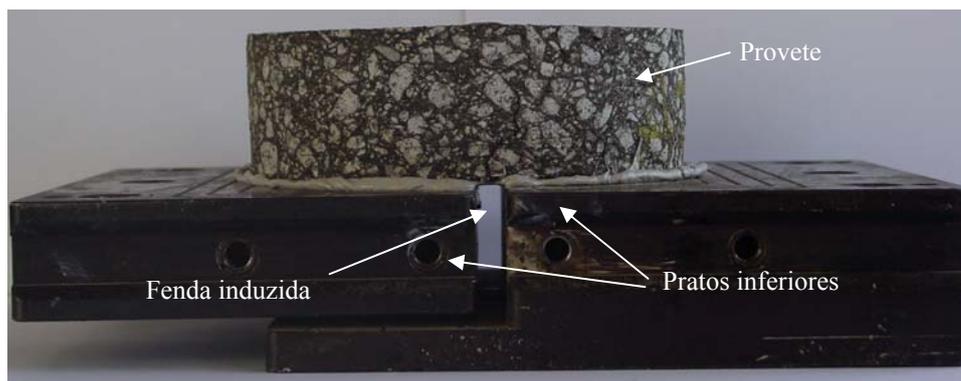


Figura 8.12 – Provete montado com abertura da fenda



Figura 8.13 – Dispositivo de reflexão de fendas montado com provete

O equipamento servo-hidráulico para a realização dos ensaios de propagação de fendas, o mesmo utilizado no ensaio de deformação permanente (RSST-CH), é constituído por uma estrutura de carga, um grupo hidráulico e uma câmara climática, apresentando-se na Figura 8.14 a estrutura de carga onde é fixo o RCD.

A estrutura de carga é composta por dois actuadores, dispostos verticalmente e horizontalmente, ligados a servo-válvulas, na extremidade dos quais se encontram as respectivas células de carga. O dispositivo de propagação de fendas é fixado às extremidades dos actuadores. A câmara climática permite o controlo de temperaturas de -20 até +70 °C, com precisão de  $\pm 0,5$  °C, o que possibilita manter a temperatura constante durante o ensaio. O equipamento permite realizar ensaios, tanto em extensão controlada como em tensão controlada, e possibilita a definição de qualquer tipo de onda para a força ou deslocamento.

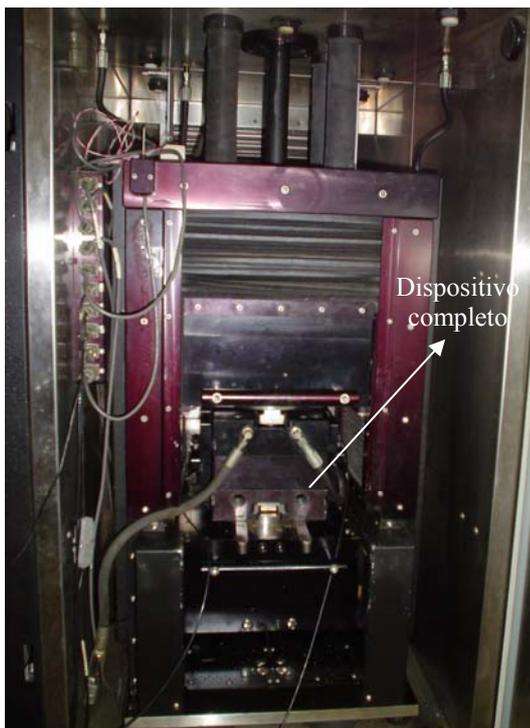


Figura 8.14 – Equipamento servo-hidráulico para ensaios de propagação de fendas

### 8.3.3. Configuração do ensaio

Para definição da configuração dos ensaios de propagação de fendas foi tido em consideração o facto de que após reforço a actividade das fendas, devido ao tráfego, é eminentemente vertical, e que devido à temperatura a zona do reforço sobre as fendas está sujeita a esforços horizontais de tracção ou compressão.

O efeito do tráfego e da temperatura na propagação de fendas se desenvolve a velocidades diferentes. Enquanto que o efeito do tráfego se verifica com frequências altas, habitualmente considerado o valor de 10 Hz, o efeito da temperatura verifica-se para uma frequência de 1 ciclo por dia, que comparativamente ao efeito da acção do tráfego pode ser considerado quase constante.

Deste modo, nos ensaios de propagação de fendas foi considerado que o efeito do tráfego, o qual aplica esforços verticais ao provete, seria caracterizado por uma frequência de 10 Hz, enquanto que o efeito da temperatura, o qual aplica esforços horizontais ao provete, seria caracterizado por aplicar esforços constantes ao longo do tempo. Os esforços verticais foram

aplicados através de um deslocamento enquanto que os esforços horizontais foram aplicados através de uma força, resultando num ensaio em deslocamento controlado na direcção vertical e força controlada na direcção horizontal.

Para cada uma das cinco misturas betuminosas ensaiadas foram obtidas leis de fadiga da resistência à propagação de fendas, resultantes da aplicação de deslocamentos entre 0,01 e 0,05 mm e forças entre 200 e 400 N. Os ensaios foram realizados à temperatura de 20 °C de forma idêntica aos ensaios de fadiga por flexão para avaliação da resistência ao fendilhamento das misturas betuminosas. Para estes ensaios foram utilizados provetes prismáticos com 18x18 cm<sup>2</sup> de base por 5 cm de espessura. A fenda existente foi simulada com uma abertura dos pratos de apoio do provete de 10 mm, representando uma fenda aproximadamente de 2 a 3 mm com bordos degradados, totalizando uma abertura de 10 mm. Para cada mistura foram ensaiados 6 provetes.

#### 8.3.4. Análise dos resultados

A análise dos resultados dos ensaios laboratoriais, nomeadamente a obtenção da resistência à propagação de fendas (número de ciclos de carga para o qual o provete atinge a rotura) foi realizada através da avaliação do ciclo de carga em que se desenvolveu uma fenda no provete com 1 mm de abertura. As Figuras 8.15 a 8.17 ilustram exemplos do estado dos provetes após o ensaio de propagação de fendas, sendo visível o desenvolvimento da fenda, desde a parte inferior até à parte superior do provete.

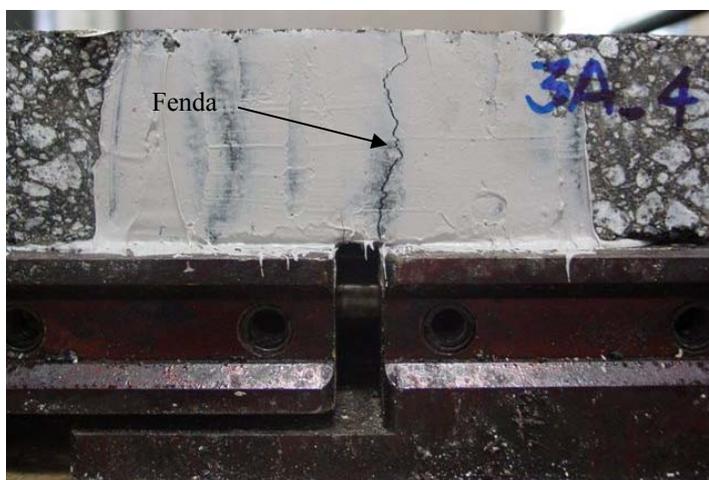


Figura 8.15 – Exemplo de uma fenda produzida no provete após ensaio (vista lateral)

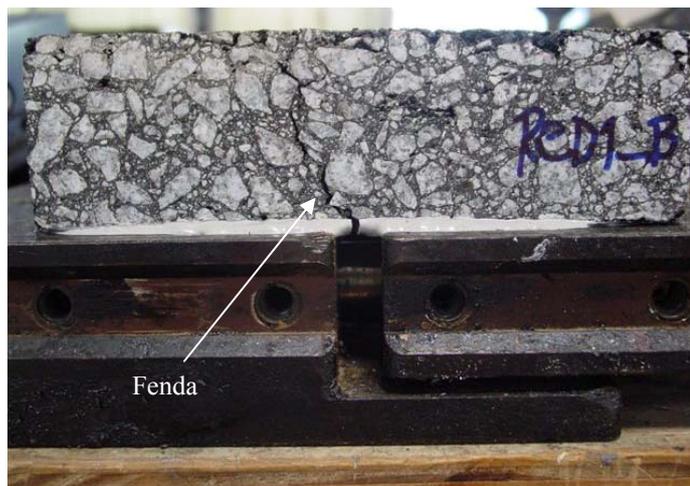


Figura 8.16 – Exemplo de uma fenda produzida no provete após ensaio (vista lateral)



Figura 8.17 – Exemplo de uma fenda produzida no provete após ensaio (vista superior)

A evolução da abertura da fenda que se desenvolve no provete durante o ensaio de propagação de fendas apresenta uma evolução, com o número de ciclos de carga, como se ilustra na Figura 8.18, a qual se caracteriza por evidenciar 3 formas distintas de desenvolvimento: (i) início rápido da fenda (primeiro tramo da curva); (ii) propagação da fenda a uma velocidade menor que a verificada para o início da fenda; (iii) rotura do provete com o desenvolvimento rápido da fenda.

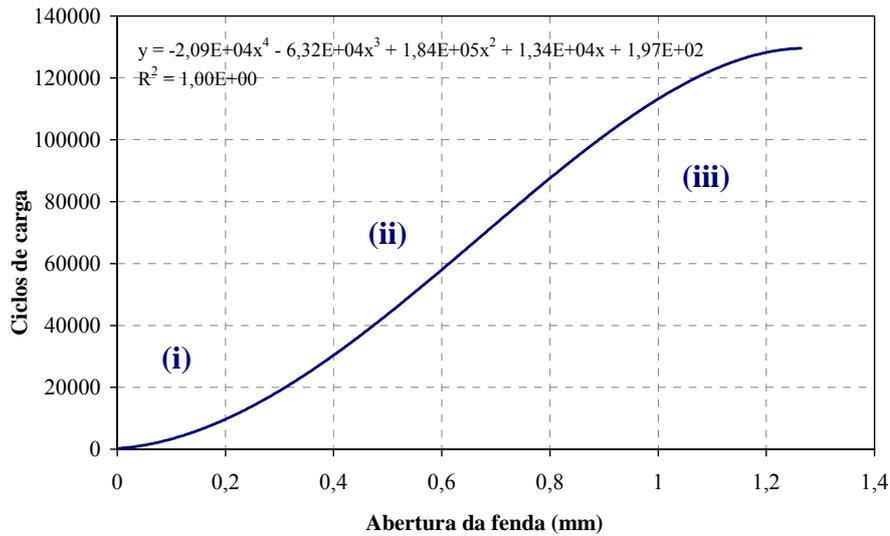


Figura 8.18 – Abertura da fenda em função do número de ciclos de carga nos ensaios RCD

Os resultados dos ensaios de propagação de fendas foram expressos pela relação entre o número de ciclos de carga e abertura da fenda, utilizando-se para o efeito uma aproximação polinomial de 4º grau de acordo com a Equação 8.9, o qual necessita de cinco coeficientes de regressão para a sua definição (a, b, c, d, e).

$$\text{Ciclos de carga} = a \times (af)^4 + b \times (af)^3 + c \times (af)^2 + d \times (af) + e \quad (8.9)$$

onde:

af = abertura da fenda (mm);

a, b, c, d, e = parâmetros de regressão.

A partir dos valores dos parâmetros obtidos para cada provete e através da Equação 8.9, a vida à propagação de fendas é calculada, admitindo-se uma abertura de fenda máxima 1,0 mm. Os parâmetros obtidos para cada provete, o deslocamento vertical, a força horizontal aplicada e a vida calculada são apresentados no Quadro 8.14.

Quadro 8.14 – Resultados dos ensaios de propagação de fendas

Mistura	Provete	Deslocamento vertical (mm)	Força Horizontal (N)	a	b	c	d	e	Vida
BBB	1	0,03	300	-3,26x10 <sup>4</sup>	1,22x10 <sup>5</sup>	-8,63x10 <sup>4</sup>	3,67x10 <sup>4</sup>	-9,26x10 <sup>2</sup>	3,89x10 <sup>4</sup>
	2	0,02	200	-5,49x10 <sup>5</sup>	1,56x10 <sup>6</sup>	-8,00x10 <sup>5</sup>	1,24x10 <sup>5</sup>	1,45x10 <sup>3</sup>	3,36x10 <sup>5</sup>
	3	0,04	400	-5,49x10 <sup>3</sup>	6,96x10 <sup>3</sup>	2,53x10 <sup>4</sup>	6,55x10 <sup>3</sup>	5,08x10 <sup>1</sup>	3,34x10 <sup>4</sup>
	4	0,02	200	-3,00x10 <sup>5</sup>	9,58x10 <sup>5</sup>	-4,66x10 <sup>5</sup>	7,94x10 <sup>4</sup>	7,69x10 <sup>2</sup>	2,72x10 <sup>5</sup>
	5	0,03	300	-9,89x10 <sup>3</sup>	3,48x10 <sup>3</sup>	6,94x10 <sup>4</sup>	3,13x10 <sup>2</sup>	8,35x10 <sup>2</sup>	6,41x10 <sup>4</sup>
	6	0,04	400	-3,60x10 <sup>3</sup>	1,02x10 <sup>4</sup>	-6,36x10 <sup>2</sup>	8,54x10 <sup>3</sup>	-1,82x10 <sup>1</sup>	1,45x10 <sup>4</sup>
CBCbP	1	0,05	400	-7,99x10 <sup>4</sup>	-2,18x10 <sup>5</sup>	7,28x10 <sup>5</sup>	1,86x10 <sup>4</sup>	1,29x10 <sup>3</sup>	4,50x10 <sup>5</sup>
	2	0,05	400	2,35x10 <sup>4</sup>	-1,40x10 <sup>5</sup>	1,85x10 <sup>5</sup>	3,68x10 <sup>4</sup>	-1,61x10 <sup>2</sup>	1,05x10 <sup>5</sup>
	3	0,05	400	7,30x10 <sup>4</sup>	-4,29x10 <sup>5</sup>	6,48x10 <sup>5</sup>	2,40x10 <sup>4</sup>	3,31x10 <sup>2</sup>	3,16x10 <sup>5</sup>
	4	0,03	400	1,70x10 <sup>6</sup>	-2,71x10 <sup>6</sup>	2,56x10 <sup>6</sup>	1,60x10 <sup>4</sup>	-9,83x10 <sup>2</sup>	1,57x10 <sup>6</sup>
	5	0,03	400	2,69x10 <sup>5</sup>	-1,99x10 <sup>6</sup>	3,15x10 <sup>6</sup>	1,04x10 <sup>5</sup>	-6,08x10 <sup>3</sup>	1,53x10 <sup>6</sup>
IBCbB	1	0,05	400	-8,06x10 <sup>3</sup>	-6,42x10 <sup>4</sup>	1,93x10 <sup>5</sup>	1,41x10 <sup>4</sup>	6,20x10 <sup>2</sup>	1,35x10 <sup>5</sup>
	2	0,05	400	-1,83x10 <sup>4</sup>	-3,58x10 <sup>4</sup>	1,35x10 <sup>5</sup>	1,67x10 <sup>4</sup>	-1,32x10 <sup>2</sup>	9,75x10 <sup>4</sup>
	3	0,05	400	1,82x10 <sup>4</sup>	-1,81x10 <sup>5</sup>	3,17x10 <sup>5</sup>	-1,21x10 <sup>4</sup>	4,47x10 <sup>2</sup>	1,43x10 <sup>5</sup>
	4	0,04	400	-2,09x10 <sup>4</sup>	-6,32x10 <sup>4</sup>	1,84x10 <sup>5</sup>	1,34x10 <sup>4</sup>	1,97x10 <sup>2</sup>	1,13x10 <sup>5</sup>
	5	0,04	400	9,02x10 <sup>4</sup>	-7,05x10 <sup>5</sup>	9,85x10 <sup>5</sup>	1,40x10 <sup>4</sup>	7,69x10 <sup>2</sup>	3,85x10 <sup>5</sup>
	6	0,03	400	-5,57x10 <sup>5</sup>	7,70x10 <sup>5</sup>	1,24x10 <sup>5</sup>	3,34x10 <sup>4</sup>	1,61 x10 <sup>2</sup>	3,71x10 <sup>5</sup>

### 8.3.5. Cálculo da extensão de Von Mises correspondente aos ensaios de propagação de fendas

Nos ensaios de propagação de fendas realizados com o *Reflective Cracking Device* (RCD) foram aplicados deslocamentos verticais e forças horizontais, variáveis estas que não permitem, de uma forma directa, relacionar o ensaio com o comportamento do reforço do pavimento.

Nos estudos numéricos de propagação de fendas, o comportamento do reforço do pavimento foi relacionado com a extensão deviatória de Von Mises, pelo que também nestes ensaios se utilizará a mesma variável para análise dos resultados dos ensaios laboratoriais.

Deste modo foi realizada uma análise numérica dos ensaios de propagação de fendas para, a partir do módulo dinâmico da mistura, do deslocamento e da força aplicada a cada provete, se obter a extensão de Von Mises instalada no provete. A análise foi realizada utilizando o programa de elementos finitos ANSYS 10.0 (*Multiphysics*), apresentando-se na Figura 8.19 a malha de elementos finitos (deformada) utilizada para simular o provete em cada ensaio.

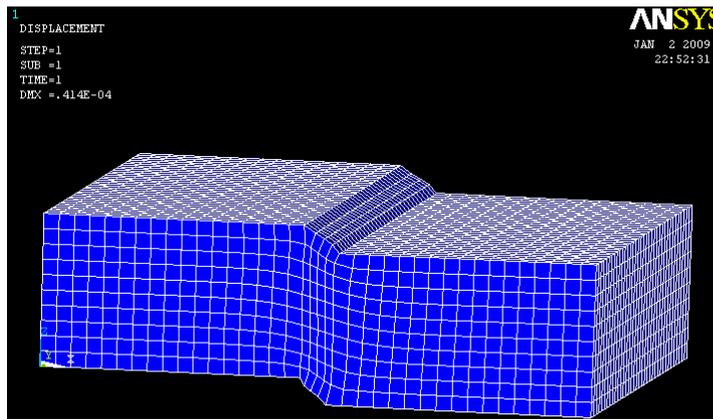


Figura 8.19 – Malha de elementos finitos (deformada)

O campo de deslocamentos horizontal e vertical instalado no provete na simulação numérica pode ser observado na Figura 8.20. Nas Figuras 8.21 e 8.22 ilustram-se os estados de extensão instalados nos provetes, nomeadamente a componente horizontal, vertical, de corte (distorção) (horizontal-vertical) e a deviatória de Von Mises.

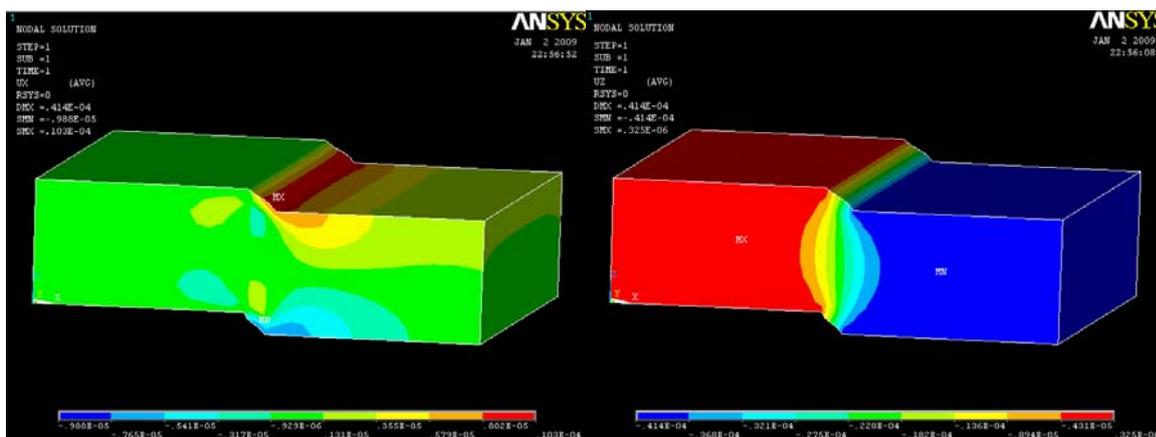


Figura 8.20 – Campo de deslocamento horizontal (esquerda) e vertical (direita)

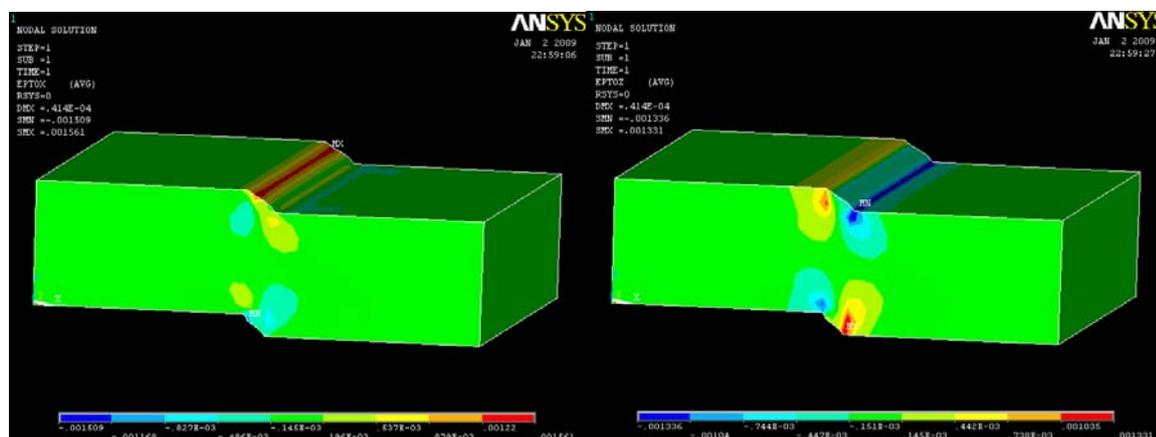


Figura 8.21 – Extensão horizontal (esquerda) e extensão vertical (direita)

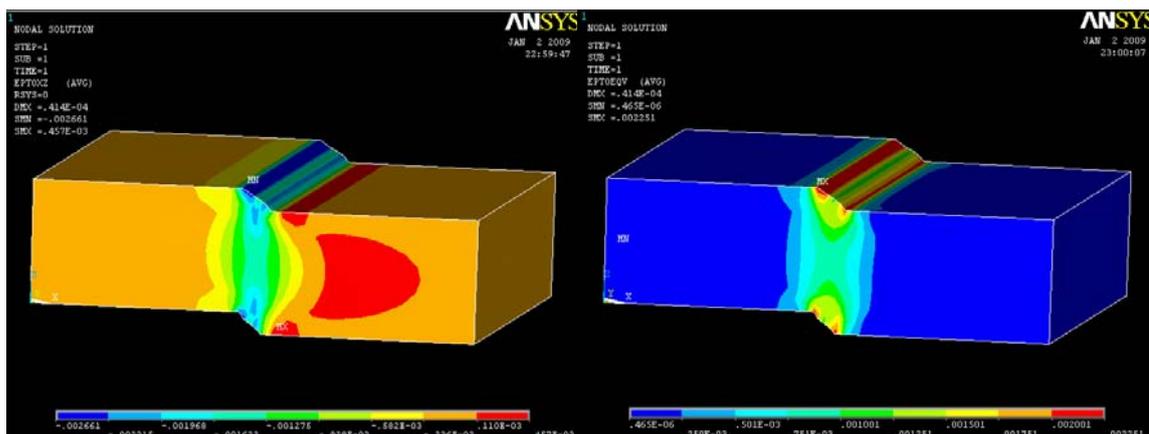


Figura 8.22 – Distorção (esquerda) e extensão de Von Mises (direita)

O estado de tensão que os provetes estão submetidos encontra-se representado nas Figura 8.23 quanto à componente vertical e de corte (horizontal-vertical). O estado de tensão de Von Mises está representado na Figura 8.24.

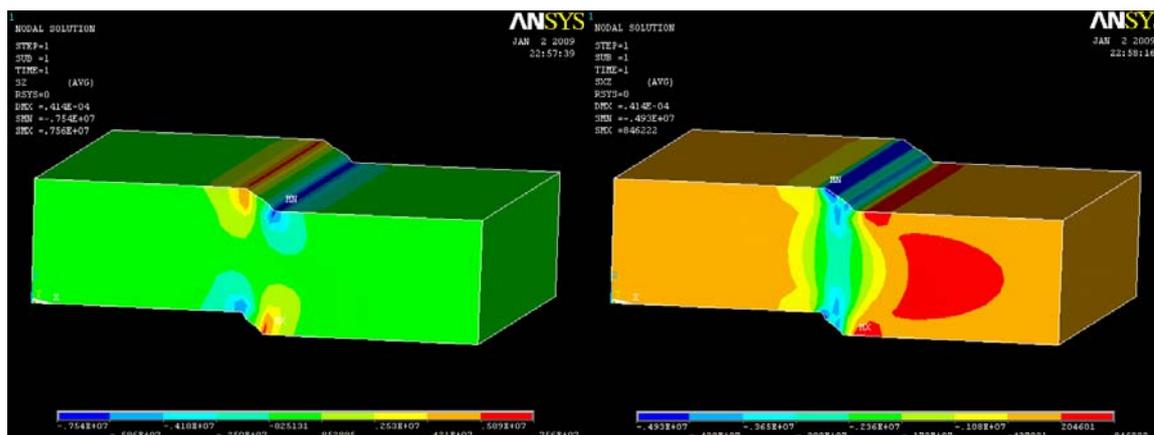


Figura 8.23 – Tensão vertical (esquerda) e de corte horizontal-vertical (direita)

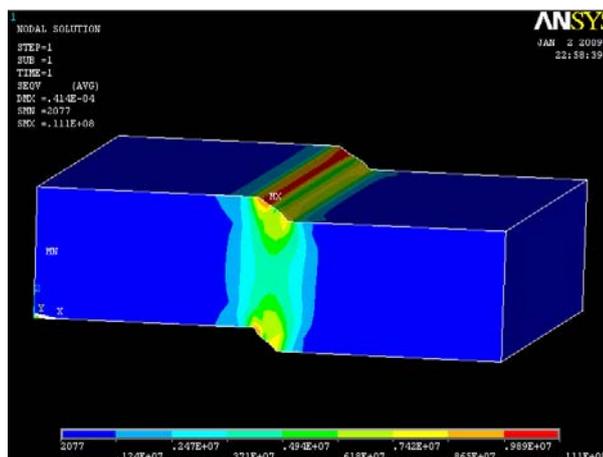


Figura 8.24 – Tensão de Von Mises

A análise de elementos finitos permitiu obter, para cada provete, a extensão de Von Mises que se indica no Quadro 8.15.

Quadro 8.15 – Extensões de Von Mises ( $\epsilon_{vm}$ )

Misturas	Provete	Deslocamento vertical (mm)	Força horizontal (N)	Módulo (MPa)	$\epsilon_{vm}$ ( $10^{-6}$ )
BBB	1	0,03	300	6314	1684
	2	0,02	200	6314	1122
	3	0,04	400	6314	2245
	4	0,02	200	6314	1122
	5	0,03	300	6314	1684
	6	0,04	400	6314	2245
CBCbP	1	0,05	400	5192	2805
	2	0,05	400	5192	2805
	3	0,05	400	5192	2805
	4	0,03	400	5192	1694
	5	0,03	400	5192	1694
IBCbB	1	0,05	400	6273	2801
	2	0,05	400	6273	2801
	3	0,05	400	6273	2801
	4	0,04	400	6273	2245
	5	0,04	400	6273	2245
	6	0,03	400	6273	1699

Os resultados dos ensaios de propagação de fendas, expressos em termos de rectas de fadiga, são representados na Figura 8.25, as quais permitem obter a vida do reforço em termos de propagação de fendas conhecendo-se a extensão de Von Mises a que o pavimento está submetido.

A análise destas rectas de fadiga permite concluir que a mistura CBCbP apresenta um desempenho à propagação de fendas superior às demais, isto para o mesmo nível de extensão de Von Mises.

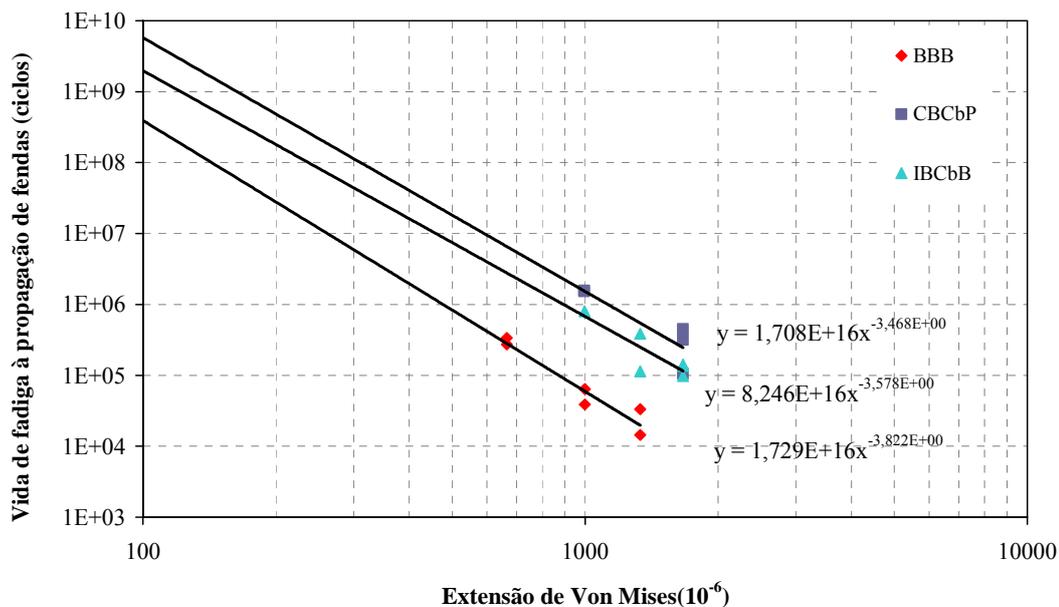


Figura 8.25 – Rectas de fadiga à propagação de fendas

Os resultados dos ensaios de propagação de fendas são também representados na forma de lei de fadiga, de acordo com a Equação 8.10, permitindo obter a vida à fadiga em propagação de fendas para qualquer valor da extensão de Von Mises. Os coeficientes de regressão para o modelo são apresentados no Quadro 8.16.

$$\text{Vida} = a \times (\epsilon_{VM})^b \tag{8.10}$$

onde:

Vida = resistência à fadiga em propagação de fendas;

$\epsilon_{VM}$  = extensão de Von Mises (10<sup>-6</sup>);

a, b = parâmetros de regressão.

Quadro 8.16 – Coeficientes da lei de fadiga em propagação de fendas

Misturas	IBCbB	CBCbP	BBB
a	1,71x10 <sup>16</sup>	8,25x10 <sup>16</sup>	1,73x10 <sup>16</sup>
b	-3,47	-3,85	-3,82

### 8.3.6. Aplicação dos resultados do ensaio de propagação de fendas

Os ensaios de propagação de fendas foram expressos em termos de leis de fadiga que relacionam a vida à fadiga em propagação de fendas com a extensão de Von Mises e que permitem, conhecendo a extensão de Von Mises, prever a vida que o reforço do pavimento consegue suportar. A determinação da extensão de Von Mises para o reforço de um pavimento requer, como se viu neste capítulo, a modelação do pavimento através de elementos finitos.

De acordo com a metodologia utilizada para determinação da propagação de fendas recorrendo a análise numérica, o estudo foi realizado para cada mês do ano, com o qual se determinou o dano do pavimento, como o somatório do dano dos vários meses do ano. A determinação de uma extensão de Von Mises para o reforço do pavimento assume contornos semelhantes, obtendo-se uma extensão para cada mês.

De acordo com os resultados de Minhoto *et al.* (2008), indicados na Figura 8.26, o reforço do pavimento está sujeito a menor vida durante os meses mais quentes<sup>2</sup>, nomeadamente entre Maio e Setembro. Nesta figura, o eixo das abcissas corresponde aos meses do ano (ano de 2004) e no eixo das ordenadas está indicada a vida prevista de propagação de fendas, para um eixo padrão de 80 kN.

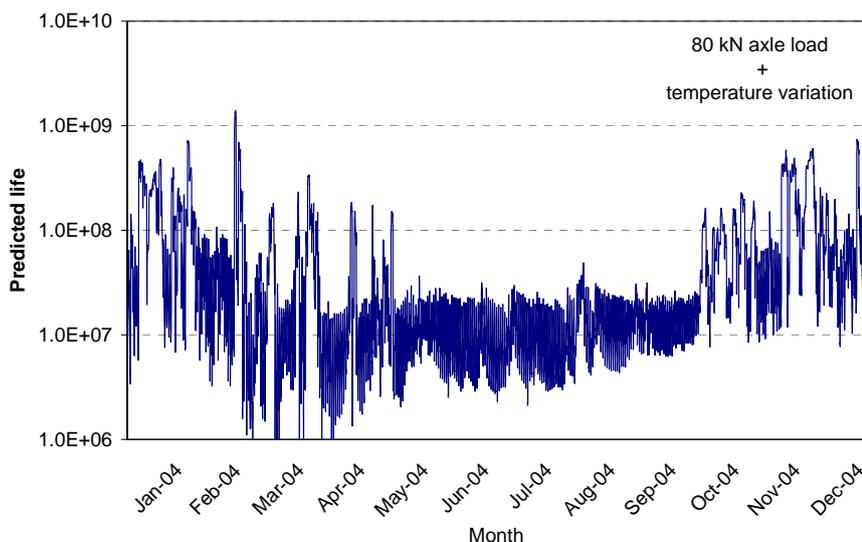


Figura 8.26 – Previsão da vida do reforço ao longo do ano (Minhoto *et al.*, 2008)

<sup>2</sup> A investigação de Minhoto (2007) foi desenvolvida em Portugal, situado no hemisfério norte, correspondendo os meses de verão entre Junho e Setembro, ao contrário do Brasil, situado no hemisfério sul.

Deste modo, a determinação da extensão de Von Mises, como representativa do comportamento do reforço do pavimento para obtenção da vida do pavimento em propagação de fendas, deverá ser determinada para condições de temperatura máxima de 25 °C e amplitude térmica de 15 °C, de acordo com as temperaturas características do Sul do Brasil, região de Florianópolis, Santa Catarina (Quadro 8.17).

Além dos modelos de propagação de fendas estudarem o comportamento mensal do reforço, estes modelos também consideram a variação horária do comportamento do pavimento, pelo que a extensão de Von Mises deverá ser representativa de uma hora, ou conjunto de horas, que simulem o fenómeno da propagação de fendas.

Quadro 8.17 – Temperaturas mensais representativas do Sul do Brasil

Mês	T <sub>máx</sub> (°C)	ΔT (°C)
Julho	10,14	8,06
Agosto	11,02	10,67
Setembro	11,69	9,95
Outubro	15,69	13,13
Novembro	19,68	12,29
Dezembro	28,13	15,22
Janeiro	27,68	15,17
Fevereiro	25,78	11,49
Março	25,16	16,46
Abril	16,75	9,12
Mai	10,09	9,13
Junho	9,08	9,45

Assim, para extensão de Von Mises considerou-se o valor médio que ocorre no período compreendido entre as 14 e as 20 horas por ser o período do dia em que ocorrem as maiores extensões no pavimento.

Deste modo, para o reforço com as misturas em consideração, as extensões de Von Mises e a respectiva vida do reforço à propagação de fendas são indicadas no Quadro 8.18, bem como uma comparação relativa da vida do reforço em relação à da mistura convencional (BBB).

Quadro 8.18 – Extensões de Von Mises e vida do reforço

Misturas	IBCbB	CBCbP	BBB
$\epsilon_{vm}$	$128 \times 10^{-6}$	$154 \times 10^{-6}$	$141 \times 10^{-6}$
Vida	$8,41 \times 10^8$	$1,23 \times 10^9$	$1,06 \times 10^8$
Vida relativa	7,97	11,64	1,00

De acordo com os valores obtidos, a mistura CBCbP apresentou o melhor desempenho, tal como já observado na análise das rectas de fadiga em propagação de fendas.

Comparativamente à mistura convencional (BBB), a mistura CBCbP apresenta uma vida 11 vezes superior enquanto a mistura IBCbB apresenta uma vida 8 vezes superior. Estes valores comprovam o melhor desempenho das misturas com betume-borracha em relação à mistura convencional, tal como já observado na avaliação da resistência à fadiga em flexão em 4 pontos e na modelação numérica da propagação de fendas, e que se resume no Quadro 8.19.

Quadro 8.19 – Vida relativa das misturas

Vida relativa	IBB151	CBB201	IBCbB	CBCbP	BBB
$N_{100}$ (fadiga)	300,6	260,5	57,7	17,8	1,0
Modelação numérica da propagação de fendas	29,9	24,9	21,0	5,9	1,0
Ensaio laboratoriais de propagação de fendas	-	-	8,0	11,6	1,0

Da análise da vida relativa das várias misturas é possível observar que o desempenho obtido na resistência à fadiga em flexão em 4 pontos não se repercute na propagação de fendas, em que valores de vida relativa de 57,7 vezes são reduzidos para 8 vezes em termos de ensaio laboratorial.

Em termos médios, uma mistura com betume-borracha *continuous blend* apresenta uma vida à propagação de fendas pelo menos 5 vezes superior à obtida por uma mistura convencional. Para as misturas com betume-borracha *terminal blend* é de esperar uma vida à propagação de fendas pelo menos idêntica à das misturas com betume betume-borracha *continuous blend*, já que em termos numéricos as misturas com betume-borracha *terminal blend* apresentam uma vida superior às misturas com betume-borracha *continuous blend*.

## 8.4. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 8

Neste capítulo foi apresentada a simulação numérica da propagação de fendas realizada com as misturas com betume-borracha seleccionadas na Fase 4 e a mistura convencional de referência, avaliando-se o dano causado pelo tráfego e pelo clima em um pavimento a ser reabilitado. Nesta fase foram realizados também ensaios de propagação de fendas recorrendo ao equipamento RCD (*Reflective Cracking Device*).

A análise numérica consistiu na modelação mecânica de um pavimento, e respectivo reforço, simulando-se a acção do tráfego, das variações de temperatura e a ocorrência simultânea destas duas acções. O comportamento mecânico (módulo dinâmico e resistência à fadiga) das misturas betuminosas introduzido na modelação foi obtido nos Capítulos 6 e 7.

O modelo de elementos finitos utilizado na simulação numérica foi composto por uma estrutura representando o pavimento antigo e uma camada de reforço. Na camada betuminosa do pavimento existente foi simulada uma fenda com uma largura de 1 cm, de modo a simular uma fenda real de 2 a 3 mm.

Como o estudo da propagação de fendas é realizado tendo em consideração o efeito das variações de temperatura, os módulos de deformabilidade das misturas betuminosas tiveram de ser expressos função da temperatura, utilizando-se para isso os resultados obtidos a 15; 20; 25 °C, para a frequência de 10 Hz.

A aplicação do modelo de elementos finitos demandou para determinação da vida do reforço do pavimento uma lei da resistência à fadiga do material da camada de reforço função da temperatura, pelo que as leis de fadiga das misturas betuminosas foram expressas em função do módulo dinâmico e da extensão.

No estudo do dano associado à propagação de fendas considerou-se um tráfego anual correspondente ao tráfego da IP4, utilizado por Minhoto (2007). A análise numérica da propagação de fendas foi realizada às temperaturas do ar representativas da região de Florianópolis, Santa Catarina, a partir das quais se obteve o dano mensal do reforço do pavimento, para cada mistura considerada através da sua lei de fadiga. Os resultados da

análise numérica permitiram a obtenção dos danos mensais e conseqüentemente, a previsão do dano médio mensal de cada mistura, adaptado às condições climáticas do Sul do Brasil.

O somatório do dano mensal permitiu obter o dano anual, sendo que o dano mais elevado foi observado para a mistura convencional BBB. O reforço com a mistura BBB apresenta uma vida 29,9 vezes inferior ao reforço com a melhor mistura com betume-borracha (IBB151).

A elevada diferença de vida entre as misturas deve-se ao facto da comparação estar a ser realizada perante uma mistura com um desempenho normal (BBB) e outras com um desempenho mecânico muito superior, optimizadas de modo a obter uma elevada resistência.

A análise dos resultados dos ensaios laboratoriais foi realizada através da avaliação do ciclo de carga em que se desenvolveu uma fenda no provete com 1 mm de abertura através do equipamento RCD. Nos estudos numéricos de propagação de fendas, o comportamento do reforço do pavimento foi relacionado com a extensão deviatória de Von Mises, também utilizada nestes ensaios para análise dos resultados laboratoriais.

Os resultados obtidos no estudo da propagação de fendas permitiram concluir que uma mistura com betume-borracha apresenta uma vida à propagação de fendas pelo menos 5 vezes superior à obtida por uma mistura convencional.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ANSYS, 2005. ANSYS 10.0 Multiphysics Computer Program. ANSYS, Inc. Theory Reference – Realise 2005. Canonsburg, PA, USA.
- Minhoto, M.J.C., 2007. Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal.
- Minhoto, M.J.C., Pais, J.C., Pereira, P.A.A., 2008. Influence of Temperature Variation on the Reflective Cracking Behaviour of Asphalt Overlays. Road Materials and Pavement Design. vol 9, nº 4, p. 615-632.
- Pais, J.C., 1999. Consideração da Propagação de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal.
- Sousa, J.B.; Shatnawi, S.; Cox, J., 1996. An Approach for Investigating Reflective Fatigue Cracking in Asphalt-Aggregate Overlays. Proceedings of the Third International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements.



## Capítulo 9

### CONCLUSÃO

#### 9.1. SÍNTESE DO TRABALHO

O Brasil é um país com o sistema rodoviário de transporte baseado em rodovias cuja idade e a crescente demanda de tráfego pesado conduziu à acelerada degradação dos pavimentos, os quais possuem sua camada de desgaste composta por misturas betuminosas produzidas com betumes convencionais. Face a este cenário tornou-se necessária a investigação de misturas betuminosas cujo desempenho pudesse retardar o aparecimento das principais patologias verificadas nas camadas de desgaste dos pavimentos flexíveis brasileiros, como o fendilhamento por fadiga, a deformação permanente e a propagação de fendas.

De acordo com a literatura consultada, a incorporação de borracha de pneus ao betume produz o betume-borracha que, aplicado em misturas betuminosas, contribui para a melhoria das propriedades mecânicas além de ser uma alternativa ecológica para depósito dos pneus insersíveis.

No Brasil, o betume-borracha é produzido através do sistema *terminal blend*. As aplicações de misturas com betume-borracha em camadas de desgaste de pavimentos em serviço têm apresentado um bom desempenho, retardando as patologias anteriormente verificadas quando da aplicação de misturas convencionais.

Através desta investigação procurou contribuir-se para um melhor conhecimento das misturas betuminosas com betume-borracha, caracterizando-se materiais brasileiros através de ensaios de laboratório para avaliação da resistência à fadiga, resistência à deformação permanente e capacidade de redução de fendas por propagação.

Considerando que o Brasil ainda carece da determinação de curvas de fadiga de misturas com betume-borracha, neste trabalho realizou-se uma ampla investigação da resistência à fadiga através de ensaios de flexão alternada em quatro pontos, utilizando-se diferentes tipos de betume, de borracha, de produção de betume-borracha e de curvas granulométricas. Além

disto, a resistência à deformação permanente foi investigada, através do ensaio RSST-CH (*Repeated Simple Shear Test at Constant Height*). Assim, foi alcançado um dos objectivos desta investigação ao avaliar-se o comportamento mecânico de misturas betuminosas com betume-borracha em relação a uma mistura convencional para o clima do Brasil.

A avaliação, em laboratório, do desempenho mecânico de misturas betuminosas com betume-borracha objectivou obter-se misturas optimizadas para compará-las com uma mistura betuminosa com betume convencional. Para tal, foram utilizados dois tipos de betume-borracha, o *continuous blend*, produzido e optimizado em laboratório, e o *terminal blend*, produzido em unidade industrial no Brasil, com materiais (betume e borracha) de procedência brasileira. Os agregados graníticos e o filer utilizados na produção das misturas betuminosas foram de procedência portuguesa, mas com as mesmas características daqueles encontrados na região Sul do Brasil. De modo a avaliar o desempenho dos materiais brasileiros em relação aos europeus, foram produzidas também misturas betuminosas com materiais portugueses.

Numa primeira etapa, os agregados minerais e o filer foram caracterizados, assim como o betume convencional brasileiro (CAP 50/70), o betume-borracha do tipo *terminal blend* (com 15% e 20% de borracha) e a borracha micronizada brasileira do sistema ambiente. Posteriormente, o betume-borracha do tipo *continuous blend* foi optimizado em laboratório, com base em critérios de selecção a partir dos ensaios de caracterização dos betumes, através da avaliação de variáveis como tempo de digestão, temperatura de mistura e percentagem de borracha.

Com os dois tipos de betume-borracha foram produzidas misturas betuminosas com as seguintes granulometrias: (i) *dense graded* (*Asphalt Institute AI* – tipo IV); (ii) *gap graded* (ADOT AR-AC – *Asphalt Rubber Asphalt Concrete*; (iii) *gap graded* Caltrans ARHM-GG – *Asphalt Rubber Hot Mix – Gap Graded*). A granulometria da mistura convencional foi do tipo *dense graded* (DNIT, faixa “C”), sendo esta a mistura de referência. A percentagem de betume e os parâmetros volumétricos das misturas foram determinados através da metodologia Marshall.

O desempenho mecânico das misturas betuminosas foi avaliado com base nos resultados obtidos nos seguintes ensaios:

- módulo dinâmico: ensaio de flexão alternada em quatro pontos a três temperaturas (15, 20 e 25 °C) e a sete frequências (10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2; 0,1 Hz);
- resistência à fadiga: ensaio de flexão alternada em quatro pontos à temperatura de 20 °C e a três níveis de extensão de tracção ( $800 \times 10^{-6}$ ,  $400 \times 10^{-6}$  e  $200 \times 10^{-6}$ );
- resistência à deformação permanente e módulo de corte: ensaio de corte simples repetido a altura constante – RSST-CH, à temperatura de 60 °C.

Como os resultados obtidos nos ensaios de laboratório não obtiveram o desempenho esperado em relação à resistência à fadiga, e com o objectivo de avaliar o desempenho dos materiais brasileiros (betume CAP 50/70 e borracha ambiente), foram produzidas misturas betuminosas com a granulometria do Caltrans, utilizando materiais portugueses (betumes PEN 50/70 e PEN 35/50 e a borracha criogénica). Os novos betumes-borracha produzidos foram avaliados através de ensaios de caracterização, sendo também realizada a análise de microscopia por varrimento electrónico e avaliadas as propriedades reológicas e de envelhecimento através do ensaio RTFOT (*Rolling Thin-Film Oven Test*).

Nesta fase do estudo, os resultados de fadiga e de deformação permanente mostraram que a mistura de melhor desempenho foi a mistura produzida com um betume mais rígido (PEN 35/50). Quanto à deformação permanente, os resultados considerados aceitáveis dependem da especificação adoptada pelas administrações rodoviárias. Quanto à fadiga, para níveis de extensão de  $100 \times 10^{-6}$ , esperava-se que as misturas com betume-borracha obtivessem uma vida superior a  $10^8$ , podendo um desempenho superior à fadiga ser obtido através de um acréscimo da percentagem de ligante na mistura.

Com o objectivo de aumentar a resistência à fadiga foram aumentadas as percentagens de betume das misturas com betume-borracha obtidas através da metodologia Marshall e também foi utilizada a equação desenvolvida por Way (2003) para misturas com betume-borracha, para a qual as percentagens obtidas são superiores às determinadas através da metodologia Marshall.

Com base na análise anterior foram produzidas misturas piloto empregando-se mais 1% de betume do que o obtido através da metodologia Marshall a fim de verificar se efectivamente ocorreria um aumento de resistência à fadiga e também a influência deste incremento da percentagem de betume no desempenho à deformação permanente. A partir dos resultados

obtidos foi verificado que um aumento na percentagem de betume de mais 1% conduziu a uma maior resistência à fadiga sem prejudicar o desempenho em relação à deformação permanente. Neste contexto, optou-se pela produção de novas misturas betuminosas com betume-borracha de modo a verificar a efectiva melhoria do desempenho. Adicionalmente foram realizados ensaios complementares sobre as lajes produzidas em laboratório, como macrotextura e microtextura para determinação do Índice de Atrito Internacional e também ensaios de escorrimento e drenabilidade.

Do elevado número de misturas estudadas foram seleccionadas cinco misturas com elevado desempenho para o dimensionamento. A selecção das misturas com betume-borracha foi realizada a partir de critérios de decisão com base nos resultados de resistência à fadiga e à deformação permanente, no tipo de granulometria (*dense e gap graded*) e no tipo de betume (*terminal blend e continuous blend*). A mistura com betume convencional também foi seleccionada por ser a mistura de referência.

Para as cinco misturas seleccionadas foram também realizados ensaios de deformação permanente com o simulador de tráfego *Wheel Tracking*, utilizando uma configuração de modo a simular a reabilitação de uma camada de desgaste reabilitada sobre uma camada betuminosa com betume convencional. Os resultados obtidos através do simulador de tráfego *Wheel Tracking* mostraram que as misturas com betume-borracha efectivamente apresentam maior resistência à deformação permanente.

A resistência à propagação de fendas foi inicialmente avaliada recorrendo a uma simulação numérica em que foram consideradas as quatro misturas com betume-borracha seleccionadas e a mistura convencional de referência, avaliando-se o dano causado pelo tráfego e pelo clima em um pavimento a ser reabilitado. Em seguida foram realizados ensaios de propagação de fendas através do equipamento RCD (*Reflective Cracking Device*).

## 9.2. CONCLUSÕES FINAIS

Relativamente à optimização do betume e da borracha, com base nos resultados dos ensaios de caracterização (ponto de amolecimento, resiliência e viscosidade aparente) e microscopia

electrónica por varrimento realizados com os betumes-borracha produzidos, foi possível obter as seguintes conclusões:

- a percentagem de borracha possui influência na viscosidade do betume-borracha, havendo um significativo aumento da viscosidade com o aumento da percentagem de borracha;
- a evolução da viscosidade em função da percentagem de borracha permitiu a definição de dois tipos de betume-borracha que atenderam às especificações, com 17% de borracha, para a temperatura de 180 °C e tempos de digestão: 60 e 90 minutos;
- a microscopia por varrimento mostrou ser uma ferramenta importante na verificação final do desempenho dos betumes-borracha, e mostrou que aos 90 minutos, o sistema betume-borracha apresentou-se homogéneo;
- o betume-borracha otimizado nesta investigação apresentou uma percentagem de borracha de 17% para um tempo de digestão de 90 minutos à temperatura de 180 °C.

Através da microscopia electrónica por varrimento foi ainda avaliada a morfologia das borrachas ambiente e criogénica e a compatibilidade dos sistemas betume-borracha produzidos tendo-se concluído que no betume-borracha produzido com a borracha ambiente, a borracha reage mais rapidamente com o betume justamente pelo facto da sua estrutura morfológica ser irregular. Além disto, a borracha criogénica apresentou menor elasticidade recuperável quando comparada à borracha ambiente.

Considerando a introdução de materiais portugueses na investigação, nomeadamente os betumes PEN 50/70 e PEN 35/50 e a borracha criogénica, juntamente com o betume brasileiro CAP 50/70 e borracha ambiente brasileira, pôde concluir-se que:

- os betumes-borracha produzidos com o betume convencional PEN 35/50 obtiveram um menor valor de penetração em relação aos restantes, independentemente do tipo de borracha adicionada;
- o valor da penetração aumentou quando a borracha criogénica foi adicionada ao betume CAP 50/70 em comparação com a adição da borracha ambiente;
- os valores da resiliência foram iguais para os betumes-borracha produzidos com o betume CAP 50/70, independente da borracha adicionada; entretanto, no caso dos betumes-borracha produzidos com o betume PEN 50/70, a adição da borracha ambiente elevou o valor da resiliência em 50% em relação à adição da borracha criogénica;

- a incorporação da borracha ambiente resultou em valores de viscosidade mais elevados em todos os tipos de betumes-borracha em comparação com a incorporação da borracha criogénica.

Relativamente à viscosidade pôde observar-se que a utilização de uma borracha com maior superfície específica (ambiente) aumentou os valores das viscosidades, ou seja, com a diminuição da superfície específica da borracha pode diminuir-se a viscosidade e aumentar a percentagem de borracha incorporada. No entanto, a diminuição da superfície específica faz com que a área de contacto entre a borracha e o betume convencional seja menor e isto diminui o nível de interacção entre estes materiais.

A resiliência apresentou-se mais elevada com a presença da borracha ambiente, mais propícia à absorção das fracções leves dos betumes. O aumento da resiliência está relacionado com o acréscimo da capacidade de recuperação elástica.

Comparativamente aos betumes com a mesma classificação, PEN 50/70 e CAP 50/70, pôde verificar-se que a modificação com a borracha ambiente produziu betumes-borracha menos susceptíveis à temperatura, tendo em conta a maior absorção dos voláteis que este tipo de borracha proporciona.

De acordo com os resultados dos ensaios RTFOT, os betumes-borracha são mais resistentes ao envelhecimento do que os betumes convencionais. O aumento da resiliência após o ensaio RTFOT pode ser um indicativo de que durante a produção das misturas na central ocorrerá ainda uma maior interacção entre a borracha e o betume. Assim, pôde concluir-se que os betumes-borracha produzem misturas betuminosas mais flexíveis mesmo após o envelhecimento a que ficam submetidas durante a produção, espalhamento e compactação.

A optimização do desempenho das misturas Caltrans foi realizada através da combinação entre o betume brasileiro (CAP 50/70) e a borracha brasileira (ambiente) com os betumes portugueses (PEN 50/70 e PEN 35/50) e a borracha (criogénica) portuguesa. Com base nos resultados dos ensaios de fadiga e de deformação permanente concluiu-se que a utilização de um betume mais rígido (PEN 35/50) resultou numa melhor resistência à fadiga e à deformação permanente.

Com base nos resultados de desempenho obtidos foram produzidas misturas betuminosas com 1% a mais de percentagem de betume em relação à percentagem óptima obtida através da metodologia Marshall. As principais conclusões a partir da avaliação do desempenho mecânico destas novas misturas com betume-borracha foram as seguintes:

- todas as misturas nas quais foi acrescentado mais 1% de betume em relação à percentagem óptima, obtida através da metodologia Marshall, melhoraram o desempenho à fadiga;
- as misturas *terminal blend* com mais 1% de betume obtiveram um desempenho superior à fadiga em relação às correspondentes misturas com a percentagem óptima e em relação às misturas *continuous blend* com mais 1% de betume e suas correspondentes;
- as misturas com betume-borracha apresentaram maior resistência à deformação permanente que a mistura convencional e o aumento de 1% de betume mostrou que, em geral, não houve um decréscimo da resistência à deformação permanente;
- a utilização de materiais portugueses mostrou que as misturas com betume base mais rígido apresentaram maior resistência à fadiga e à deformação permanente;
- para as misturas estudadas, a metodologia Marshall não se mostrou adequada para determinação da percentagem óptima de betume para betumes modificados pela adição de borracha.

Quanto ao módulo dinâmico e ângulo de fase, as seguintes observações foram realizadas:

- as misturas com betume-borracha apresentam menores módulos dinâmicos do que a mistura convencional;
- o módulo dinâmico aumentou para as misturas *gap graded* com mais 1% de betume-borracha, para os dois tipos de betume, *continuous blend* e *terminal blend*;
- o módulo diminuiu para as misturas *dense graded AI* com mais 1% de betume, para os dois tipos de betume-borracha;
- em geral, o ângulo de fase diminuiu para as misturas com percentagem de betume mais elevada (mais 1%), mas sem variação significativa.

A análise reológica aos betumes-borracha com o intuito de prever a resistência à fadiga das misturas betuminosas permitiu concluir que o parâmetro  $E^* \cdot \sin \delta$  nem sempre é um bom indicador da resistência à fadiga.

A previsão do desempenho à deformação permanente foi avaliada através do parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$ , através dos valores de módulo de corte ( $G$ ), do ângulo de fase ( $\delta$ ) obtidos na frequência de 10 Hz e temperatura de 60 °C, tendo-se observado que o aumento de 1% de betume nas misturas produziu uma diminuição do parâmetro de  $G^*/\text{sen}\delta$  e, conseqüentemente, conduziria a um desempenho inferior em relação à deformação permanente. Entretanto, a resistência à deformação permanente aumentou. Assim, este parâmetro não foi um indicador de desempenho.

Quanto aos ensaios adicionais realizados, os resultados mostraram a macrotextura decrescente com o aumento da percentagem de finos da granulometria. Para as misturas com betume-borracha, de acordo com o tipo de granulometria, as misturas *terminal blend* apresentaram um valor mais elevado de macrotextura, sendo que nestas, as misturas *gap graded* apresentaram a macrotextura maior. Os resultados obtidos, em geral, para as misturas com betume-borracha são mais elevados que os medidos na mistura convencional, o que indicaram uma melhoria das propriedades funcionais das misturas com betume-borracha. As misturas estudadas apresentaram o valor da macrotextura entre os limites sugeridos pelo DNIT.

Nesta investigação fez-se ainda uma proposta de dimensionamento, com base na qual concluiu-se ser possível obter uma significativa redução da espessura da camada de desgaste quando da aplicação de misturas com betume-borracha.

Com o objectivo de complementar os benefícios do uso de misturas com betume-borracha em relação à uma mistura convencional foi realizada uma análise simplificada de custo/benefício considerando-se a redução de espessura das camadas betuminosas de desgaste. Com base na solução obtida no trabalho, a utilização de uma mistura com betume-borracha em relação a uma mistura convencional conduziu à uma economia de até 32%, além da redução do custo fixo das instalações industriais e de mão-de-obra.

A simulação numérica da propagação de fendas realizada com as misturas com betume-borracha e a mistura convencional, considerando o efeito do tráfego e das variações de temperatura representativas da região de Florianópolis, Santa Catarina, permitiu concluir que com uma mistura otimizada com betume-borracha pode obter-se uma vida do reforço do pavimento até 29,9 vezes superior a uma mistura convencional.

A resistência à propagação de fendas foi igualmente obtida recorrendo ao ensaio RCD (*Reflective Cracking Device*) sendo que os resultados obtidos permitiram concluir que uma mistura com betume-borracha apresenta uma vida à propagação de fendas pelo menos 5 vezes superior à obtida por uma mistura convencional.

### 9.3. PROPOSTAS PARA INVESTIGAÇÕES FUTURAS

Apesar da investigação realizada ter alcançado os objectivos propostos, durante a condução dos trabalhos foram levantadas algumas alternativas e permaneceram algumas questões inerentes a qualquer trabalho de investigação.

Para complemento desta investigação e para o melhor conhecimento do comportamento do betume-borracha e das misturas betuminosas com betume-borracha, sugere-se que no seguimento deste trabalho se realizem as seguintes acções:

- investigar e desenvolver procedimentos de dosagem mais adequados para as misturas betuminosas produzidas com betume-borracha;
- estudar o desempenho de betume-borracha *terminal blend* com betume base mais rígido do que o CAP 50/70;
- desenvolvimento do factor laboratório-campo de modo a utilizar os resultados laboratoriais obtidos no dimensionamento de pavimentos e seus reforços;
- realização de trechos experimentais de modo a controlar o desempenho mecânico obtido em laboratório.