

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

GIAN CARLO SCHMITZ MARCACCINI

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE LABORATÓRIO PARA EMPREGO DA
ESCÓRIA DE ACIARIA COMO AGREGADO
EM CAMADAS DE BASE DE PAVIMENTO FLEXÍVEL**

FLORIANÓPOLIS

2009

GIAN CARLO SCHMITZ MARCACCINI

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE LABORATÓRIO PARA EMPREGO DA
ESCÓRIA DE ACIARIA COMO AGREGADO
EM CAMADAS DE BASE DE PAVIMENTO FLEXÍVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina ECV 5513, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

FLORIANÓPOLIS

2009

GIAN CARLO SCHMITZ MARCACCINI

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE LABORATÓRIO PARA EMPREGO DA
ESCÓRIA DE ACIARIA COMO AGREGADO
EM CAMADAS DE BASE DE PAVIMENTO FLEXÍVEL**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado e aprovado em sua forma final pela Coordenadoria do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, em ____ / ____ / 2009.

Profª. Lia Caetano Bastos, Dra., UFSC, 1994
Coordenadora de Trabalhos de Conclusão de Curso

Apresentada à Banca Examinadora integrada pelos professores:

Glicério Trichês, Dr., ITA/CTA, 1993
Orientador

Antônio Fortunato Marcon, Dr., ITA/CTA, 1996
Membro da Banca

Marciano Maccarini, PhD., Imperial College, Londres, Inglaterra, 1987
Membro da Banca

AGRADECIMENTOS

À minha família, pela compreensão dos meus momentos de ausência durante a jornada acadêmica e a realização deste trabalho. Em especial à minha mãe Amélia, que sempre me incentivou em todas as minhas decisões e fases da minha vida.

À Poliana e família, pelos incentivos e apoio que sempre me deram. Ressaltando o “Seu Alziro”, que desde o início desta formação, sempre se orgulhava em falar: “Meu engenheiro”.

Aos colegas de trabalho e a empresa ÚNICA Consultores de Engenharia Urbana, que jamais deixaram de me incentivar. E pela contribuição com o material para execução deste trabalho acadêmico.

Ao orientador Glicério Trichês, pela dedicação, sugestões, e críticas, tanto para este trabalho, quanto para as disciplinas ministradas por ele.

Aos professores e professoras da UFSC pelos ensinamentos e dedicação ao curso de Engenharia Civil.

Ao pessoal do Laboratório de Mecânica dos Solos, pela ajuda permanente que me deram durante a execução de todos os ensaios.

Aos alunos e colegas da UFSC pelos bons momentos convividos.

A Fapesc, Petrobrás e CNPq pela utilização dos equipamentos que permitiram a realização de ensaios de Módulo Resiliente, os quais foram fundamentais no desenvolvimento do trabalho.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Dedico este trabalho à minha família, ao meu pai, Rubens, pelo amor e incentivo, e à minha mãe, Amélia, que sempre caminhou ao meu lado, algumas vezes solitários, mas sempre com amor e forças para vencer.

À Poliana, que nestes cinco anos sempre apoiou e participou da minha vida, compartilhando amor, amizade e alegria.

RESUMO

MARCACCINI, G. C. S. **Estudo experimental para emprego da escória de aciaria como agregado em camadas de base de pavimento flexível**, 2009. 175 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

Este Trabalho de Conclusão de Curso apresenta resultados alcançados após estudo sobre o emprego da escória de aciaria LD como agregado em camadas de base em pavimentos flexíveis. Este resíduo provém da indústria siderúrgica, mais especificamente, no processo de fabricação do aço que utiliza o conversor a oxigênio tipo LD. Os ensaios realizados para determinar as características mecânicas do material em estudo foram: compactação, índice de suporte Califórnia, expansibilidade e módulo de resiliência. A siderúrgica que cedeu a escória menciona que a mesma tem a granulometria compatível com a faixa C do DNIT, que se confirmou nos ensaios. Portanto, não houve a necessidade de correção da granulometria. Como o custo da escória é inferior ao dos materiais granulares tradicionais empregados em camadas de base, constatou-se pelos ensaios de CBR que seu suporte é semelhante ao destes, resultando assim, em pavimentos mais econômicos. Também foi possível constatar através de ensaios de módulo resiliente (MR), que a adição de apenas 20% de solo à escória, gera um aumento de 2,33 vezes no valor do MR, atingindo valores médios de 7000 kgf/cm², portanto, resultando em revestimentos menos espessos e mais econômicos, se comparado com camadas de brita graduada. Quanto às características mecânicas, os resultados do estudo permitiram concluir que a escória de aciaria LD estabilizada com solo pode ser empregada como material em camadas de base em pavimentos flexíveis, reduzindo a espessura de revestimento e agregando valor econômico a este subproduto.

Palavras-chave: Escória de aciaria. Material de Base. Pavimentação.

ABSTRACT

MARCACCINI, G. C. S. **Experimental work to employ the steel furnace slag as aggregated in the base layers to flexible pavement**, 2009. 175p. Course assignment (Civil Engineering Degree) Civil Engineering Course. UFSC. Florianópolis, 2009.

This course assignment exposes the results reached after studying about the LD steel furnace slag as aggregated in the base layers in flexible pavements. This residue came from the steel manufacture, specifically in the steel manufacturing process that uses a LD oxygen converter type. The essays done to determine the mechanical characteristics of the studied material were: compact capability, California support index, expander and resilient module. The steel manufacture that conceded the slag informs that its granulometry is compatible to the DNIT C band, it was attested in the essays. Therefore, there was no need to correct the granulometry. As the slag cost is lower than the other traditional granular materials employed in the base layers, it was attested for the CBR essays that the slag support is similar to the other materials, this way, it results more economic pavements. It was possible to verify as well through the resilient module (MR), that the addition of only 20% of ground to the slag increased in 2,33 times the MR value, it reached an average value of 7000 kgf/cm², therefore, it results a thinner and more economic surface paving, if compared to the graded limestone layers. According to the mechanical characteristics, the study results enabled us to conclude that the LD steel furnace slag stabilized with ground can be used as material in base layers in flexible pavement, decreasing the paving surface thickness and adding economic value to this product.

Keywords: Steel furnace slag. Base material. Pavement.

LISTA DE FIGURAS

Figura	1.1	Esquema do processo de produção do aço em conversor a oxigênio.....	15
Figura	1.2	Fluxo do processo para obtenção da escória de aciaria.....	16
Figura	2.1	Fatores de equivalência de operação.....	28
Figura	2.2	Determinação de espessura do pavimento.....	35
Figura	2.3	Dimensionamento do pavimento.....	35
Figura	2.4	Classificação resiliente de solos granulares.....	38
Figura	2.5	Classificação resiliente de solos finos.....	40
Figura	3.1	Mapa de Situação – ArcelorMittal Tubarão.....	48
Figura	3.2	Mapa Geológico de Santa Catarina.....	49
Figura	3.3	Mapa de Situação do solo.....	49
Figura	3.4	Classificação resiliente de solos granulares.....	94
Figura	4.1	Seção transversal 01 – Para $N=5,00 \times 10^6$	103
Figura	4.2	Seção transversal 02 – Para $N=5,00 \times 10^7$	104
Figura	4.3	Dados para tráfego médio – Escória.....	106
Figura	4.4	Dados para tráfego médio – Escória/Solo.....	107
Figura	4.5	Dados para carregamento.....	107
Figura	4.6	Dados dos pontos de análise.....	108
Figura	4.7	Deflexão da superfície – Escória.....	108
Figura	4.8	Deformação de tração no revestimento – Escória.....	109
Figura	4.9	Tensão no Subleito – Escória.....	109
Figura	4.10	Deflexão da superfície – Escória/Solo.....	110
Figura	4.11	Deformação de tração no revestimento – Escória/Solo.....	110
Figura	4.12	Tensão no Subleito – Escória/Solo.....	111
Figura	4.13	Tabela Referencial - DER-ES.....	126
Figura	4.14	Seção Genérica.....	127
Figura	4.15	Tabela Referencial – DER-PR.....	128

LISTA DE TABELAS

Tabela	2.1	Gradação das peneiras.....	20
Tabela	2.2	Características das espécies químicas isoladas antes e após hidratação.....	21
Tabela	2.3	Granulometria para base granular.....	26
Tabela	2.4	Determinação do fator de operações.....	29
Tabela	2.5	Coeficiente de equivalência estrutural.....	31
Tabela	2.6	Espessura mínima de revestimento betuminoso.....	32
Tabela	2.7	Classificação dos solos finos (Método indireto).....	41
Tabela	3.1	Quantidades de amostras por ensaio.....	47
Tabela	3.2	Faixa “C” – DNIT.....	47
Tabela	3.3	Determinação da densidade real dos grãos do solo.....	51
Tabela	3.4	Análise granulométrica do solo.....	52
Tabela	3.5	Análise granulométrica da Escória de Aciaria.....	66
Tabela	3.6	Composição granulométrica para mistura Escória/Solo.....	73
Tabela	3.7	Composição granulométrica para mistura Brita Graduada/Solo.....	83
Tabela	3.8	Leituras do Ensaio Triaxial – Escória de Aciaria e Solo.....	92
Tabela	3.9	Leituras do Ensaio Triaxial – Escória de Aciaria.....	97
Tabela	4.1	Fator de veículo para USACE.....	99
Tabela	4.2	Fator de veículo para AASHTO.....	99
Tabela	4.3	Cálculo do número $N_{8,2}$ – Volume de tráfego médio.....	100
Tabela	4.4	Cálculo do número $N_{8,2}$ – Volume de tráfego pesado.....	101
Tabela	4.5	Dados para nível de tráfego médio.....	106
Tabela	4.6	Dados Elsym5 para diferentes espessuras de base com tráfego médio e revestimento de 5 cm.....	112
Tabela	4.7	N_{adm} para diferentes espessuras de base e revestimento de 5 cm (Base de Escória).....	112
Tabela	4.8	N_{adm} para diferentes espessuras de base e revestimento de 5 cm (Base de Escória/Solo).....	113
Tabela	4.9	Dados para nível de tráfego pesado.....	114
Tabela	4.10	Dados Elsym5 para diferentes espessuras de base.....	114
Tabela	4.11	N_{adm} para diferentes espessuras de base e revestimento de 10 cm (Base de Escória).....	115

Tabela	4.12	N_{adm} para diferentes espessuras de base e revestimento de 10 cm (Base de Escória/Solo).....	116
Tabela	4.13	Dados Elsym5 para diferentes espessuras de revestimento e base com 17,5 cm.....	117
Tabela	4.14	N_{adm} para diferentes espessuras de revestimento e base de 17,5 cm (Base de Escória).....	118
Tabela	4.15	N_{adm} para diferentes espessuras de revestimento e base de 17,5 cm (Base de Escória/Solo).....	119
Tabela	4.16	Dados Elsym5 para diferentes espessuras de revestimento e base com 15,0 cm.....	120
Tabela	4.17	N_{adm} para diferentes espessuras de revestimento e base de 15,0 cm (Base de Escória).....	120
Tabela	4.18	N_{adm} para diferentes espessuras de revestimento e base de 15,0 cm (Base de Escória/Solo).....	121
Tabela	4.19	Dados Elsym5 para diferentes estruturas – Tráfego médio.....	123
Tabela	4.20	N_{adm} para diferentes previsões (Escória) – Tráfego médio.....	123
Tabela	4.21	N_{adm} para diferentes previsões (Escória/Solo) – Tráfego médio.....	123
Tabela	4.22	Dados Elsym5 para diferentes estruturas – Tráfego pesado.....	124
Tabela	4.23	N_{adm} para diferentes previsões (Escória) – Tráfego pesado.....	124
Tabela	4.24	N_{adm} para diferentes previsões (Escória/Solo) – Tráfego pesado.....	125
Tabela	4.25	Resumo das estruturas dimensionadas pela Análise Mecanicista.....	125
Tabela	4.26	Consumo por km de projeto.....	126
Tabela	4.27	Comparação de custos iniciais.....	126
Tabela	4.28	Preço para as diferentes estruturas otimizadas.....	129

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico	3.1	Ajuste granulométrico da mistura.....	47
Gráfico	3.2	Representação gráfica da granulometria do solo.....	53
Gráfico	3.3	Curva de compactação do solo.....	56
Gráfico	3.4	Curva de expansão (CP-01 – solo no ramo seco).....	58
Gráfico	3.5	Curva de expansão (CP-02 – solo no ramo seco).....	59
Gráfico	3.6	Curva de expansão (CP-03 – solo nas condições de umidade ótima).....	59
Gráfico	3.7	Curva de expansão (CP-04 – solo no ramo úmido).....	60
Gráfico	3.8	Curva de expansão (CP-05 – solo acima da umidade ótima).....	60
Gráfico	3.9	Ensaio de CBR (CP-01 – solo).....	61
Gráfico	3.10	Ensaio de CBR (CP-02 – solo).....	62
Gráfico	3.11	Ensaio de CBR (CP-03 – solo nas condições de umidade ótima).....	62
Gráfico	3.12	Ensaio de CBR (CP-04 – solo).....	63
Gráfico	3.13	Ensaio de CBR (CP-05 – solo).....	63
Gráfico	3.14	Curva CBR x h para o solo.....	64
Gráfico	3.15	Curva de compactação da Escória de Aciaria.....	68
Gráfico	3.16	Ensaio de CBR (CP-01 – Escória de Aciaria).....	69
Gráfico	3.17	Ensaio de CBR (CP-02 – Escória de Aciaria).....	70
Gráfico	3.18	Ensaio de CBR (CP-03 – Escória de Aciaria nas condições de umidade ótima).....	70
Gráfico	3.19	Ensaio de CBR (CP-04 – Escória de Aciaria).....	71
Gráfico	3.20	Ensaio de CBR (CP-05 – Escória de Aciaria).....	71
Gráfico	3.21	Curva CBR x h para a Escória de Aciaria.....	72
Gráfico	3.22	Curva de compactação da mistura Escória/Solo.....	77
Gráfico	3.23	Ensaio de CBR (CP-01 – Escória/Solo).....	78
Gráfico	3.24	Ensaio de CBR (CP-02 – Escória/Solo).....	79
Gráfico	3.25	Ensaio de CBR (CP-03 – Escória/Solo nas condições de umidade ótima).....	79
Gráfico	3.26	Ensaio de CBR (CP-04 – Escória/Solo).....	80
Gráfico	3.27	Ensaio de CBR (CP-05 – Escória/Solo).....	80
Gráfico	3.28	Curva CBR x h para a mistura Escória/Solo.....	81
Gráfico	3.29	Curva de compactação da mistura Brita graduada/Solo.....	84

Gráfico	3.30	Ensaio de CBR (CP-01 – Brita graduada/Solo).....	85
Gráfico	3.31	Ensaio de CBR (CP-02 – Brita graduada/Solo).....	86
Gráfico	3.32	Ensaio de CBR (CP-03 – Brita graduada/Solo nas condições de umidade ótima).....	86
Gráfico	3.33	Ensaio de CBR (CP-04 – Brita graduada/Solo).....	87
Gráfico	3.34	Ensaio de CBR (CP-05 – Brita graduada/Solo).....	87
Gráfico	3.35	Curva CBR x H para a mistura Brita graduada/Solo.....	88
Gráfico	3.36	Corpo de prova 01 da mistura.....	92
Gráfico	3.37	Corpo de prova 02 da mistura.....	93
Gráfico	3.38	Corpo de prova 01 da Escória.....	98
Gráfico	3.39	Corpo de prova 02 da Escória.....	98
Gráfico	4.1	Previsão de solicitações para base de escória com revestimento de 5 cm – Tráfego Médio.....	112
Gráfico	4.2	Previsão de solicitações para base de escória/solo com revestimento de 5 cm – Tráfego Médio.....	113
Gráfico	4.3	Previsão de solicitações para base de escória com revestimento de 10 cm – Tráfego Pesado.....	115
Gráfico	4.4	Previsão de solicitações para base de escória/solo com revestimento de 10 cm – Tráfego Pesado.....	116
Gráfico	4.5	Previsão de solicitações para base de escória de 17,5 cm e com variação de revestimento – Tráfego Médio.....	118
Gráfico	4.6	Previsão de solicitações para base de escória/solo de 17,5 cm e com variação de revestimento – Tráfego Médio.....	119
Gráfico	4.7	Previsão de solicitações para base de escória de 15,0 cm e com variação de revestimento – Tráfego Pesado.....	121
Gráfico	4.8	Previsão de solicitações para base de escória/solo de 15,0 cm e com variação de revestimento – Tráfego Pesado.....	122

LISTA DE FOTOS

Foto 3.1	Ensaio de expansão.....	57
Foto 3.2	Extensômetro.....	57
Foto 3.3	Peneiramento manual.....	67
Foto 3.4	Peneiramento mecanizado.....	67
Foto 3.5	Escória de aciaria peneirada.....	67
Foto 3.6	Homogenização da mistura Escória/Solo.....	74
Foto 3.7	Mistura homogenizada.....	74
Foto 3.8	Compactação do corpo de prova (01).....	75
Foto 3.9	Compactação do corpo de prova (02).....	75
Foto 3.10	Corpos de prova após ensaios.....	82
Foto 3.11	Corpo de prova – Mistura Escória de Aciaria e Solo.....	82
Foto 3.12	Homogenização da mistura nas condições de hót.....	90
Foto 3.13	Adição da mistura no molde.....	90
Foto 3.14	Compactação do corpo de prova.....	91
Foto 3.15	Verificação da altura das camadas para se adequar o número de golpes necessários para reproduzir a MEAS máxima.....	91
Foto 3.16	Corpo de prova com membrana.....	94
Foto 3.17	Célula triaxial preparada.....	95
Foto 3.18	Ensaio em execução.....	95
Foto 3.19	Tela do Programa do Ensaio Dinâmico Triaxial.....	96

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS.....	8
LISTA DE GRÁFICOS	160
LISTA DE FOTOS	12
1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos do Trabalho.....	17
1.2 Estrutura do Trabalho	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Agregados para Pavimentação	18
2.2 Escória de Aciaria	21
2.3 Ensaio Laboratoriais.....	23
2.4 Metodologias para Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis.....	24
2.4.1 Método do DNER/81	24
2.4.2 Consideração da resiliência na pavimentação	36
2.4.3 Análise mecanicista	41
3. AVALIAÇÃO DOS MATERIAIS DO ESTUDO	46
3.1 Planejamento Do Experimento.....	46
3.2 Materiais Utilizados na Pesquisa.....	48
3.2.1 Escória de aciaria	48
3.2.2 Brita - Graduada	48
3.2.3 Solo para mistura	49
3.3 Ensaio Laboratoriais Para Determinação de CBR	50
3.3.1 Solo para mistura	50
3.3.2 Escória de aciaria - acerita®	65
3.3.3 Mistura escória de aciaria – solo.....	73
3.3.4 Mistura brita graduada/solo	83

3.4	Ensaio Triaxiais Dinâmicos.....	89
3.4.1	Módulo resiliente para a mistura escória de aciaria – solo	89
3.4.2	Módulo resiliente para escória de aciaria	96
4.	DIMENSIONAMENTO PARA PAVIMENTAÇÃO.....	99
4.1	Estudo de Tráfego	99
4.2	Método do DNER/81.....	102
4.2.1	Solicitação de tráfego com $N_{8,2t} = 5,00 \times 10^6$	102
4.2.2	Solicitação de tráfego com $N_{8,2t} = 5,00 \times 10^7$	103
4.3	Análise Mecanicista	105
4.3.1	Análise da estrutura para o nível de tráfego médio – $N = 5,00 \times 10^6$	105
4.3.2	Análise da estrutura para o nível de tráfego pesado – $N = 5,00 \times 10^7$	114
4.3.3	Variação da espessura do revestimento	117
4.3.4	Análise para estruturas menos espessas.....	122
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	130
6.	REFERÊNCIAS	132
	ANEXO A	136
	ANEXO B	151
	ANEXO C	159
	ANEXO D	168
	ANEXO E	172

1. INTRODUÇÃO

Quando se fala de materiais recicláveis, o aço figura entre os mais lembrados, podendo ser obtido da demolição de construções (armaduras) e até mesmo dos eletrodomésticos que utilizamos. No final de sua vida útil, muitos pensam em descartá-los nos popularmente denominados lixões (Aterro sanitário), porém, o setor siderúrgico vem estimulando e coletando estes para empregá-los na fabricação de novos produtos, sem perda da sua qualidade.

Sendo assim, reduz-se o consumo de matérias-primas não renováveis, evita a necessidade da ocupação de áreas para o descarte de produtos em obsolescência, e economiza energia.

Mesmo havendo esta consciência ecológica com o reuso dos aços sem serventia; na sua reciclagem e até mesmo na produção a partir da matéria-prima, há impurezas (designadas escórias) que são separadas do aço líquido por densidade, conforme mostrado na **Figura 1.1**, na produção com conversor a oxigênio tipo LD.

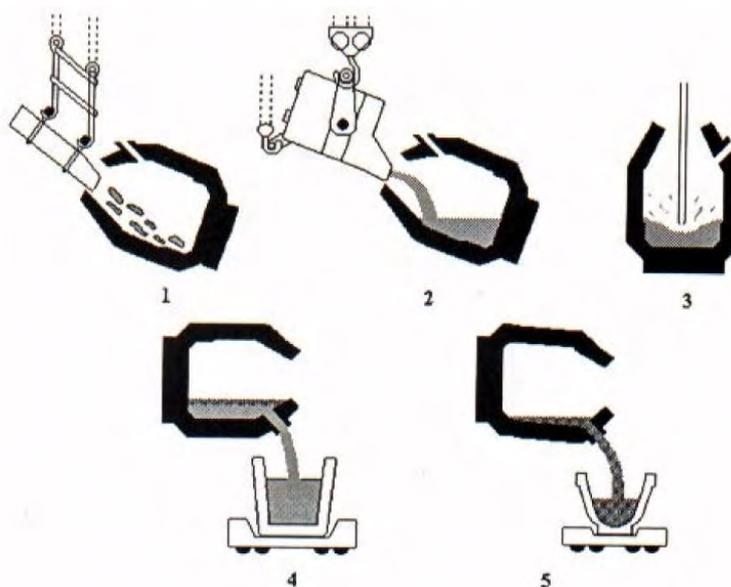


Figura 1.1 - Esquema do processo de produção do aço em conversor a oxigênio tipo LD ou BOF

Nota: (1) carregamento da sucata, (2) carregamento do gusa, (3) sopros de oxigênio, (4) vazamento do aço e (5) vazamento da escória (ARAUJO , 1997)

Após separação no conversor, a escória segue o fluxo do processo para obtenção do agregado siderúrgico segundo a **Figura 1.2**. Ao término destes procedimentos, o material pode ser utilizado como agregado em concreto asfáltico, base e sub-base de rodovias, fertilizante, estabilização de solos, matéria-prima na produção de cimento, diques marítimos e gabiões.



Figura 1.2 - Fluxo do processo para obtenção da escória de aciaria

Fonte: MultiServ - Harsco

Segundo dados do IBS (Instituto Brasileiro de Siderurgia) de 2008, a produção de aço no Brasil foi de 33,7 milhões de toneladas. Conforme informações levantadas pela empresa ArcelorMittal Tubarão, a quantidade de escória para a produção de uma tonelada de aço líquido é de 86,2 kg, portanto, 8,62% da produção, resultando em 2,90 Mton. de agregado siderúrgico no Brasil em 2008. Se não houvesse o beneficiamento deste material, o mesmo provavelmente seria despejado em locais inadequados. Porém, como há estas reutilizações, este subproduto tem valor comercial.

1.1 Objetivos do Trabalho

O presente trabalho desenvolverá um estudo comparativo entre uma composição com aplicação costumeira de camadas de pavimentação, e outra com a utilização de escória de aciaria, buscando avaliar a viabilidade desta segunda em camadas subjacentes ao revestimento.

O estudo comparativo será realizado com base no Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR), no Módulo Resiliente (MR), no custo dos agregados, e o impacto dos resultados no dimensionamento de uma suposta rodovia a ser pavimentada.

Através deste estudo, espera-se verificar qual das composições abordadas, apresenta para um mesmo período de projeto, maior vantagem econômica.

Mesmo tendo ciência da importância de conhecer o caráter ambiental da ACERITA[®], e suas reações químicas com o meio, este trabalho não trará esta análise, uma vez que o objetivo do mesmo é analisar o caráter mecânico deste subproduto.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é constituído por 05 (cinco) capítulos, tendo este primeiro, uma breve apresentação do tema estudado, elucidando a visão sustentável do assunto e quais objetivos desejam-se alcançar com tais comparações.

O segundo capítulo traz uma revisão dos conceitos a serem abordados ao longo do trabalho, que se fazem necessários para boa compreensão do mesmo.

Já o terceiro capítulo, é apresentado os trabalhos experimentais desenvolvidos e seus estudos necessários para representá-los.

No quarto, serão expostos os dimensionamentos com os resultados alcançados no capítulo anterior. Para então, obter comparativos para a análise final do próximo capítulo.

Por fim, o quinto capítulo destina-se à conclusão, juntamente com a análise final do estudo realizado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Será apresentado neste capítulo o embasamento teórico referente aos assuntos abordados neste trabalho, tais como: agregados para pavimentação, escória de aciaria, ensaios laboratoriais para agregados, metodologias de dimensionamento de pavimentos flexíveis, entre outros.

2.1 Agregados para Pavimentação

Bernucci et al (2008) define agregado como sendo uma mistura de pedregulho, areia, pedra britada, escória ou outros materiais minerais usados em combinação com um ligante para formar um concreto, uma argamassa, etc.

Conforme o Manual de pavimentação do DNIT (2006), os materiais pétreos usados em pavimentação normalmente conhecidos sob a denominação genérica de agregados, podem ser naturais ou artificiais. Os primeiros são aqueles utilizados como se encontram na natureza, como o pedregulho e os seixos rolados, ao passo que os segundos compreendem os que necessitam de uma transformação física e química do material natural para sua utilização, como a escória e a argila expandida.

Quando um agregado é selecionado para uma determinada utilização, este deve conter propriedades que suportem as tensões impostas na superfície do pavimento e também no seu interior. A maneira de como são produzidas, mantidas unidas e condições sob as quais vão atuar, é o que depende para observar o desempenho das partículas de agregados. A escolha é feita em laboratório onde uma série de ensaios é utilizada para o prognóstico do seu comportamento posterior quando em serviço.

Para Bernucci et al (2008), os agregados são classificados quanto a natureza em:

- **Natural** - Inclui todas as fontes de ocorrência natural e são obtidos por processos convencionais de desmonte, escavação e dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios. São exemplos os pedregulhos, as britas, os seixos, as areias, etc. Ou seja, os agregados naturais podem ser empregados em pavimentação na forma e tamanho como se encontram na natureza, ou podem ainda passar por processamento como a britagem;

- **Artificial** – São resíduos de processos industriais, tais como a escória de alto-forno e de aciaria, ou fabricados especificamente com o objetivo de alto desempenho, como a argila calcinada (Cabral, 2005) e a argila expandida. O tipo de agregado artificial atualmente mais utilizado em pavimentação são os vários tipos de escória, subprodutos da indústria do aço. Elas podem apresentar problemas de expansividade e heterogeneidade, requerendo tratamento adequado para utilização, porém podem apresentar alta resistência ao atrito.

- **Reciclado** – Nesta categoria estão os provenientes de reuso de materiais diversos. A reciclagem de revestimentos asfálticos existentes vem crescendo significativamente em importância e em alguns países já é a fonte principal de agregados. A possibilidade de utilização de agregados reciclados vem crescendo em interesse por restrições ambientais na exploração de agregados naturais e pelo desenvolvimento de técnicas de reciclagem que possibilitam a produção de materiais reciclados dentro de determinadas especificações existentes para utilização. Destaca-se também a utilização crescente de resíduo de construção civil em locais com ausência de agregados pétreos ou mesmo em áreas urbanas que possuam pedreiras, como forma de reduzir os problemas ambientais de disposição destes resíduos (Fernandes, 2004).

Dando sequência ao citado em Bernucci et al. (2008), os agregados são classificados quanto ao tamanho, para uso em misturas asfálticas, em graúdo, miúdo e material de enchimento ou fíler (DNIT 031/2004 – ES), sendo:

- **Graúdo** – É o material com dimensões maiores do que 2,0mm, ou seja, retido na peneira nº 10. São as britas, cascalhos, seixos etc.;

- **Miúdo** – É o material com dimensões maiores que 0,075mm e menores que 2,0mm. É o material que é retido na peneira de nº 200, mas que passa na de abertura nº 10. São as areias, o pó de pedra e etc.;

- **Material de enchimento (fíler)** – É o material onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075mm, correspondente à peneira de nº 200, e.g., cal hidratada, cimento Portland etc.

Continuando com a classificação dos agregados, para o DNIT (Manual de pavimentação – 2006) a mesma se dá também quanto à distribuição e graduação dos grãos em:

- **Agregado de graduação densa** – É aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínuo, com quantidade de material fino, suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores.
- **Agregado de graduação aberta** – É aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínuo, com insuficiência de material fino, para preencher os vazios entre as partículas maiores.
- **Agregado tipo macadame** – É aquele que possui partículas de um único tamanho, o chamado “one size aggregate”. Trata-se, portanto, de um agregado de granulometria uniforme onde o diâmetro máximo é, aproximadamente, o dobro do diâmetro mínimo.

O diâmetro máximo de um agregado é a abertura da malha da menor peneira na qual passam, no mínimo, 95% do material. O diâmetro mínimo é a abertura da malha da maior peneira na qual passam, no máximo, 5% do material. As peneiras usualmente utilizadas são as apresentadas na **Tabela 2.1**.

Tabela 2.1 - Gradação das peneiras

Abertura da peneira		
Número	Milímetros	Polegadas
	75	3
	50	2
	37,5	1,5
	25	1
	19	0,75
	9,5	0,375
4	4,75	0,187
8	2,36	0,0937
10	2	0,0789
16	1,18	0,0469
30	0,6	0,0234
40	0,425	0,0168
50	0,3	0,0117
100	0,15	0,0059
200	0,075	0,0029

2.2 Escória de Aciaria

O subproduto da transformação do ferro gusa líquido em aço, é a denominada Escória de Aciaria LD. A sigla LD, incorporada ao nome do resíduo utilizado neste estudo, refere-se à produção do aço ser no conversor de oxigênio do tipo LD (Linz-Donawitz).

A constituição do subproduto citado acima é uma mistura de magnésio, óxidos de cálcio, silicatos de cálcio, ferro metálico, e outras espécies químicas, só que estas em menor escala.

A escória de aciaria LD, possui características expansivas devido principalmente, à hidratação da cal livre (CaO) e do periclásio (MgO), além da mudança nas formas alotrópicas do C₂S e da corrosão e oxidação do ferro metálico residual. Na **Tabela 2.2**, são apresentadas as variações volumétricas em função das transformações ocorridas nas principais espécies químicas presentes na escória de aciaria.

Tabela 2.2 - Características das espécies químicas isoladas antes e após hidratação (WEAST, 1971)

Nº	Fórmula	Nome	Densidade (g/cm ³)	M. mol (g/mol)	Vol. Molar (cm ³ /mol)	Variação de volume (%)*
1	MgO	Periclásio	3,58	40,31	11,26	Em relação ao MgO
2	Mg(OH) ₂	Brucita	2,36	58,33	24,72	119,5
3	CaO	Cal	3,38	56,08	16,59	Em relação ao CaO
4	Ca(OH) ₂	Portlandita	2,24	74,09	33,08	99,4
5	CaCO ₃	Calcita	2,93	100,09	34,16	105,9
		Aragonita	2,71	100,09	36,93	122,6
6	CaCO ₃ MgCO ₃	Dolomita	2,87	184,41	64,25	287,3
7	Fe ^o	Ferro (Metálico)	7,86	55,85	7,11	Em relação ao Fe ^o
8	FeO	Wüstita	5,70	71,85	12,61	77,4
9	Fe ₂ O ₃	Hematita	5,24	159,69	30,48	328,7
10	Fe(OH) ₂	Hidróxido	3,40	89,86	26,43	271,7
11	FeO(OH)	Goetita	4,28	88,85	20,76	192,0

*Valores calculados a partir do volume e da densidade absoluta das espécies químicas isoladas

Observa-se na **Tabela 2.2**, que nas transformações, seja por hidratação (2, 4, 10 e 11) e carbonatação (5), ou por oxidação (8 e 9), ocorre um significativo aumento de volume em relação às dimensões originais do cristal. Este fenômeno conduz à expansão destrutiva na

escória de aciaria. Vale lembrar que estas reações ocorrem em grandes quantidades no início, e com o tempo vão diminuindo, até compor certa estabilidade.

Porém, segundo a empresa ArcelorMittal Tubarão, que buscou parceria com a KAEME Consultoria, a escória de aciaria LD pode sofrer mecanismos que propiciam maior rapidez na sua estabilização, de modo que os óxidos livres sejam em parte inertizados, reduzindo assim, a capacidade da escória expandir. O resultado deste estudo foi o desenvolvimento da ACERITA[®], co-produto que será utilizado na atual pesquisa.

Esse processo consiste em "estimular" a reação dos óxidos livres a partir de reação dos mesmos com o ar e a água, através de um processo de umidificação e aeração da escória durante certo período de tempo. Estes processos ocorrem com a passagem de máquinas revolvendo o material, ao passo que na maioria das vezes, ocorre simultaneamente aspersão de água sobre o mesmo.

Com relação às aplicações da escória de aciaria, a mesma pode ser usada como agregado para concreto asfáltico, base e sub-base de estradas, estabilização de solos, fertilização ou matéria prima para produção de cimento.

Um critério para utilização da escória de aciaria em pavimentação e como sub-base de pavimentos é a estabilidade volumétrica "in situ". Nesse sentido, as normas rodoviárias DNER – PRO 263/94 e EM 262/94 (**ANEXO D e E**, respectivamente), prescrevem que a expansão do agregado de escória de aciaria não deve ser superior a 3 % - conforme o Método PTM 130 (Pennsylvania Testing Method, USA). Para a norma rodoviária EB - 2103 (ABNT, 1991), tomada como referência para a norma do DNIT¹, porém, com ensaios diferenciados da anterior, especifica que para utilizar em sub-base de pavimentos, o agregado não deve apresentar expansão superior a 1 %, e para o uso em base de pavimentos, este valor deve ser inferior a 0,5 %.

Com relação ao agregado produzido com escória de aciaria, este consiste de partículas ásperas, angulares e duráveis, o que o torna apropriado para aplicação em pavimentação, além de apresentar melhores características de superfície em relação ao agregado de pedra calcária,

¹ DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes

normalmente utilizado. A escória apresenta maior resistência à derrapagem, maior resistência ao impacto e ao desgaste superficial (FERRAND e EMERY, 1995; MURPHY et al., 1997; KHAN e WAHHAB, 1998). Além disso, segundo NOUMAN et al. (1992), as escórias de aciaria possuem as vantagens de poderem ser 100% trituradas na gradação requerida e, geralmente, permitem melhor trabalhabilidade e compacidade, favorecendo assim a durabilidade do pavimento.

Em contrapartida, o uso de agregados de escória pode levar a problemas de segregação e à decapagem do pavimento, devido à baixa afinidade com o betume e a areia. Além disso, a textura superficial áspera das partículas dos agregados de escória resulta num material bastante absorvente e poroso, aumentando o consumo de cimento asfáltico na mistura e elevando o custo final do concreto asfáltico (KHAN e WAHHAB, 1998; FERRAND e EMERY, 1995).

2.3 Ensaios Laboratoriais

Para obter os dados necessários a este trabalho sobre os materiais destinados a composição da base dos pavimentos, é preciso executar alguns ensaios laboratoriais a respeito do mesmo. Depois de feito os ensaios, o mesmo deve apresentar características segundo a DNER-ES303 (1997), como tais:

Quando submetidos aos ensaios:

- DNER-ME 129 (Método B ou C);
- DNER-ME 049.

- o Índice de Suporte Califórnia, deverá ser superior a 60% e a expansão será de 0,5%, com energia de compactação do Método B. Para rodovias em que o tráfego previsto para o período do projeto ultrapassar o valor de $N = 5,00 \times 10^6$, o Índice Suporte Califórnia do material da camada de base deverá ser superior a 80%; neste caso, a energia de compactação será a do Método C.

- o agregado retido na peneira nº 10 deverá ser constituído de partículas duras e resistentes, isentas de fragmentos moles, alongados ou achatados, estes isentos de matéria vegetal ou

outra substância prejudicial. Quando submetidos ao ensaio de Los Angeles (DNER-ME 035), não deverão apresentar desgastes superiores a 55% admitindo-se valores maiores no caso de em utilização anterior terem apresentado desempenho satisfatório.

Para a DNER-ME 129/94, que se refere ao método de ensaio para compactação de solos utilizando amostras não trabalhadas, uma das características principais no que diz respeito à aparelhagem, é a dimensão do cilindro metálico, que é 15,24 cm \pm 0,05 cm de diâmetro interno.

Segundo o item 6.3 do Método de Ensaio citado no parágrafo anterior, para o Método C – Modificada, o número de golpes a ser realizado para as cinco camadas do corpo-de-prova, deverá ser de 55 para cada camada.

Nos **ANEXOS A, B e C**, respectivamente, DNER-ME 049/94, DNER-ME 129/94 e DNER-ME 131/94, serão expostos os ensaios padronizados para a determinação dos parâmetros que utilizarei no projeto.

2.4 Metodologias para Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis

Os métodos que serão dispostos neste item constituirão a fundamentação para o dimensionamento do pavimento deste trabalho. Estes se dividem em: o método que contempla a resiliência como fator determinante; e o outro, que tem como base para o dimensionamento, o nível de suporte do material. Este segundo, foi retirado na sua totalidade, do Manual de Pavimentação do DNIT (2006).

2.4.1 Método do DNER/81

O método tem como base o trabalho “Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume” de 1962, da autoria de W.J. Turnbull, C.R. Foster e R.G. Ahlvin, do Corpo de Engenheiros do Exército dos E.E.U.U. e conclusões obtidas na Pista Experimental da AASHTO.

Relativamente aos materiais integrantes do pavimento, são adotados coeficientes de equivalência estrutural tomando por base os resultados obtidos na Pista Experimental da AASHTO, com modificações julgadas oportunas.

A capacidade de Suporte do subleito e dos materiais constituintes dos pavimentos é feita pelo CBR, adotando-se o método de ensaio preconizado pelo DNER, em corpos de prova indeformados ou moldados em laboratórios para as condições de massa específica aparente e umidade especificada para o serviço.

O subleito e as diferentes camadas do pavimento devem ser compactados de acordo com os valores fixados nas “Especificações Gerais”, recomendando-se que, em nenhum caso, o grau de compactação deve ser inferior a 100%.

Os materiais do subleito devem apresentar uma expansão, medida no ensaio C.B.R., menor ou igual a 2%, e C.B.R. maior ou igual a 2%.

Classificação dos materiais empregados no pavimento:

a) Materiais para reforço do subleito, os que apresentam:

C.B.R. maior que o do subleito

Expansão $\leq 1\%$ (medida com sobrecarga de 10lb)

b) Materiais para sub-base, os que apresentam:

C.B.R. $\geq 20\%$

I.G. = 0

Expansão $\leq 1\%$ (medida com sobrecarga de 10lb)

c) Materiais para base, os que apresentam:

C.B.R. $\geq 80\%$

Expansão $\leq 0,5\%$ (medida com sobrecarga de 10lb)

Limite de liquidez $\leq 25\%$

Índice de plasticidade $\leq 6\%$

Caso o limite de liquidez seja superior a 25% e/ou índice de plasticidade seja superior a 6; o material pode ser empregado em base (satisfeitas as demais condições), desde que o equivalente de areia seja superior a 30.

Para um número de repetições do eixo-padrão, durante o período do projeto $N \leq 5,00 \times 10^6$, podem ser empregados materiais com C.B.R. $\geq 60\%$ e as faixas granulométricas E e F.

Os materiais para base granular devem se enquadrar numa das seguintes faixas granulométricas (**Tabela 2.3**):

Tabela 2.3 – Granulometria para base granular

Tipos	Para $N > 5 \times 10^6$			Para $N < 5 \times 10^6$			Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	± 7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	± 5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT/2006

A fração que passa na peneira nº 200 deve ser inferior a da fração que passa na peneira nº 40. A fração graúda deve apresentar um desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50. Pode ser aceito um valor de desgaste maior, desde que haja experiência no uso do material. Em casos especiais podem ser especificados outros ensaios representativos da durabilidade da fração graúda.

Para o caso de materiais lateríticos, as “especificações Gerais” fixarão valores para expansão, índices de consistência, granulometria e durabilidade da fração graúda.

Tráfego – O pavimento é dimensionado em função do número equivalente (N) de operações de um eixo tomado como padrão, durante o período de projeto escolhido. A **Figura 2.1** dá os fatores de equivalência de operação entre eixos simples e em “tandem”, com diferentes cargas e o eixo simples padrão com carga de 8,2 t (18.000 lb).

Sendo V_1 o volume médio diário de tráfego no ano de abertura, num sentido e admitindo-se uma taxa de $t\%$ de crescimento anual, em progressão aritmética, o volume médio diário de tráfego, V_m , (num sentido) durante o período de P anos, será:

$$V_m = \frac{V_1 \left[2 + \frac{(P-1)t}{100} \right]}{2}$$

O volume total de tráfego, (num sentido) durante o período, V_t , será:

$$V_t = 365 \times P \times V_m$$

Admitindo-se uma taxa $t\%$ de crescimento anual em progressão geométrica, o volume total do tráfego, V_t , durante o período é dado por:

$$V_t = \frac{365 \cdot V_1 \left[\left(1 + \frac{t}{100} \right)^P - 1 \right]}{t/100}$$

Conhecido V_t , calcula-se N , que é o número equivalente de operações do eixo simples padrão durante o período de projeto e o parâmetro de tráfego usado no dimensionamento.

$$N = V_t \times (F.E) \times (F.C) \times (F.E) \times (F.C) = F.V$$

$$N = V_t \times (F.V)$$

F.E é um fator de eixos, isto é, um número que, multiplicado pelo número de veículos, dá o número de eixos correspondentes. F.C é um fator de carga, isto é, um número que, multiplicado pelo número de eixos que operam, dá o número de eixos equivalentes ao eixo padrão. F.V é o fator de veículo, isto é, um número que multiplicado pelo número de veículos que operam, dá, diretamente, o número de eixos equivalentes ao eixo padrão.

Para o cálculo de F.E, F.C e F.V, é necessário conhecer a composição de tráfego. Para isto, é necessário fazer uma contagem do tráfego na estrada que se está considerando, estudando-se

certo volume total do tráfego, V_t (para i período de amostragem). Faz-se contagem do número total de eixos n , e pesam-se todos esses eixos (**Figura 2.1**).

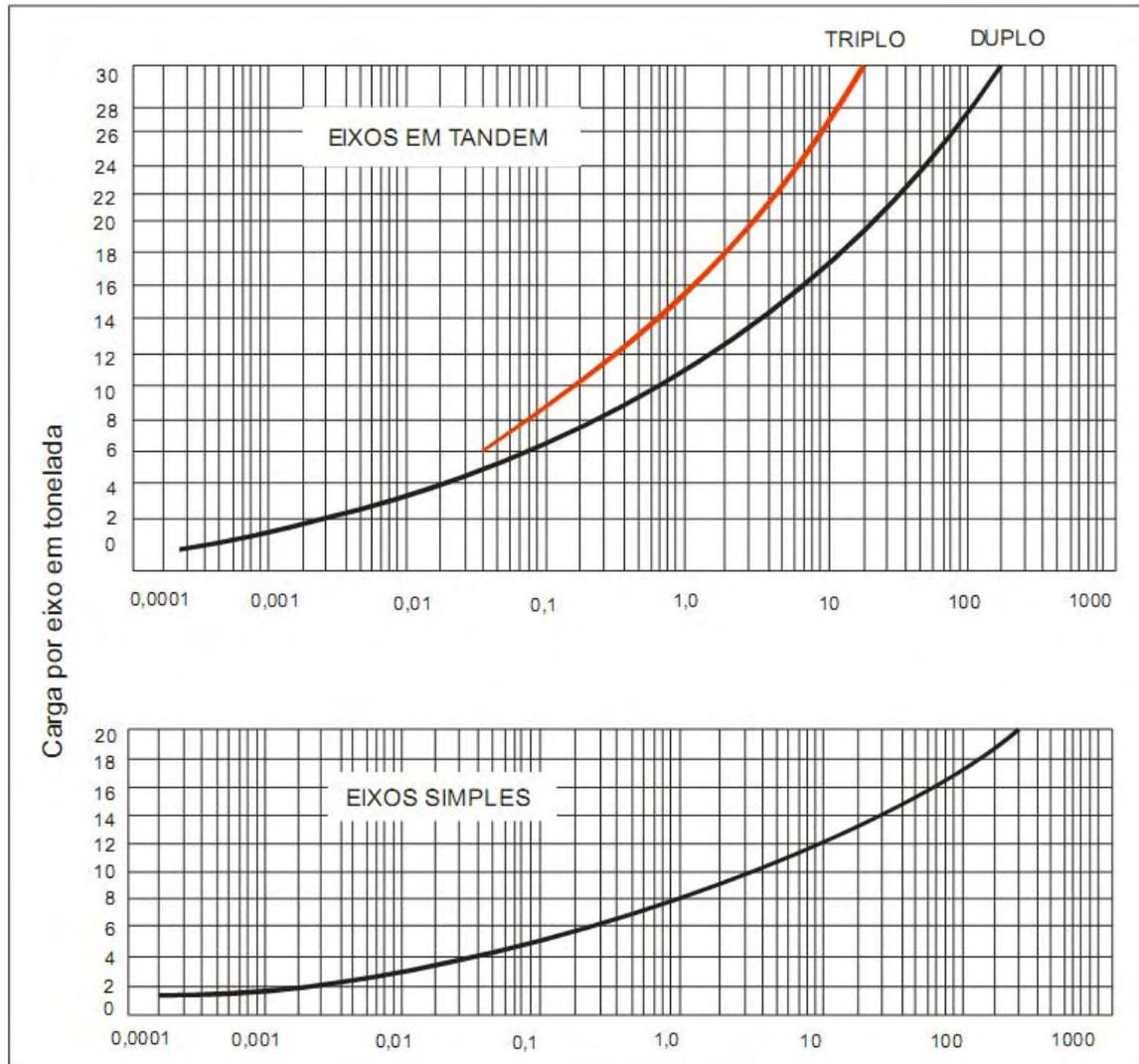


Figura 2.1 – Fatores de equivalência de operação

Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT/2006

Tem-se $n = V_t \times (F.E)$, donde, $F.E = \frac{n}{V_t}$

Com os dados de pesagem, organiza-se uma tabela (**Tabela 2.4**), agrupando-se os diversos eixos por intervalos de carga, representados pelo seu ponto central:

Tabela 2.4 - Determinação do fator de operações

(1)	(2)	(3)	(4)
	percentagem	Fator de equivalência	Fator de operações
Eixos Simples (t)			
Eixos tandem (t)			

Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT/2006

Os valores da coluna 3 são obtidos da **Figura 2.1**. Os valores da coluna 4 são os produtos dos valores da coluna 2 pelos da coluna 3. O somatório dos valores da coluna 4 representa o produto $100 \times (F.C)$, isto é, $Equivalência = 100 \times F.C$.

$$\text{Donde, } F.C = \frac{\text{Equivalência}}{100}$$

$F.V = (F.E) \times (F.C)$, normalmente, o cálculo de N é feito de acordo com as seguintes etapas:

- a) Cálculo de V_t através de dados estatísticos da estrada que se está considerando, incluindo-se a fixação de VI (onde devem ser levados em conta os tráfegos gerado e desviado), do tipo de crescimento e de sua taxa t. O cálculo de V_t pode ser feito também em face de um estudo econômico da região.
- b) Cálculo de F.V, através dos F.V individuais ($F.V_i$) para as diferentes categorias de veículos, determinadas numa estação de pesagem representativa da região e das percentagens P_i (determinada no item a) com que estas categorias de veículos ocorrem na estrada que está sendo considerada.

$$F.V = \frac{\sum \pi \times (F \cdot VI)}{100}$$

Os diferentes veículos são classificados pelo DNIT nas seguintes categorias:

- a) automóveis;

- b) ônibus;
- c) caminhões leves, com dois eixos simples, de rodas simples;
- d) caminhões médios, com dois eixos, sendo o traseiro de rodas duplas;
- e) caminhões pesados, com dois eixos, sendo o traseiro "tandem";
- f) reboques e semi-reboques: as diferentes condições de veículos, em unidades múltiplas.

Os F.Vi para automóveis e caminhões leves (embora calculáveis) são desprezíveis, interessando especialmente, os F. Vi para caminhões médios, pesados e reboques e semi-reboques.

NOTA: Fator climático Regional - Para levar em conta as variações de umidade dos materiais do pavimento durante as diversas estações do ano (o que se traduz em variações de capacidade de suporte dos materiais), o número equivalente de operações do eixo-padrão ou parâmetro de tráfego, N, deve ser multiplicado por um coeficiente (F.R.). Sendo que na pista experimental da AASHTO, variou de 0,2 (ocasião em que prevalecem baixos teores de umidade) a 5,0 (ocasiões em que os materiais estão praticamente saturados). É possível que, estes coeficientes sejam diferentes, em função da diferença de sensibilidade à variação do número N; é possível ainda, pensar-se num fator climático que afetaria a espessura do pavimento (em vez do número N), e que seria, ao mesmo tempo, função desta espessura.

O coeficiente final a adotar é uma média ponderada dos diferentes coeficientes sazonais, levando-se em conta o espaço de tempo em que ocorrem.

Parece mais apropriado a adoção de um coeficiente, quando se toma, para projeto, um valor C.B.R compreendido entre o que se obtém antes e o que se obtém depois da embebição, isto é, um valor correspondente à umidade de equilíbrio. Tem-se adotado um FR = 1,0 face aos resultados de pesquisas desenvolvidas no IPR/DNER.

Coeficiente de Equivalência Estrutural - São os seguintes os coeficientes de equivalência estrutural para os diferentes materiais constitutivos do pavimento (**Tabela 2.5**):

Tabela 2.5 – Coeficiente de equivalência estrutural

Componentes do pavimento	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT/2006

Nota: Pesquisas futuras podem justificar mudanças nestes coeficientes. Os coeficientes estruturais são designados, genericamente por:

- Revestimento: K_R ;
- Base: K_B ;
- Sub-base: K_S ;
- Reforço: K_{Ref} .

Espessura Mínima de Revestimento - A fixação da espessura mínima a adotar para os revestimentos betuminosos é um dos pontos ainda em aberto na engenharia rodoviária, quer se trate de proteger a camada de base dos esforços impostos pelo tráfego, quer se trate de evitar a ruptura do próprio revestimento por esforços repetidos de tração na flexão. As espessuras recomendadas na **Tabela 2.6**, visam especialmente as bases de comportamento puramente granular e são definidas pelas observações efetuadas.

Tabela 2.6 - Espessura mínima de revestimento betuminoso

N	Espessura Mínima de 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
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT/2006

No caso de adoção de tratamentos superficiais, as bases granulares devem possuir alguma coesão, pelo menos aparentes, seja devido à capilaridade ou a entrosamento de partículas.

Dimensionamento do Pavimento - O gráfico da **Figura 2.2** dá a espessura total do pavimento, em função de N e de I.S. ou C.B.R.; a espessura fornecida por este gráfico é em termos de material com $K = 1,00$, isto é, em termos de base granular. Entrando-se em abscissas, com o valor de N, procede-se verticalmente até encontrar a reta representativa da capacidade de suporte (I.S. ou C.B.R.) em causa e, procedendo-se horizontalmente, então, encontra-se, em ordenadas, a espessura do pavimento.

Supõe-se sempre, que há uma drenagem superficial adequada e que o lençol d'água subterrâneo foi rebaixado a, pelo menos, 1,50 m em relação ao greide de regularização.

No caso de ocorrência de materiais com C.B.R. ou I.S. inferior a 2, é sempre preferível fazer substituição, na espessura de pelo menos 1 m, por material com C.B.R. ou I.S. superior a 2.

As espessuras máximas e mínimas de compactação das camadas granulares são de 20 cm e 10 cm, respectivamente. A espessura construtiva mínima para estas camadas é de 15 cm.

A **Figura 2.3** apresenta simbologia utilizada no dimensionamento do pavimento, H_m designa, de modo geral, a espessura total de pavimento necessário para proteger um material com

C.B.R. ou I.S. = CBR ou I.S. = m, etc., h_n designa, de modo geral, a espessura de camada do pavimento com C.B.R. ou I.S. = n, etc.

Mesmo que o C.B.R. ou I.S. 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} , pelo gráfico da **Figura 2.2**, e R pela **Tabela 2.6**, as espessuras de base (B), sub-base (h_{20}) e reforço do subleito (h_n), são obtidas pela resolução sucessiva das seguintes inequações:

- $RK_R + BK_B = H_{20}$;
- $RK_R + BK_B + h_{20} K_S = H_n$;
- $RK_R + BK_B + h_{20} K_S + h_n K_{Ref} = H_m$.

Acostamento - Não se dispõe de dados seguros para o dimensionamento dos acostamentos, sendo que a sua espessura está de antemão, condicionada à da pista de rolamento, podendo ser feitas reduções de espessura, praticamente, apenas na camada de revestimento. A solicitação de cargas é, no entanto, diferente e pode haver uma solução estrutural diversa da pista de rolamento.

A adoção nos acostamentos da mesma estrutura da pista de rolamento tem efeitos benéficos no comportamento desta última e simplifica os problemas de drenagem; geralmente, na parte correspondente às camadas de reforço e sub-base, adota-se, para acostamentos e pista de rolamento, a mesma solução, procedendo-se de modo idêntico para a parte correspondente à camada de base, quando o custo desta camada não é muito elevado. O revestimento dos acostamentos pode ser, sempre, de categoria inferior ao da pista de rolamento.

Quando a camada de base é de custo elevado, pode-se dar uma solução de menor custo para os acostamentos.

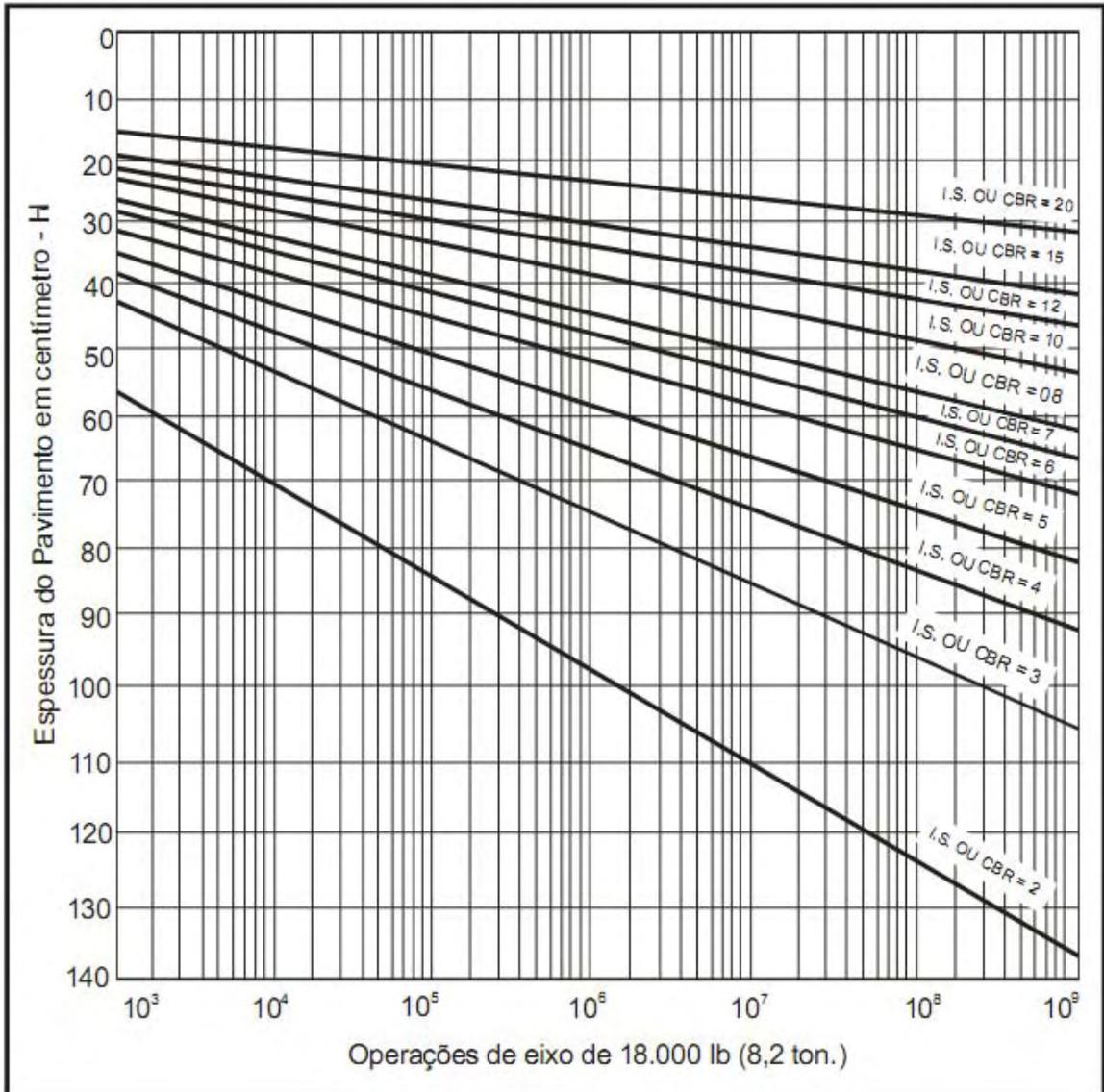
Algumas sugestões têm sido apontadas para a solução dos problemas aqui focalizados, como:

a) adoção, nos acostamentos, na parte correspondente à camada de base, de materiais próprios para sub-base granular de excepcional qualidade, incluindo solos modificados por cimento, cal, etc.

b) consideração, para efeito de escolha de revestimento, de um tráfego nos acostamentos da ordem de, até 1% do tráfego na pista de rolamento.

Pavimentos por etapas - Muitas vezes, quando não se dispõe de dados seguros sobre a composição de tráfego, é conveniente a pavimentação por etapas, havendo ainda a vantagem de, ao se completar o pavimento para o período de projeto definitivo, eliminam-se as pequenas irregularidades que podem ocorrer nos primeiros anos de vida do pavimento.

A pavimentação por etapas é especialmente recomendável quando, para a primeira etapa, pode-se adotar um tratamento superficial como revestimento, cuja espessura é perfeitamente desprezível; na segunda etapa a espessura a acrescentar vai ser ditada, muitas vezes, pela condição de espessura mínima de revestimento betuminoso a adotar.



$$H_t = 77,67 \cdot N^{0,0482} \cdot CBR^{-0,598}$$

Figura 2.2 – Determinação de espessura do pavimento

Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT/2006

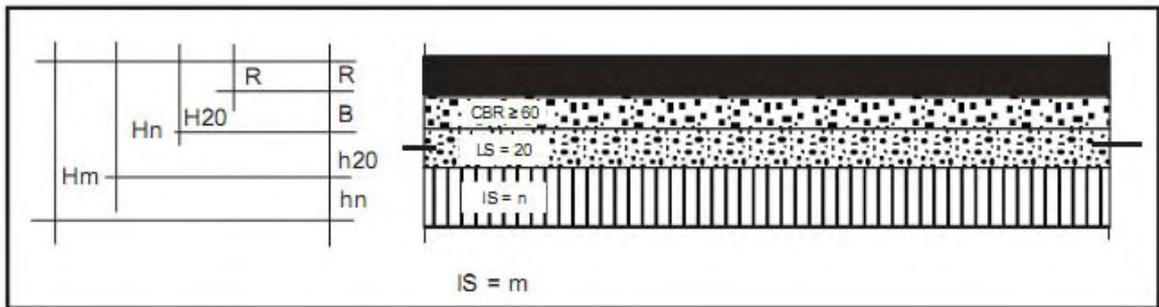


Figura 2.3 – Dimensionamento do pavimento

Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT/2006

2.4.2 Consideração da resiliência na pavimentação

O termo resiliência significa energia armazenada em um corpo deformado elasticamente, que é desenvolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações; ou seja, é a energia potencial de deformação. (Medina, 1997)

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT de 2006, até a década de 70, os métodos de dimensionamento usualmente empregados no Brasil caracterizavam-se por focar, basicamente, a capacidade de suporte dos pavimentos em termos de ruptura plástica sob carregamento estático, retratada através do valor do CBR. No entanto, observa-se que boa parte da malha rodoviária vinha apresentando uma deterioração prematura, que era atribuída à fadiga dos materiais gerada pela contínua solicitação dinâmica do tráfego atuante. Esta realidade acabou por dar ensejo à introdução, no país, de estudos da resiliência de materiais empregáveis em pavimentos, permitindo assim, avaliar os comportamentos estruturais até então não explicáveis pelos procedimentos clássicos e efetuar-se uma abordagem mais realista desta problemática no meio tropical.

Tal metodologia resultou na possibilidade de analisar e prever o estado tensão-deformação de estruturas de pavimentos através de programas computacionais, partindo-se de propriedades dinâmicas expressáveis em termos de valores de módulo resiliente. O módulo de deformação resiliente é determinado pela seguinte expressão:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}$$

Em que:

M_R = módulo de deformação resiliente;

σ_d = tensão-desvio aplicada repetidamente;

ε_r = deformações específica axial resiliente correspondente a um número particular de repetição da tensão-desvio.

A partir dos estudos de Mecânica dos Pavimentos iniciados na COPPE/UFRJ em 1976, por Pinto e Preussler, sob a orientação de Medina, foi possível desenvolver uma classificação de

solos baseada em suas propriedades resilientes, permitindo, assim, qualificá-los quanto ao comportamento mecânico em termos de deformabilidade elástica, conforme a **Figura 2.4**.

A Classificação fundamenta-se no conhecimento do módulo resiliente dos solos (MR), conforme formula apresenta, e é determinado de acordo com o DNER – ME 131/94 (**ANEXO C**).

a) Solos Granulares

Entende-se por solos granulares, para fins de classificação quanto à resiliência, aqueles que apresentam menos de 35% em peso de material passando na peneira nº 200 (0,0075mm).

A **Figura 2.4** apresenta os grupos de solos A,B e C, que retratam o comportamento deles, definido pelo modelo:

$$M_R = K_1 \times \sigma_3^{K_2}$$

sendo K_1 e K_2 os parâmetros de resiliência determinados em ensaios triaxiais de carregamento repetido sob tensões de confinamento, σ_3 , e MR o módulo de resiliência correspondente.

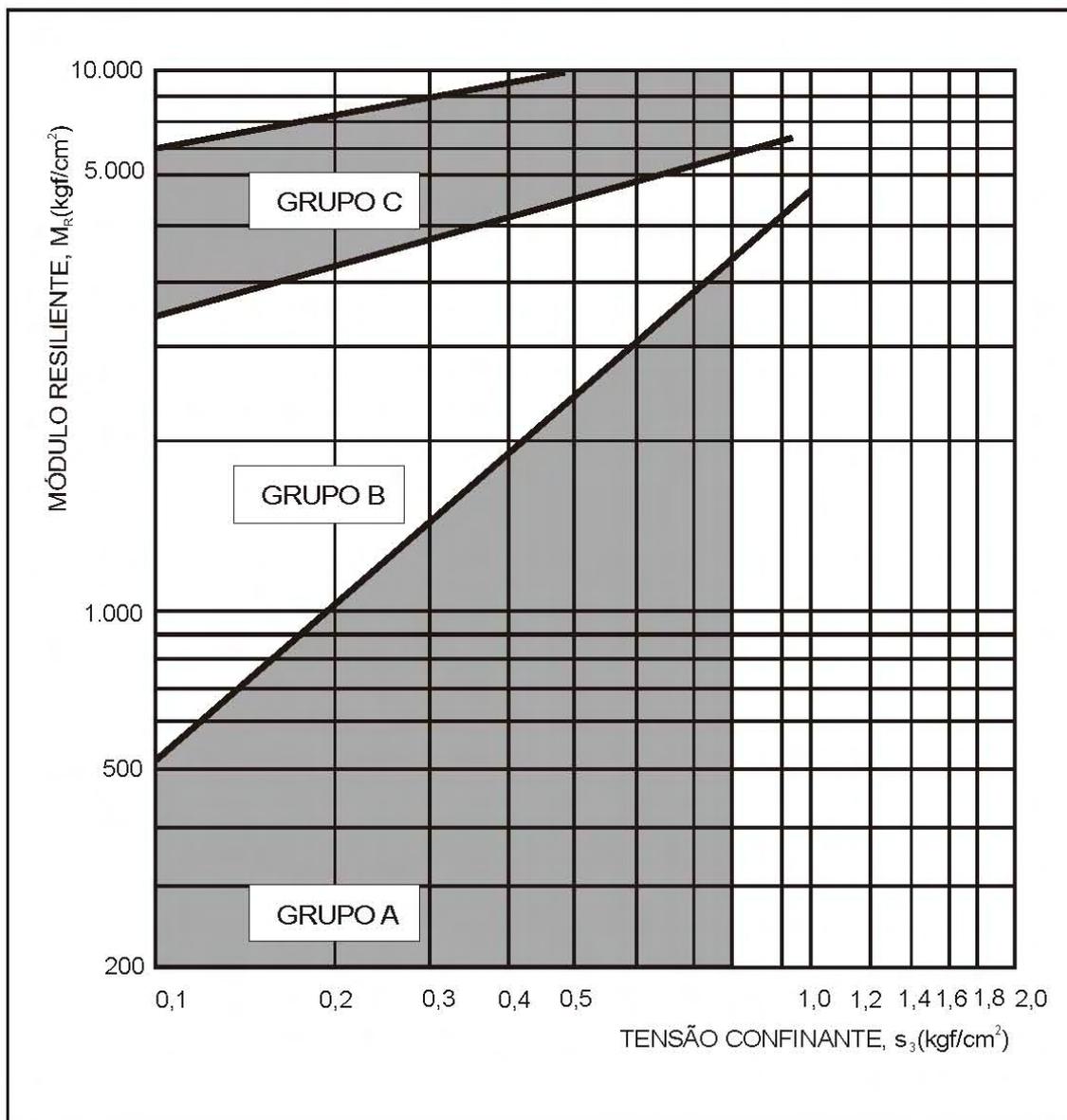


Figura 2.4 - Classificação resiliente de solos granulares

Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT/2006

Grupo A - solos com grau de resiliência elevado - não deve ser empregado em estruturas de pavimentos e constituem subleitos de péssima qualidade;

Grupo B - solo com grau de resiliência intermediário - pode ser empregado em estrutura de pavimentos como base, sub-base e reforço do subleito, ficando seu comportamento dependente das seguintes condições:

$K_2 \leq 0,50$; bom comportamento;

$K_2 > 0,50$; comportamento dependente da espessura da camada e da qualidade do subleito.

Grupo C - solos com baixo grau de resiliência – pode ser usado em todas as camadas do pavimento, resultando em estruturas com baixas deflexões.

b) Solos Finos

Entende-se por solos finos, para fins de classificação quanto à resiliência, aqueles que apresentam mais de 35% em peso de material passando na peneira nº 200 (0,075 mm).

A **Figura 2.5** apresenta os grupos de solos Tipo I, Tipo II e Tipo III, que retratam o comportamento dos mesmos, definido pelo modelo:

$$M_R = K_2 + K_3 (K_1 - \sigma_d) \text{ para } \sigma_d < K_1 ;$$

$$M_R = K_2 + K_4 (\sigma_d - K_1) \text{ para } \sigma_d > K_1.$$

sendo K_1 , K_2 , K_3 e K_4 , os parâmetros de resiliência determinados em ensaios triaxiais de carregamento repetido sob tensões-desvio, σ_d , e M_R o módulo de resiliência correspondente.

Solo Tipo I - solo de bom comportamento quanto à resiliência como subleito e reforço do subleito, podendo ser utilizado também como camada de sub-base.

Solo Tipo II - solo de comportamento regular quanto à resiliência como subleito e reforço do subleito.

Solo Tipo III - solo de comportamento ruim quanto à resiliência. É vedado seu emprego em camadas do pavimento. Para o subleito, requerendo cuidados e estudos especiais.

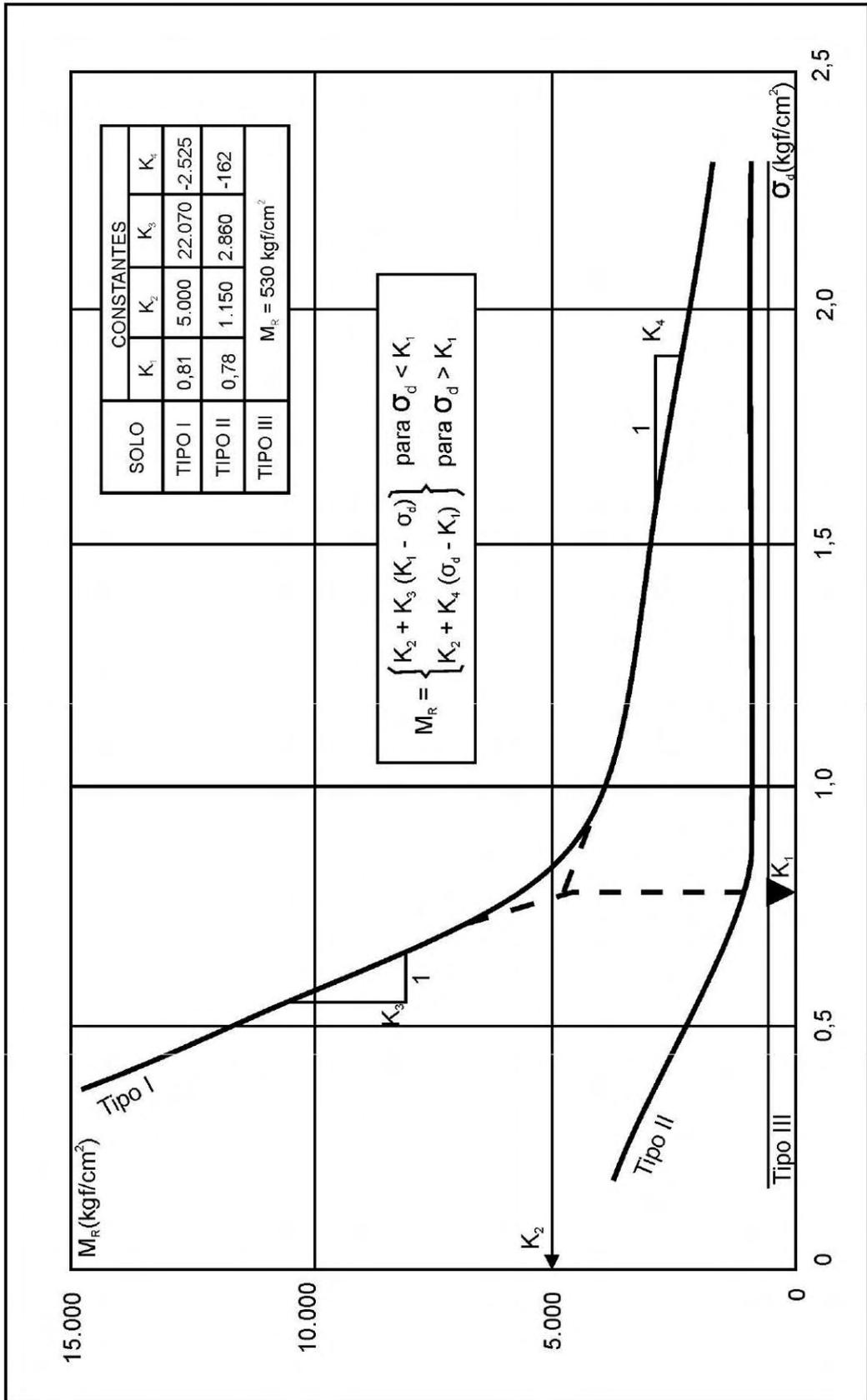


Figura 2.5 - Classificação resiliente de solos finos

Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT/2006

Na impossibilidade de determinar os valores de M_R , pode-se estimar a classificação indiretamente a partir da percentagem de silte na fração que passa na peneira nº 200, S% e do CBR, conforme a **Tabela 2.7**.

Tabela 2.7 - Classificação dos solos finos (Método indireto)

CBR	S%		
	≤ 35	35 - 65	≥ 65
≤ 5	III	III	III
6 - 9	II	II	III
≥ 10	I	II	III

Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT/2006

2.4.3 Análise mecanicista

Finalidades

O método de dimensionamento do DNER, baseado no método original do USACE, e o da AASHTO visam à proteção do subleito contra a geração de deformações plásticas excessivas durante o período de projeto. São métodos empíricos, com base experimental referente a condições climáticas e de solos nos EUA e que tem garantido essa proteção quando aplicados no Brasil, haja vista a rara ocorrência de afundamentos em trilha de roda, significativos nos pavimentos dimensionados por esses métodos. Pode-se até mesmo falar em um super dimensionamento, que seria explicado pela ausência, no Brasil, da condição crítica correspondente ao degelo da primavera.

Esses métodos podem ser completados, contudo, por análises que permitam considerar-se no dimensionamento, o problema do trincamento por fadiga das camadas asfálticas, nos pavimentos flexíveis, e das camadas cimentadas, nos pavimentos semi-rígidos. Para esse objetivo o procedimento mais eficaz é a aplicação de modelos de previsão de desempenho do tipo mecanístico-empírico, em vista de seu maior campo de aplicação e por estarem embasados em propriedades mecânicas fundamentais dos solos e materiais de pavimentação. 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 deterioração provocados pelas cargas do tráfego. Também no caso de projetos de restauração, o dimensionamento de recapeamentos asfálticos contra a reflexão de trincas e a consideração dos efeitos de camadas especiais intermediárias, pode ser efetuado, de forma confiável, apenas por meio de modelos mecanístico-empíricos.

Conceitos

Um modelo de previsão de desempenho é uma função que permite quantificar a redução do nível de serventia ou a geração de defeitos ao longo da vida de serviço do pavimento. Tal modelo é denominado "mecanístico-empírico" e pode ser constituído por três condicionantes:

- a) Um Modelo Estrutural para cálculo das respostas induzidas pelas cargas de roda em movimento nas camadas do pavimento, na forma de tensões deformações ou deflexões elásticas que estejam relacionadas ao surgimento ou à propagação de defeitos na estrutura;
- b) Funções de Transferência, capazes de relacionar as respostas da estrutura às cargas do tráfego, à geração e propagação de defeitos. Além de atenderem a determinadas condições de contorno, exigidas pelo problema, essas funções deverão basear-se em teorias empiricamente validadas, que descrevam o mecanismo com que a deterioração se processa;
- c) Fatores ou Funções de Calibração, que ajustam as previsões das Funções de Transferência de modo a se reproduzir dados de uma determinada base empírica. São responsáveis, portanto, pela consideração de parâmetros que não puderam ser explicitados, seja no modelo estrutural ou nas Funções de Transferência, tais como: clima, características específicas do tráfego atuante particularidades dos materiais e de sua variabilidade.

Um aspecto que assume especial relevância quando da aplicação de modelos mecanístico-empíricos, tanto no projeto de pavimentos novos como no de restauração, é a caracterização adequada do comportamento tensão-deformação dos materiais sob as cargas transientes dos veículos. O módulo de elasticidade reveste-se de duas definições nesse contexto, a saber:

- Módulo de Deformação Resiliente (M_R): determinado em laboratório por meio de ensaios de cargas repetidas, com duração de carga da ordem de 0,10 s e tempo de repouso de 0,9 s.

Utiliza toda a deformação recuperável no seu cálculo, embutindo, portanto, as parcelas elásticas instantâneas e viscoelástica, geradas pelo pulso de carga de 0,1 s de duração;

– Módulo de Elasticidade Efetivo "in situ" (E_{ef}): é o módulo determinado por retroanálise das bacias de deflexões lidas através de equipamentos para ensaios não destrutivos.

Enquanto M_R se refere às condições de compactação e de solicitação do ensaio de laboratório, E_{ef} reflete ou sintetiza o estado de tensões, a compactação e o modo de solicitação a que a camada é submetida pelas cargas dos veículos em movimento. Não existem, portanto, correlações universais entre esses dois parâmetros, embora possam estabelecer-se comparações em casos particulares. Tais comparações são importantes, visto que, no projeto de novos pavimentos, pode-se dispor apenas de M_R , enquanto nos projetos de restauração, apenas E_{ef} pode estar disponível, de modo geral.

Modelos de Previsão de Desempenho

Um modelo de previsão de desempenho é chamado "empírico" quando se constitui de uma correlação direta entre alguns parâmetros relacionados ao desempenho do pavimento e a evolução dos defeitos ou queda da serventia. Os modelos do tipo "mecanístico-empírico" já foram comentados anteriormente. Em outra classificação, os modelos podem ser "determinísticos", quando prevêm um único valor para a condição futura do pavimento, ou "probabilísticos", quando fornecem as possibilidades de diversas condições. Em projetos, os modelos mais adequados são os determinísticos do tipo mecanístico-empírico, enquanto que, em Sistemas de Gerência de Pavimentos em nível de rede, os modelos probabilísticos do tipo empírico são preferíveis.

No caso do dimensionamento estrutural de pavimentos novos, devem-se aplicar modelos apropriados para a consideração de:

- a) Trincamento por fadiga das camadas asfálticas e cimentadas;
- b) Acúmulo de deformações permanentes nos solos, materiais granulares e camadas asfálticas.

Cálculo de Tensões e Deformações

Uma série de modelos e programas de computador estão disponíveis para se calcular as tensões e deformações provocadas pelas cargas de roda em uma estrutura de pavimento. No que diz respeito à sua escolha e modo de utilização, as seguintes observações devem ser feitas:

a) teoria de camadas elásticas, onde cada camada é simulada por um meio elástico linear, homogêneo e isotrópico, é o modelo estrutural mais simples capaz de reproduzir as tensões e deformações tidas em pavimentos instrumentados. Modelos que incorporem a dependência dos módulos de elasticidade de solos e de materiais granulares em função do estado de tensões têm representado um aperfeiçoamento útil na prática. Outros modelos mais complexos, que incluam os efeitos de anisotropia, trajetória de tensões efetivas no ensaio triaxial e viscoelasticidade têm encontrado aplicação prática em problemas específicos e ainda não puderam ser incorporados aos projetos rotineiros;

b) Os modelos de previsão de desempenho do tipo mecanístico-empíricos estão calibrados para um determinado modelo estrutural, o qual compreende:

- um processo para cálculo de tensões e deformações; e
- uma forma de se considerar as propriedades elásticas dos materiais (módulos de resiliência, por exemplo).

Assim, esses modelos de previsão de desempenho são dependentes do modelo estrutural associado, não se podendo aplicá-los com outros modelos estruturais.

Embora o aperfeiçoamento progressivo dos modelos estruturais seja importante para se elevar a confiabilidade dos modelos de previsão de desempenho mecanístico-empíricos, a situação atual é a de que as maiores incertezas se encontram na calibração experimental dos modelos. Assim, antes de se aplicar modelos deste tipo, é fundamental reavaliar-se os fatores de calibração utilizando-se os dados de desempenho locais ou regionais disponíveis.

O software que será empregado nesta pesquisa é o ELSYM 5, este programa de análise foi desenvolvido na Universidade de Berkeley, teve sua versão modificada para uso em microcomputadores em 1985, ele analisa até cinco camadas superpostas do pavimento pelas equações de Burmister e os materiais são considerados homogêneos, isotrópicos e elásticos lineares. O programa fornece as tensões e deformações horizontais e verticais em qualquer ponto do sistema.

3. AVALIAÇÃO DOS MATERIAIS DO ESTUDO

Com o intuito da utilização de Escória de Aciaria como agregado nas camadas de base de pavimentação, procurou-se pesquisar e analisar seu comportamento, comparando com o da Brita Graduada, usualmente utilizada para este fim, levando em conta o fator CBR. Também serão realizados ensaios para verificar seu comportamento quanto ao módulo resiliente.

Esta pesquisa é na ordem de levantamento de dados, realizada nos laboratórios de Mecânica dos Solos e de Pavimentação, do Departamento de Engenharia Civil, da UFSC. Como os resultados, formaram-se gráficos, para a análise do comportamento mecânico dos agregados citados acima, e da mistura dos mesmos com solo.

3.1 Planejamento do Experimento

O programa do experimento contemplou o controle de duas misturas de agregados para camadas de pavimentação em laboratório. Porém, dois agregados desta mistura foram ensaiados também separadamente, para obter mais dados necessários a pesquisa. Os materiais que foram submetidos aos ensaios são: o primeiro, somente Solo; o segundo, a Escória de Aciaria; e o terceiro e quarto, mistura de Escória de Aciaria/Solo e Brita graduada/Solo, respectivamente. Utilizou-se a faixa C do DNIT, contida na tabela 29, do Manual de Pavimentação do mesmo órgão; para a composição granulométrica das misturas citadas, com o intuito para a determinação do CBR (California Bearing Ratio) ou também chamado, ISC (Índice de Suporte Califórnia).

Conforme ensaios mencionados no Capítulo 2, que faz referência aos **Anexos A e B**; após a determinação da granulometria de cada agregado ou mistura, foram moldados corpos de prova de cada composição, em diferentes teores de umidade, para verificar a sua massa específica aparente seca e o CBR que esta amostra atinge.

Na **Tabela 3.1**, estão apresentados resumidamente os números de amostras que foram preparadas para a execução de todos os ensaios, moldados com energia de compactação do Proctor Modificado.

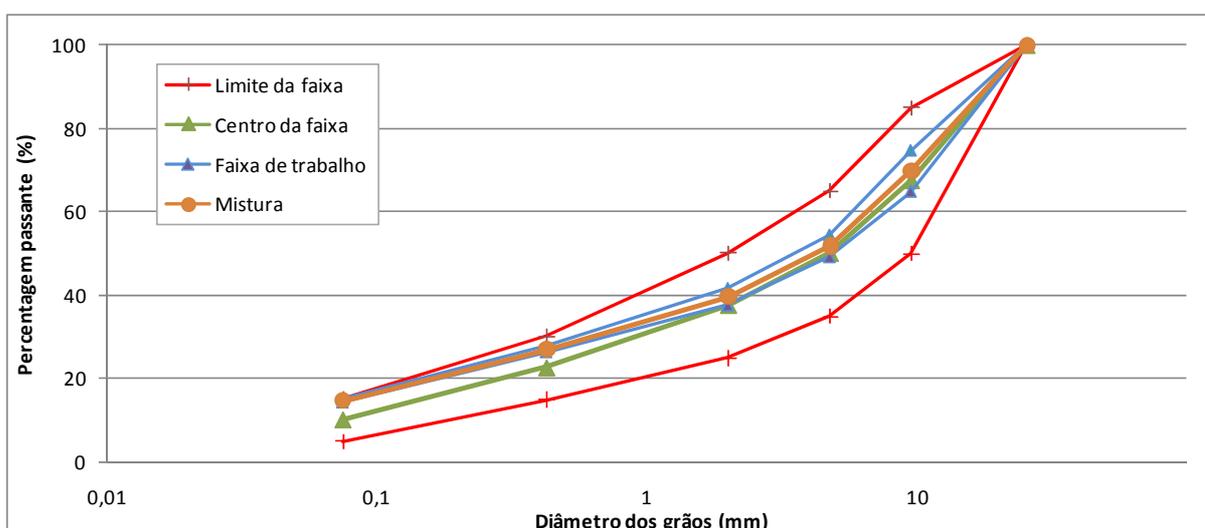
Tabela 3.1 - Quantidades de amostras por ensaio

Composições	Procedimentos	M.E.A. do Solo	Ensaio	Ensaio
		Seco	CBR	MR
Solo		5 amostras	5 amostras	
Escória de Aciaria		5 amostras	5 amostras	2 amostras
Mistura - Escória de Aciaria/Solo		5 amostras	5 amostras	2 amostras
Mistura - Brita-graduada/Solo		5 amostras	5 amostras	

Na **Tabela 3.2**, está apresentada a curva de referência para encaixe da granulometria da mistura Escória/Solo conforme a Faixa “C” do DNIT, como pode ser visto no **Gráfico 3.1**.

Tabela 3.2 - Faixa "C" - DNIT

Delimitações para curva com referência na Faixa C DNIT								
Peneira	mm	Limite da faixa % passante		Centro da faixa % passante	Mistura % passante	Faixa de trabalho % passante		
2"	50,8	100	- 100	100	100	100	-	100
1"	25,4	100	- 100	100	100	100	-	100
3/8"	9,5	50	- 85	67,5	69,8	64,9	-	74,7
Nº 4	4,76	35	- 65	50	51,8	49,2	-	54,4
Nº 10	2	25	- 50	37,5	39,6	37,6	-	41,6
Nº 40	0,425	15	- 30	22,5	27	26,5	-	27,5
Nº 200	0,075	5	- 15	10	14,7	14,4	-	15,0

**Gráfico 3.1 - Ajuste granulométrico da mistura**

3.2 Materiais Utilizados na Pesquisa

3.2.1 Escória de aciaria

A Escória de Aciaria utilizada nos ensaios foi cedida pela ArcelorMittal Tubarão (Coordenadas 20°14'40" S, 40°14'20" O), sendo esta, segundo a referida empresa, um co-produto da fabricação do aço. A escória empregada foi denominada por esta razão social de ACERITA[®]. Conforme citado no Capítulo 2, esta denominação refere-se quando há um tratamento de umectação e aeração durante um período de tempo na escória, tendo este tratamento como finalidade, a redução da expansão das reações dos óxidos livres.

A localização da empresa citada pode ser observada na **Figura 3.1**.

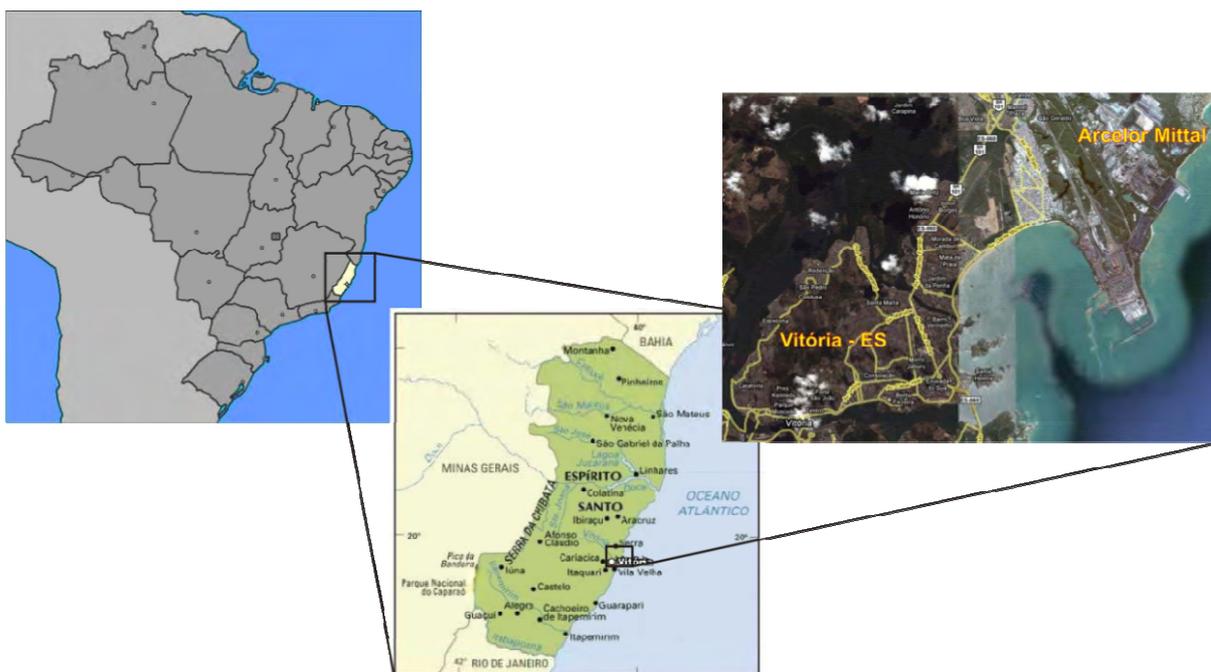


Figura 3.1 - Mapa de Situação - ArcelorMittal Tubarão

3.2.2 Brita - Graduada

O material pétreo utilizado nos ensaios foi cedido pela pedreira Pedrita – Planejamento e Construção Ltda. (Coordenadas 27°38'58" S, 48°28'56" O), com unidade situada no bairro Rio Tavares, em Florianópolis – SC.

Segundo o responsável pela britagem na pedreira, a rocha cedida é granito. Que se confirma com o mapa geológico mostrado na **Figura 3.2**, onde, em tons de magenta, são caracterizados os *Granitóides Anorogênicos*.

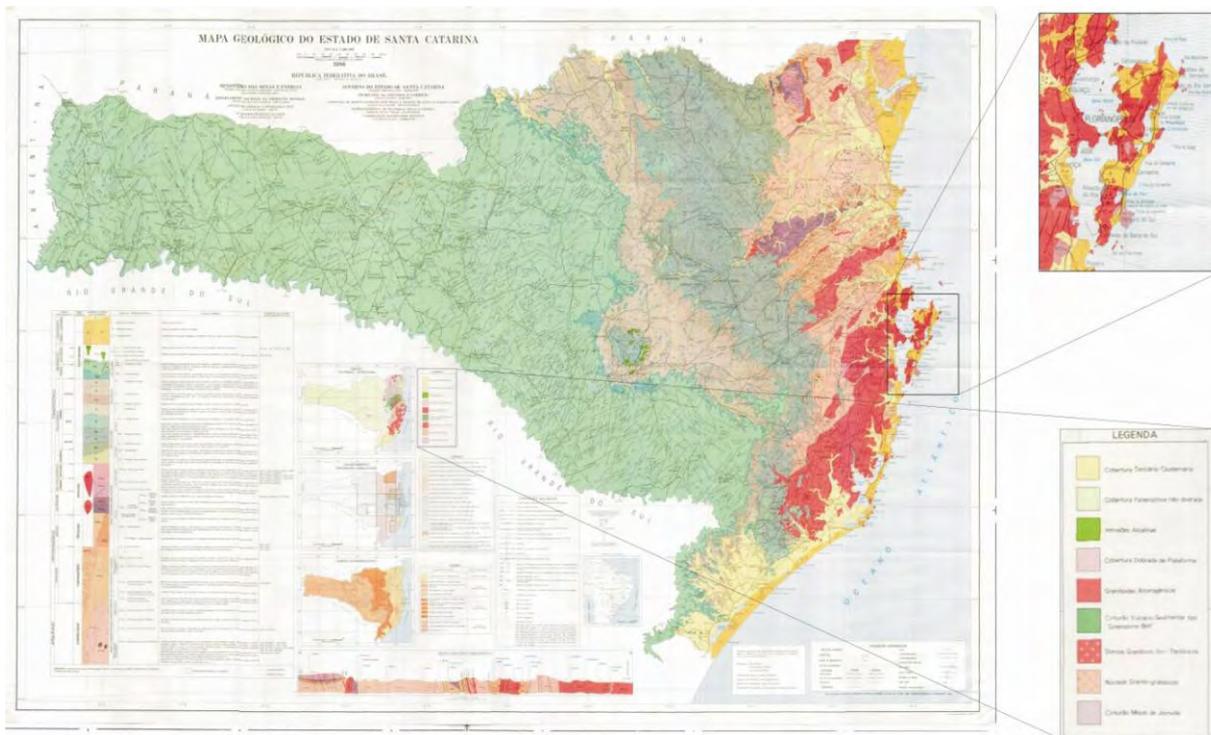


Figura 3.2 - Mapa Geológico de Santa Catarina

3.2.3 Solo para mistura

Com auxílio de um laboratorista experiente, coletou-se o solo no município da Palhoça, junto a um aterro que estava sendo executado para a duplicação da BR-101, no trecho sul do Estado de Santa Catarina (Coordenadas 27°45'45" S, 48°37'50" O). Como pode ser visualizada na **Figura 3.3**.

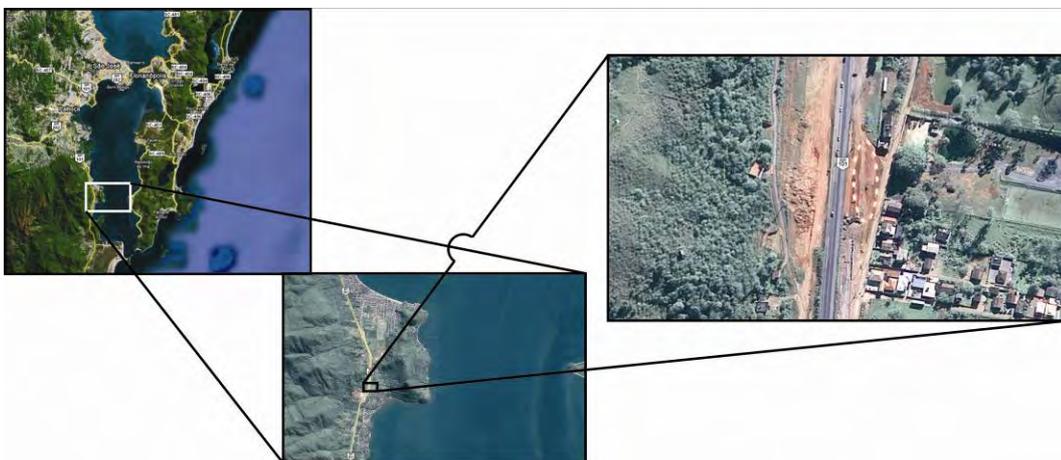


Figura 3.3 - Mapa de Situação do Solo

3.3 Ensaio Laboratoriais Para Determinação de CBR

Com o intuito de verificar se a Escória de Aciaria tem suporte semelhante ao da usual Brita Graduada em camadas de base para pavimentação, foram realizados ensaios, de acordo com os **Anexos A, B e C**, sendo seus resultados, apresentados a seguir.

3.3.1 Solo para mistura

Como mencionado no item 3.2.3, um laboratorista experiente foi quem apontou onde teria solo de melhor qualidade para formação da mistura Escória/Solo. Como dito anteriormente, o local assinalado onde foi captado o material, se encontrava no município da Palhoça/SC.

Inicialmente, foi realizado o ensaio para determinar qual a densidade real dos grãos do solo, que está representado na **Tabela 3.3**. Com a densidade determinada, efetuou-se então, o ensaio de granulometria, que está mostrado na **Tabela 3.4**, e sua representação gráfica, no **Gráfico 3.2**.

Tabela 3.3 - Determinação da Densidade Real dos grãos do solo

 UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA CENTRO TECNOLÓGICO Departamento de Engenharia Civil LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS					
DETERMINAÇÃO DE MASSA ESPECÍFICA					
Amostra: Am. 1			Laboratorista: Gian Carlo		
Responsável: Glicério Triches			Data: ago/09		
Teor de Umidade				Observações	
Cápsula Nº	32	32			
Peso da Cápsula (g)	15,80	15,80			
Cápsula + Solo Úmido. (g)	90,20	90,20			
Cápsula + Solo Seco (g)	82,70	82,70			
Teor de Umidade	11,21%	11,21%			
Teor de Umidade Médio	11,21%				
Dados de Ensaio					
Nº do Picnômetro	5	1			
Peso do Picnômetro (g)	----	----			
Peso Picnômetro + Água (g)	603	603			
Peso do Solo Úmido (g)	57,1	56,8			
Peso do Picnômetro + Solo Úmido + Água (g)	635,1	635			
Temperatura da Água no Ensaio (°C)	26,0	26,0			
Massa Específica da Água (g/cm³)	0,9971	0,9971			
Densidade Real dos Grãos (g/cm³)	2,660	2,670			
RESULTADO					
Densidade Real dos Grãos (g/cm³): 2,665					

Tabela 3.4 - Análise Granulométrica do Solo

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA												
CENTRO TECNOLÓGICO												
Departamento de Engenharia Civil												
LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS												
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA												
Amostra: AM-1						Laboratorista: Gian Carlo Responsável: Glicério Triches Data: ago-09						
UMIDADE HIGROSCÓPICA												
				AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		AMOSTRA TOTAL SECA (g)				
CÁPSULA nº				17		17		AMOSTRA ÚMIDA				1004 Mt (massa da amostra seca ao ar)
CÁPSULA + SOLOS ÚMIDO (g)				90,70		90,70		Ps RETIDO #10				0
CÁPSULA + SOLO SECO (g)				81,60		81,60		PASSANTE #10 ÚMIDA				1004
ÁGUA				9,10		9,10		PASSANTE #10 SECA				887,17
CÁPSULA (g)				12,50		12,50		PESO DA ÁGUA				116,83
SOLO SECO				69,10		69,10		AMOSTRA TOTAL SECA				887,17
TEOR DE UMIDADE h				13,17%		13,17%		Ph(Cápsula)				105,2 Mh sedimentação
UMIDADE MÉDIA				13,17%								
PENEIRAMENTO	GROSSO	PENEIRAS		PESO PEN.	PE + MATE	MAT. RET.	PORCENTAGEM RETIDA			PORCENTAGEM PAS.		
		Nº	mm	(g)	(g)	(g)	AMOS. PAR	AMOS.TO.	ACUMUL.	AMOS.PAR.	AMOS.TO.	
		3"	76,2			0		0,00%	0,00%		100,00%	
		2"	50,8			0		0,00%	0,00%		100,00%	
		1,5	38,1			0		0,00%	0,00%		100,00%	
		1"	25,4			0		0,00%	0,00%		100,00%	
		3/4"	19,1			0		0,00%	0,00%		100,00%	
		3/8"	9,5			0		0,00%	0,00%		100,00%	
		1/4"	6,4			0		0,00%	0,00%		100,00%	
	FINO	4	4,8	628,2	629,5	1,3		0,15%	0,15%		99,85%	
		8	2,4	418,7	436,5	17,8		2,01%	2,15%		97,85%	
		10	2	552,8	564,5	11,7		1,32%	3,47%		96,53%	
		16	1,19	489,7	492,7	3	3,23%		3,23%	96,77%	93,41%	
		30	0,59	464,2	470,7	6,5	6,99%		10,22%	89,78%	86,66%	
		40	0,42	485,5	489,5	4	4,30%		14,52%	85,48%	82,51%	
		50	0,3	325,6	328,2	2,6	2,80%		17,32%	82,68%	79,81%	
		70	0,21	451,8	455,4	3,6	3,87%		21,19%	78,81%	76,07%	
		100	0,15	346,8	351,3	4,5	4,84%		26,03%	73,97%	71,40%	
200	0,074	399,6	405,5	5,9	6,35%		32,38%	67,62%	65,27%			
SEDIMENTAÇÃO												
DESÍMETRO Nº						1						
MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS						2,67						
PESO DA AMOSTRA ÚMIDA (Ph)						105,2						
PESO DA AMOSTRA SECA (Ps)						92,96						
h(COEFICIENTE DE VISCOSIDADE DO MEIO DISPERSOR NA TEMPERATURA DE ENSAIO (g.s/cm ²))						0,00000945						
MASSA ESPECÍFICA DO MEIO DISPERSOR NA TEMPERATURA DE ENSAIO POR g/cm ³						1						
VOLUME DA SUSPENSÃO (cm ³)						1000						
MASSA ESPECÍFICA DA ÁGUA NA TEMPERATURA DO ENSAIO						1,00						
DATA	HORA	TEMPO (s)	TEMP.	LEIT. DESIM.	ALT.QUEDA + MENISCO(cm)	COR. DO MENISCO(cm)	ALTURA DE QUEDA(cm)	LEIT.DES+COR TEMP.DEF.	∞	DIÂMETRO GRÃOS(mm)	%AMOS.COM DIAM.<d	
			T	Rr	HR + Rm	Rm	HR	Rc	Rr - Rc	D	P	
28/ago	10:25	60	21,5	1,0380	13,41	0,15	13,26	1,0053	0,03267379	0,0475	54,42%	
		120	21,5	1,0375	13,51	0,15	13,36	1,0053	0,03217379	0,0337	53,59%	
		240	21,5	1,0368	13,64	0,15	13,49	1,0053	0,03147379	0,0240	52,42%	
		480	21,6	1,0356	12,72	0,15	12,57	1,0053	0,03029223	0,0164	50,45%	
		900	21,7	1,0351	12,81	0,15	12,66	1,0053	0,02981079	0,0120	49,65%	
		1800	21,8	1,0335	13,11	0,15	12,96	1,0053	0,02822946	0,0086	47,02%	
		3600	21,8	1,0322	13,35	0,15	13,20	1,0053	0,02692946	0,0061	44,85%	
		7200	22	1,0315	13,48	0,15	13,33	1,0052	0,02626713	0,0043	43,75%	
		14400	22,7	1,0306	13,65	0,15	13,50	1,0051	0,02550251	0,0031	42,47%	
		28800	23,1	1,0302	13,72	0,15	13,57	1,0050	0,02518233	0,0022	41,93%	
		100800	22,3	1,0290	13,95	0,15	13,80	1,0052	0,02382448	0,0012	39,68%	

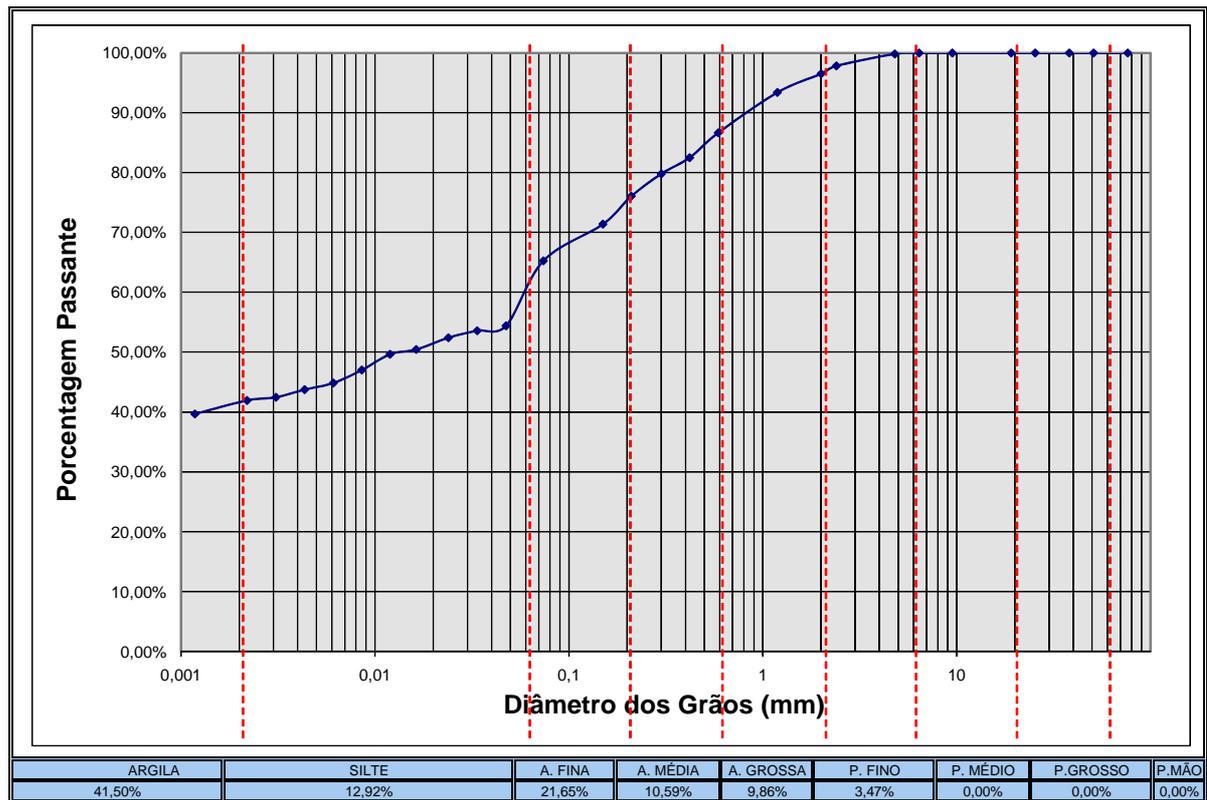


Gráfico 3.2 - Representação gráfica de Granulometria do Solo

Na sequência, foram realizados ensaios de compactação e de CBR. O método de ensaio de referência para a compactação foi o DNER-ME 129-94, que trata da correlação entre o teor de umidade e a massa específica aparente do solo seco sem reaproveitamento da amostra. Já para o CBR, o método seguiu a norma DNER-ME 049-94, que define a obtenção do valor relativo do suporte de solos, utilizando material que passa na peneira de 19 mm, correspondente à umidade ótima e massa específica aparente máxima seca.

A ME 129-94, define como molde padrão, um cilindro metálico de $15,24\text{ cm} \pm 0,05\text{ cm}$ de diâmetro interno e $17,78\text{ cm} \pm 0,02\text{ cm}$ de altura, devendo acoplar a este, um cilindro com $6,08\text{ cm}$ de altura e mesmo diâmetro de molde. Estes cilindros devem ser fixados a uma base, a fim de comportarem-se como uma única estrutura. O disco espaçador deve ser de diâmetro menor, para poder ser encaixado no interior do cilindro principal, podendo então, ter um diâmetro de $15,00\text{ cm} \pm 0,05\text{ cm}$, e altura igual a $6,35\text{ cm} \pm 0,02\text{ cm}$. Tais equipamentos podem ser vistos nas figuras 1, 2 e 3, do **Anexo B**.

Com a amostra preparada conforme item 4 do referido método de ensaio, deu-se início a execução do mesmo. Distribuiu-se uniformemente a amostra no cilindro com o disco

espaçador de fundo falso, compactou-se esta com a energia de compactação determinada pela ES 303-97, onde diz:

Para rodovias em que o tráfego previsto para o período do projeto ultrapassar o valor de $N = 5 \times 10^6$, o índice Suporte Califórnia do material de camada de base deverá ser superior a 80%; neste caso, a energia de compactação será a do Método C.

Já no item 6 do ME 129-94, que trata das energias de compactação, comenta que a energia a ser adotada para o Método C, deverá ser de 55 golpes em cada uma das 5 camadas do corpo de prova.

Depois de compactadas as 5 camadas, com a quantidade de golpes estabelecida pelo método, removeu-se o colarinho, e retirou-se, com régua de aço biselada, o excesso de material, até estar com altura igual ao molde. Logo após, determinou-se com aproximação de 1 g, a massa do material úmido compactado mais o cilindro. Vale lembrar que com a segunda camada já compactada, sempre foi retirada uma amostra de aproximadamente 80 g, para determinação da umidade em estufa que este corpo de prova (CP) estava no momento da sua compactação.

Com os ensaios já realizados, aplicou-se a metodologia de cálculo proposta pela mesma norma que instruiu a moldagem do CP, onde:

- A umidade é dada pela seguinte expressão:

$$h = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

onde: h – teor de umidade em percentagem;

P_h – massa da amostra úmida;

P_s – massa da amostra seca em estufa na temperatura de 110°C, até constância de peso.

- A massa específica aparente do solo seco compactado foi dividida em dois passos:

a) Massa específica aparente do solo úmido, após cada compactação, pela equação:

$$\gamma_h = \frac{P'_h}{V}$$

onde: γ_h – massa específica aparente do solo úmido, em g/cm³;

P'_h – massa do solo úmido compactado, em g;

V – volume do solo compactado, em cm³ (volume do molde).

b) Massa específica aparente do solo seco, após cada compactação, aplicou-se a seguinte equação:

$$\gamma_s = \gamma_h \times \frac{100}{100 + h}$$

onde: γ_s – massa específica aparente do solo seco, em g/cm³;

γ_h – massa específica aparente do solo úmido, em g/cm³;

h – teor de umidade do solo compactado.

Com os resultados obtidos pelo memorial de cálculo acima descrito e com auxílio de planilhas elaboradas pelo laboratório onde foram realizados os ensaios, foi possível determinar a curva de compactação, a massa específica aparente máxima do solo seco e sua umidade ótima. Tal curva e dados obtidos podem ser vistos no **Gráfico 3.3**.

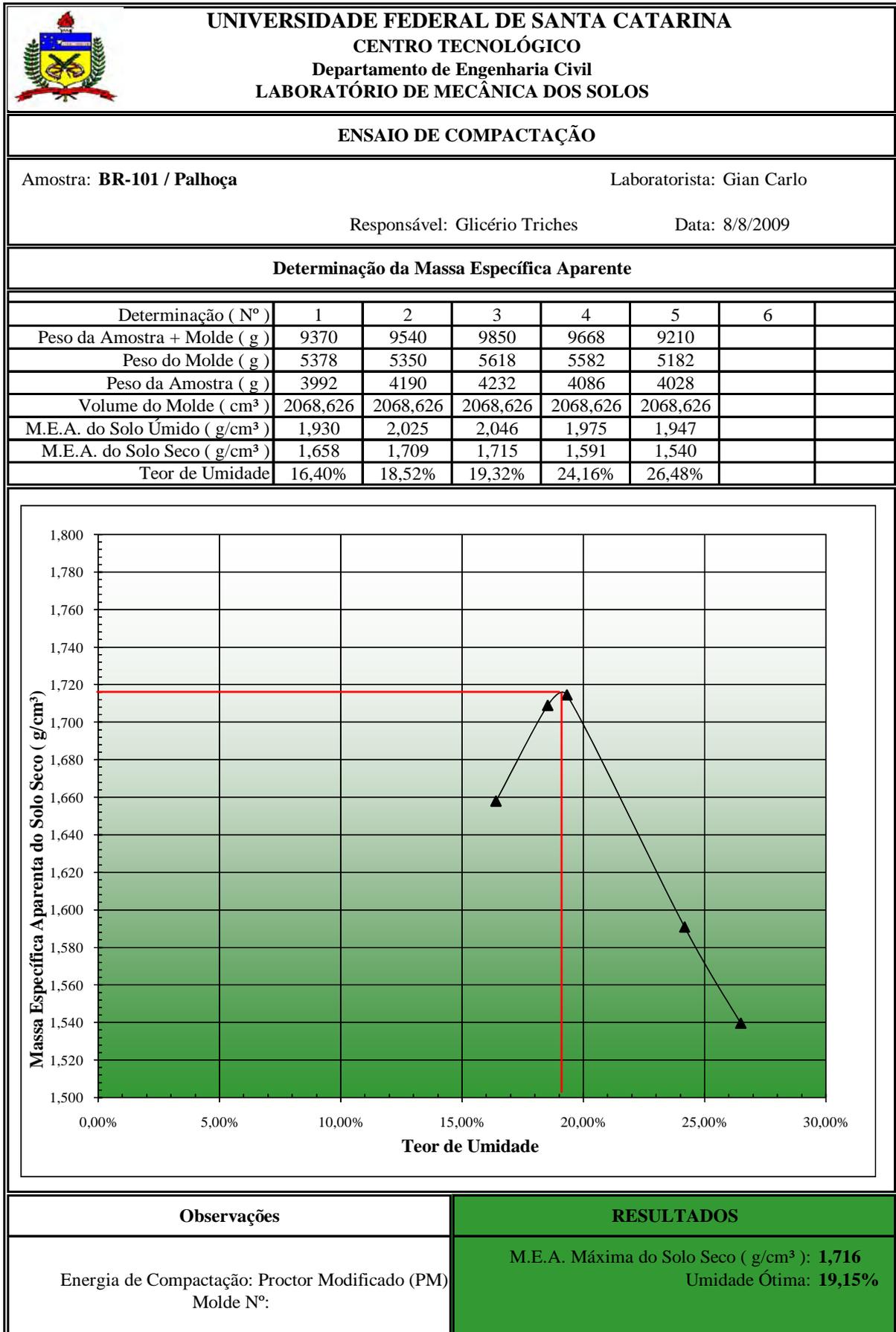


Gráfico 3.3 - Curva de Compactação do Solo

Com os resultados dos cinco corpos de prova, determinados para a obtenção da curva de compactação, executaram-se os procedimentos do ME 049-94, descritos no **Anexo A**, para definir a expansão e o CBR de cada CP.

Para a determinação da expansão segundo o método de ensaio, colocou-se no espaço deixado pelo disco espaçador, uma haste de expansão com pesos anelares que equivalem aproximadamente ao peso do pavimento sobre o subleito. Adaptou-se nesta haste, um extensômetro fixo ao tripé porta-extensômetro, e imergindo os corpos de prova em água durante quatro dias, foram feitas leituras de 24 em 24 horas. Estes procedimentos estão registrados nas **Fotos 3.1 e 3.2**.



Foto 3.1 - Ensaio de Expansão



Foto 3.2 - Extensômetro - Leitura no tempo $t = 0$

No intervalo de gráfico entre o 3.4 e 3.8, serão mostrados os resultados da expansão para cada corpo de prova:

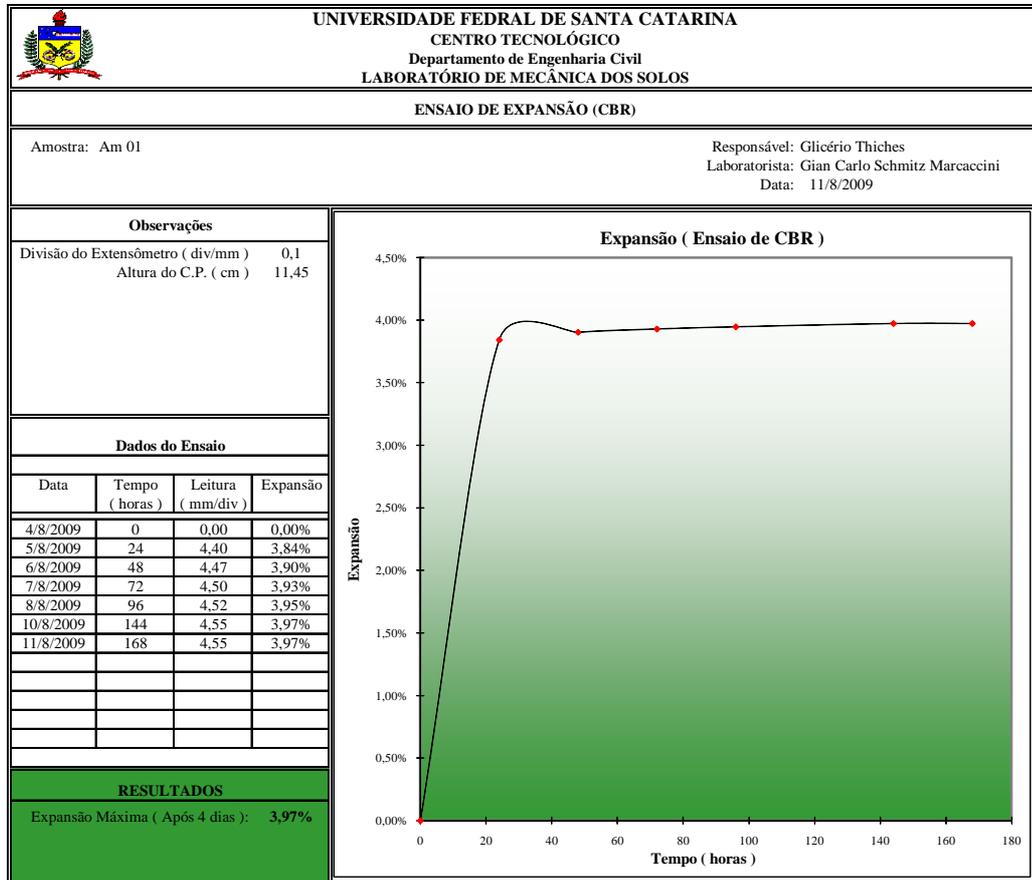


Gráfico 3.4 - Curva de expansão (CP-01 – solo no ramo seco)

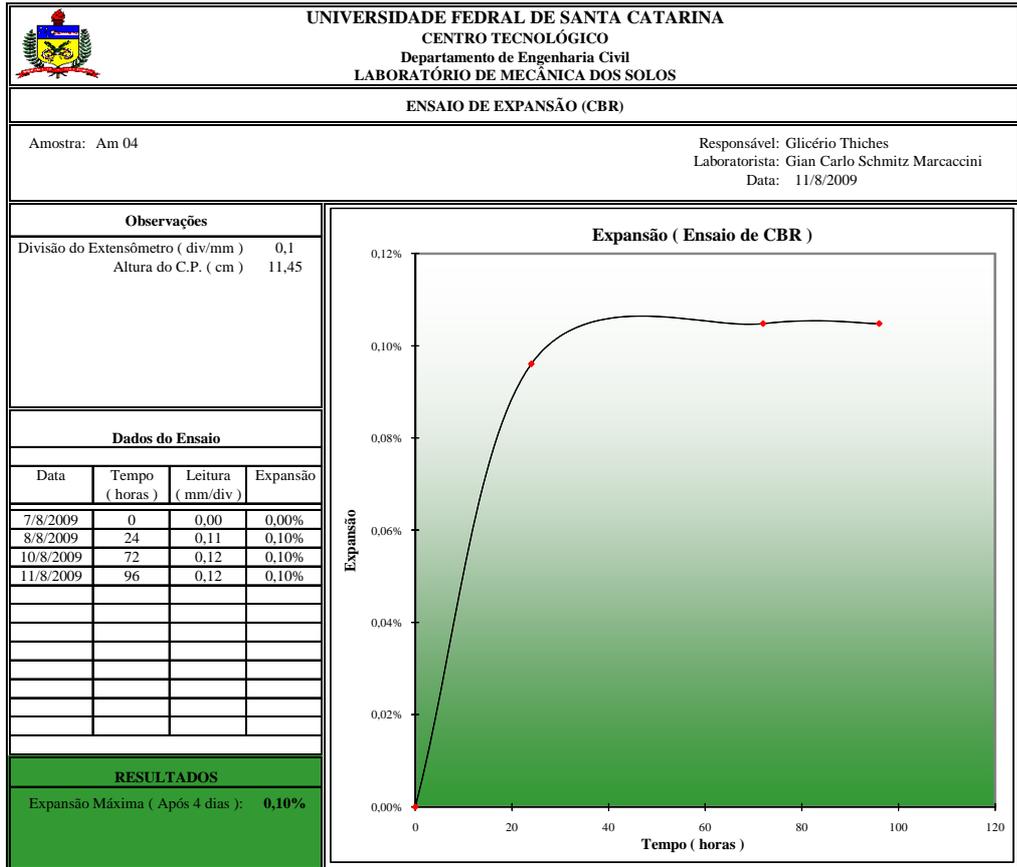


Gráfico 3.7 - Curva de expansão (CP-04 – solo no ramo úmido)

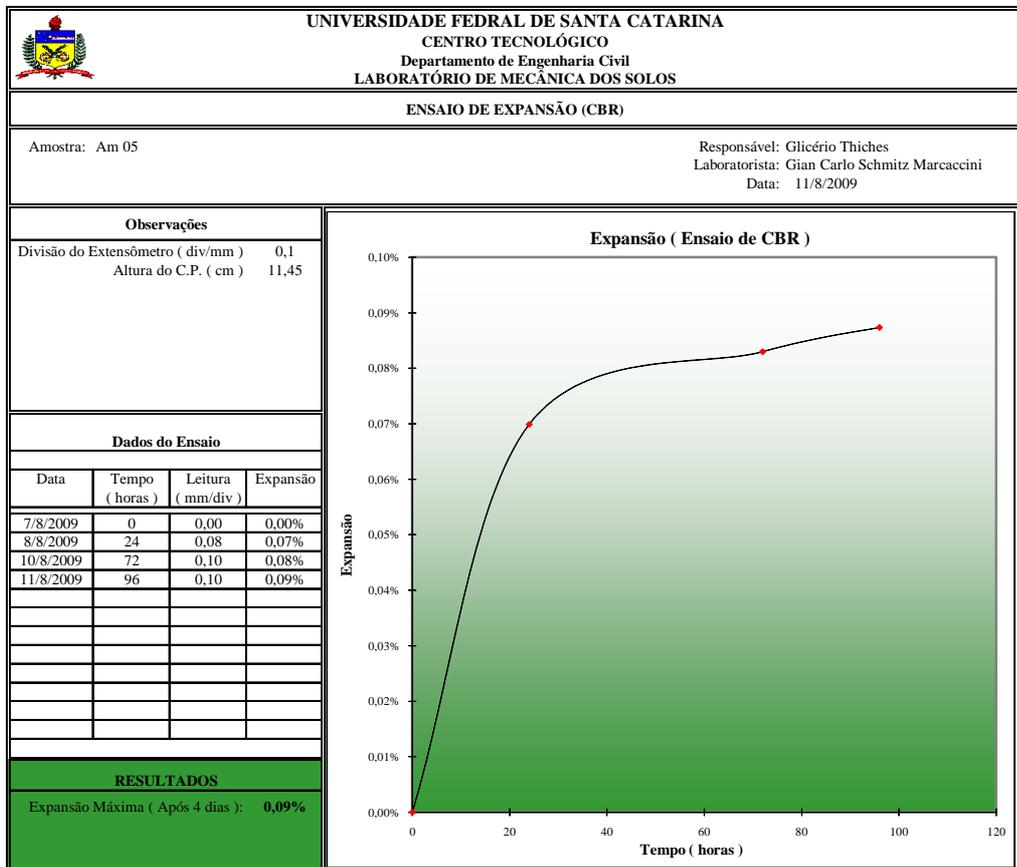


Gráfico 3.8 - Curva de expansão (CP-05 – solo acima da umidade ótima)

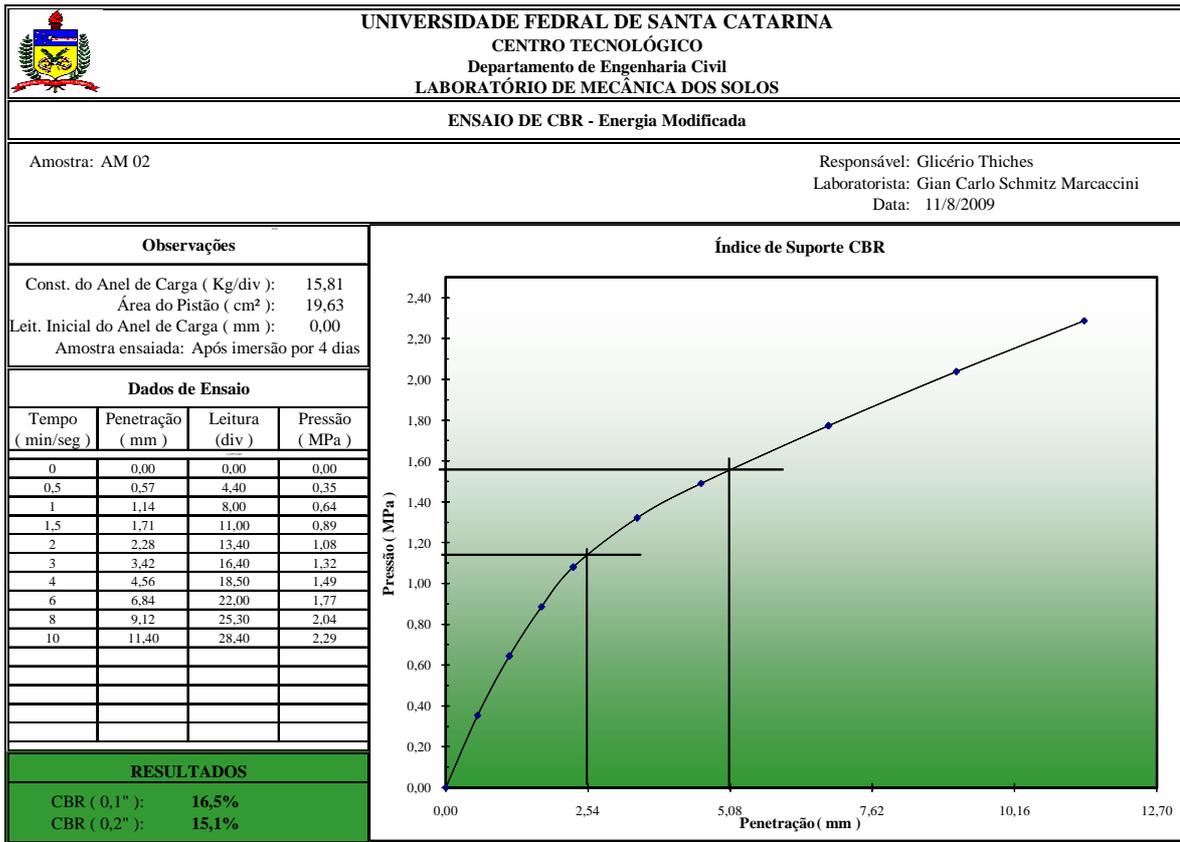


Gráfico 3.10 - Ensaio de CBR (CP-02 - solo)

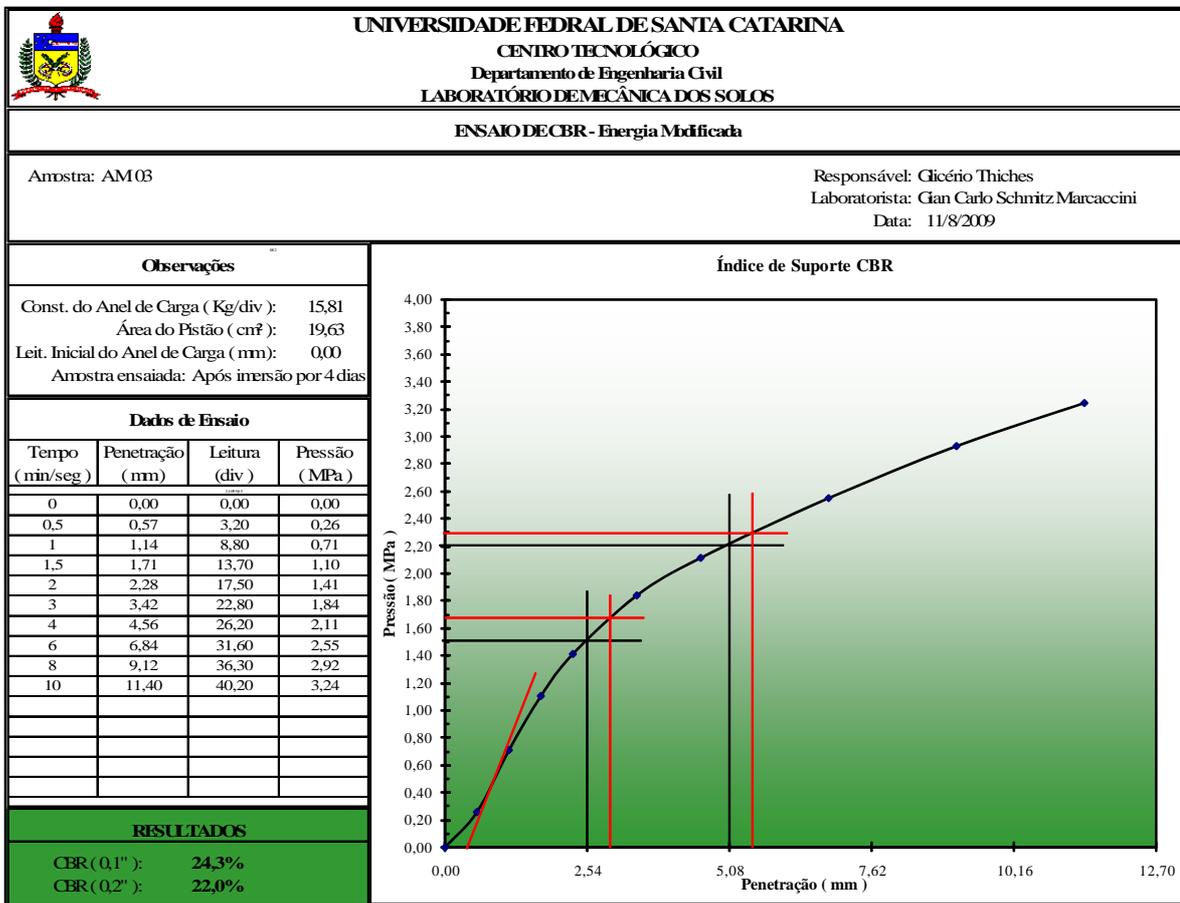


Gráfico 3.11 - Ensaio de CBR (CP-03 – solo nas condições de umidade ótima)

Sabendo que o valor de CBR para cada CP é o maior obtido entre as penetrações de 0,1 e 0,2 polegadas, montou-se o **Gráfico 3.14**, que mostra o CBR em função do teor de umidade do material.

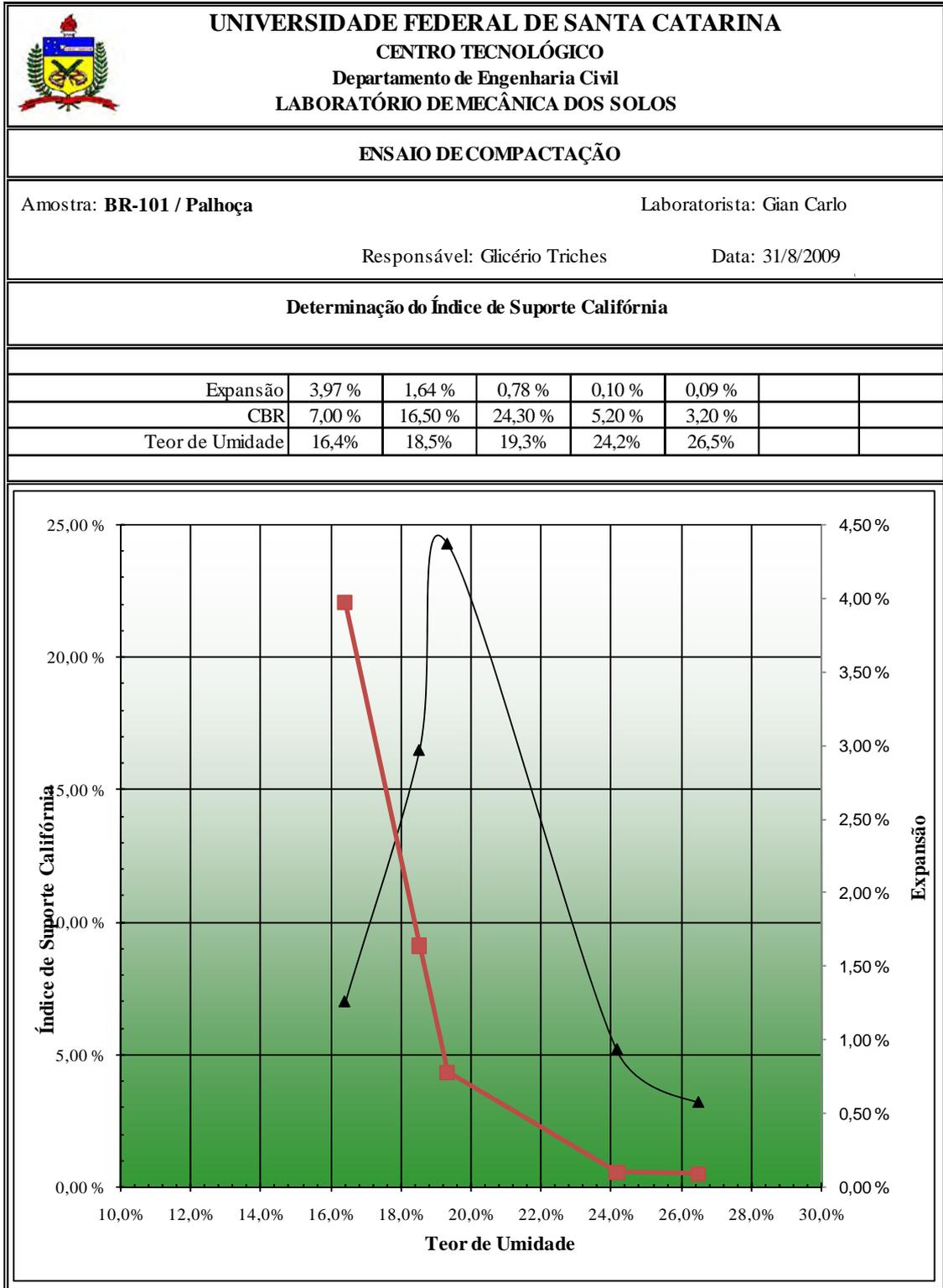


Gráfico 3.14 - Curva CBR x h para o Solo

Pela curva demonstrada no **Gráfico 3.14**, pode ser visto claramente um ponto de inflexão, é neste ponto que se tem representado o CBR que o material pode atingir, e sua respectiva úmida, que recebe o nome neste caso, de úmida ótima. Assim sendo, estes dois dados são respectivamente, 24,5% e 19%.

3.3.2 Escória de aciaria - Acerita®

A escória utilizada neste estudo é oriunda da ArcelorMittal Tubarão, localizada na região da Grande Vitória, no município de Serra – Espírito Santo. Como este material fica exposto ao ambiente para tratamento de redução da sua expansão, está sujeito a intempéries. Pude notar este fato quando começaram os ensaios, pois a amostra estava com grande umidade quando a recebi, isto devido à grande quantidade de chuva no dia da coleta. Então, para dar início aos ensaios, precisou-se colocar a amostra em estufa para secá-la, adotando assim, que a mesma estava com umidade aproximadamente zero devido à constância na pesagem, para a condução dos ensaios.

Um fato que precisou ser levado em conta no momento da umidificação da escória foi seu tempo de absorção de água, resultando assim a necessidade desta ser executada em câmara úmida, durante 24 horas. Se não procedesse desta maneira, o material não teria como absorver toda a água no espaço de tempo entre a homogenização e a compactação. Passado este tempo para umidificação, a escória foi então submetida aos ensaios para determinação de massa específica aparente seca e CBR, assim como o solo no item 3.3.1. Com o ensaio descrito no **Anexo B** executado, os dados foram colocados em planilha, seguindo o memorial de cálculo do mesmo método de ensaio, e formulou-se o **Gráfico 3.15** para determinar a M.E.A..

A **Tabela 3.5** demonstra os resultados obtidos após granulometria da escória, nota-se que a granulometria da escória não está de acordo com a Faixa “C” do DNIT. O peneiramento foi realizado de forma manual e mecanizado, como mostram as **Fotos 3.3** e **3.4**, respectivamente. E como resultado deste peneiramento é apresentado na **Foto 3.5**.

Tabela 3.5 - Análise granulométrica da Escória de Aciaria

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA											
CENTRO TECNOLÓGICO											
Departamento de Engenharia Civil											
LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS											
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA											
Amostra: Escória de Aciaria						Laboratorista: Gian Carlo Responsável: Glicério Triches Data: ago-09					
UMIDADE HIGROSCÓPICA											
		AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		AMOSTRA TOTAL SECA (g)					
CÁPSULA nº		15		15		AMOSTRA ÚMIDA 1450 Mt (massa da amostra seca ao ar)					
CÁPSULA + SOLOS ÚMIDO (g)		93,40		93,40		Ps RETIDO #10 0					
CÁPSULA + SOLO SECO (g)		88,90		88,90		PASSANTE #10 ÚMIDA 1450					
ÁGUA		4,50		4,50		PASSANTE #10 SECA 1.367,30					
CÁPSULA (g)		14,50		14,50		PESO DA ÁGUA 82,70					
SOLO SECO		74,40		74,40		AMOSTRA TOTAL SECA 1.367,30					
TEOR DE UMIDADE h		6,05%		6,05%		Ph(Cápsula) 105,2 Mh sedimentação					
UMIDADE MÉDIA		6,05%									
PENEIRAMENTO	GROSSO	PENEIRAS		PESO PEN.	PE + MATE	MAT. RET.	PORCENTAGEM RETIDA			PORCENTAGEM PAS.	
		Nº	mm	(g)	(g)	(g)	AMOS. PAR	AMOS.TO.	ACUMUL.	AMOS.PAR.	AMOS.TO.
		3"	76,2			0		0,00%	0,00%		100,00%
		2"	50,8			0		0,00%	0,00%		100,00%
		1,5	38,1			0		0,00%	0,00%		100,00%
		1"	25,4			0		0,00%	0,00%		100,00%
		3/4"	19,1			0		0,00%	0,00%		100,00%
		3/8"	9,5	840,7	1356	515,3		37,69%	37,69%		62,31%
		1/4"	6,4	583,6	840,7	257,1		18,80%	56,49%		43,51%
		4	4,8	533,8	583,6	49,8		3,64%	60,13%		39,87%
	8	2,4	432,2	533,8	101,6		7,43%	67,56%		32,44%	
	10	2	336,3	432,2	95,9		7,01%	74,58%		25,42%	
	FINO	16	1,19	632,2	647,3	15,1	15,22%		15,22%	84,78%	21,55%
		30	0,59	622,4	632,2	9,8	9,88%		25,10%	74,90%	19,04%
		40	0,42	599,4	622,4	23	23,19%		48,29%	51,71%	13,15%
		50	0,3	582,6	599,4	16,8	16,94%		65,22%	34,78%	8,84%
		70	0,21	578,3	582,6	4,3	4,33%		69,56%	30,44%	7,74%
		100	0,15	569,3	578,3	9	9,07%		78,63%	21,37%	5,43%
		200	0,074	555,9	569,3	13,4	13,51%		92,14%	7,86%	2,00%

Segundo dados cedidos pela empresa ÚNICA Consultores de Engenharia Urbana, a Escória de Aciaria tem valor de abrasão Los Angeles aproximadamente igual a 17%, e sua densidade real é de 3,283.



Foto 3.3 - Peneiramento manual



Foto 3.4 - Peneiramento mecanizado

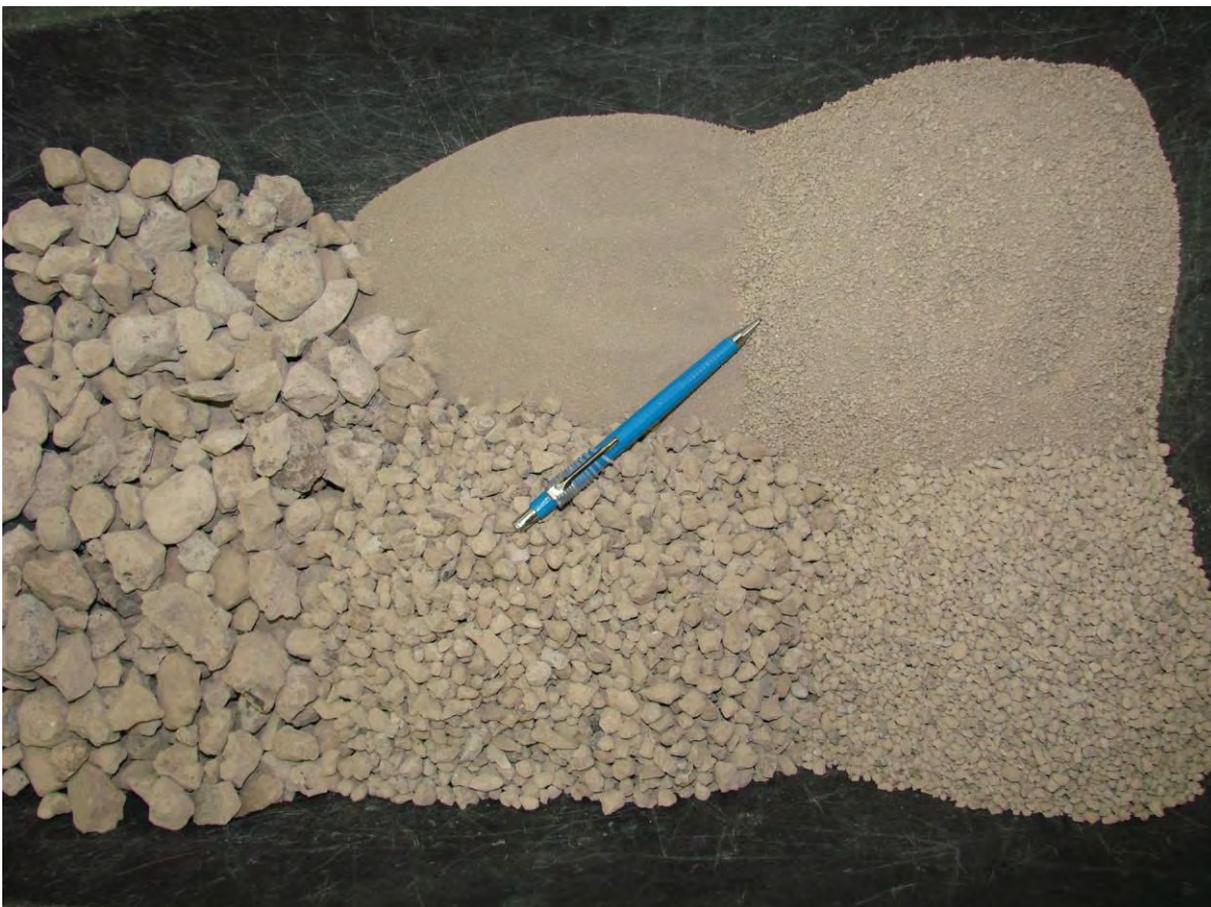


Foto 3.5 - Escória de aciaria peneirada

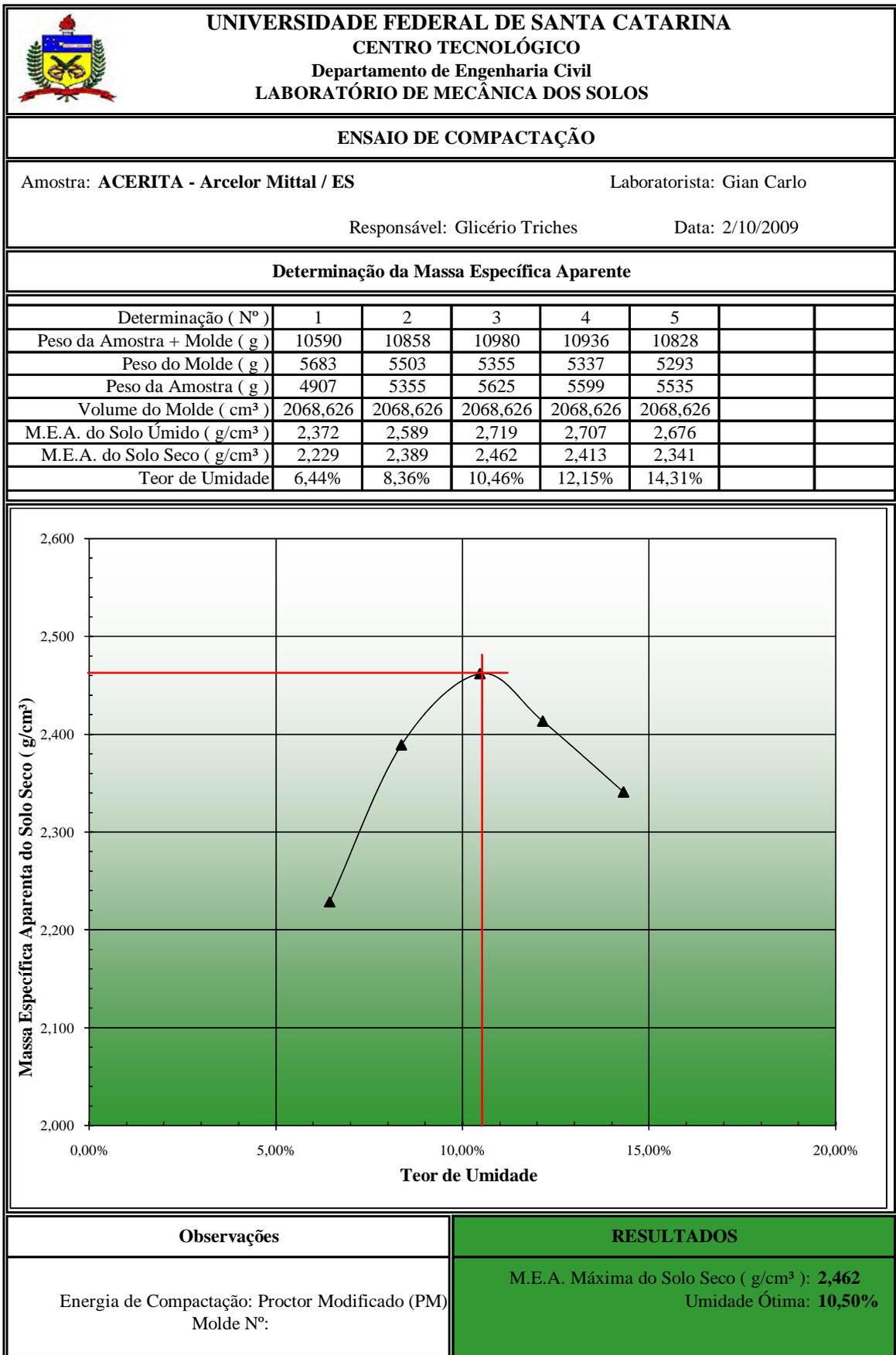


Gráfico 3.15 - Curva de compactação da Escória de Aciaria

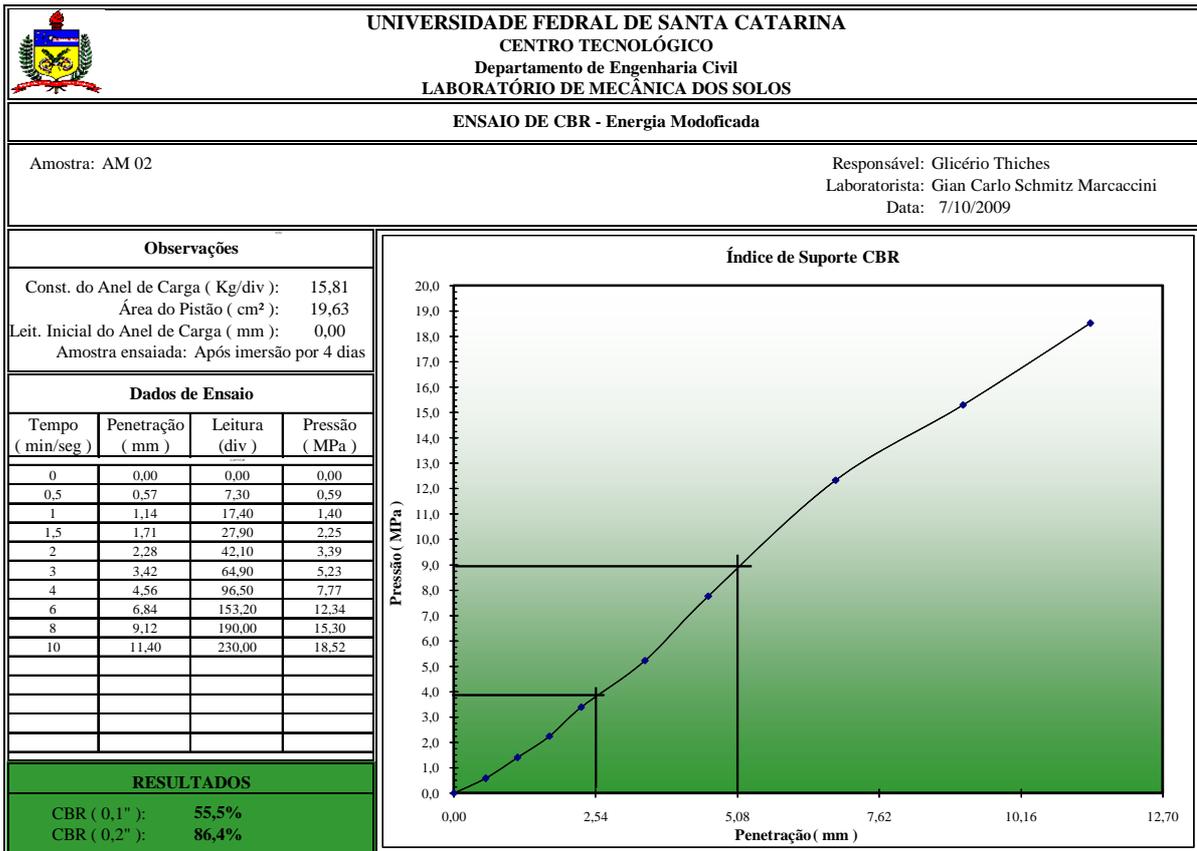


Gráfico 3.17 - Ensaio de CBR (CP-02 – Escória de Aciaria)

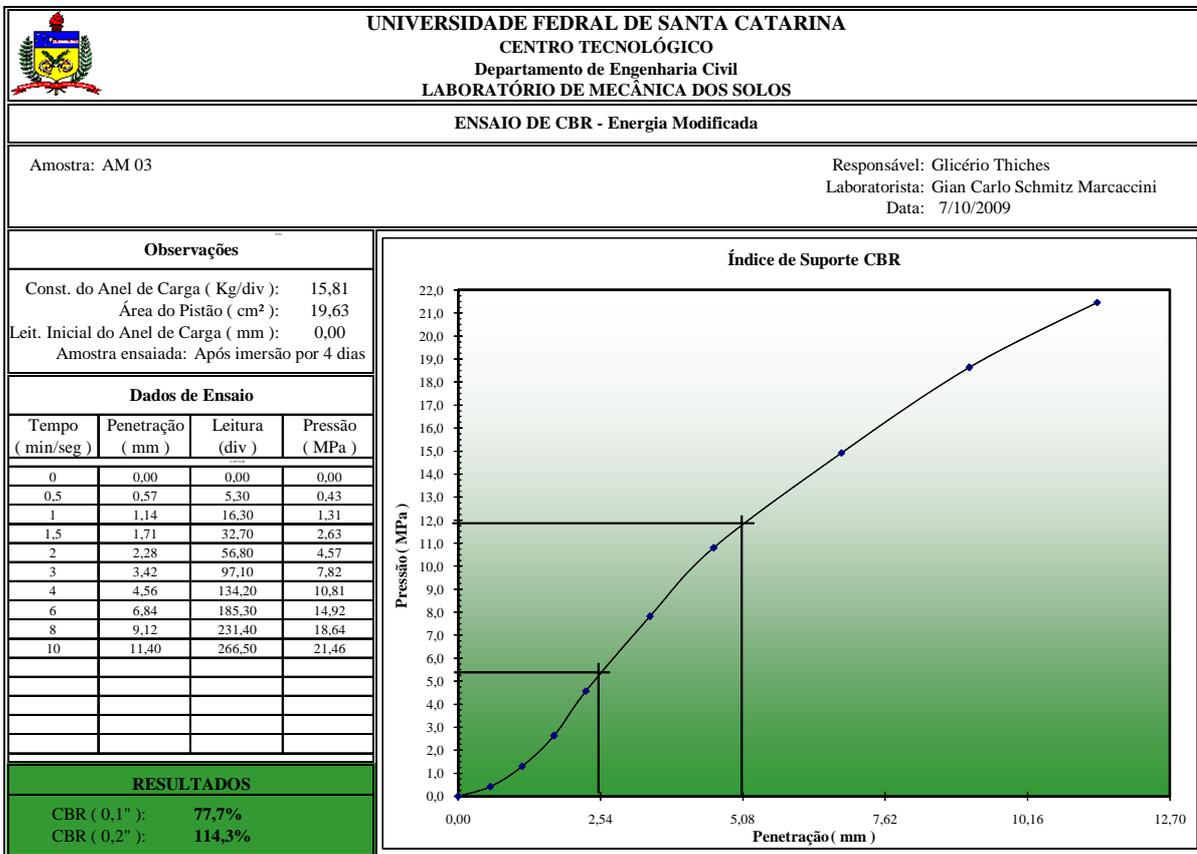


Gráfico 3.18 - Ensaio de CBR (CP-03 – Escória de Aciaria nas condições de umidade ótima)

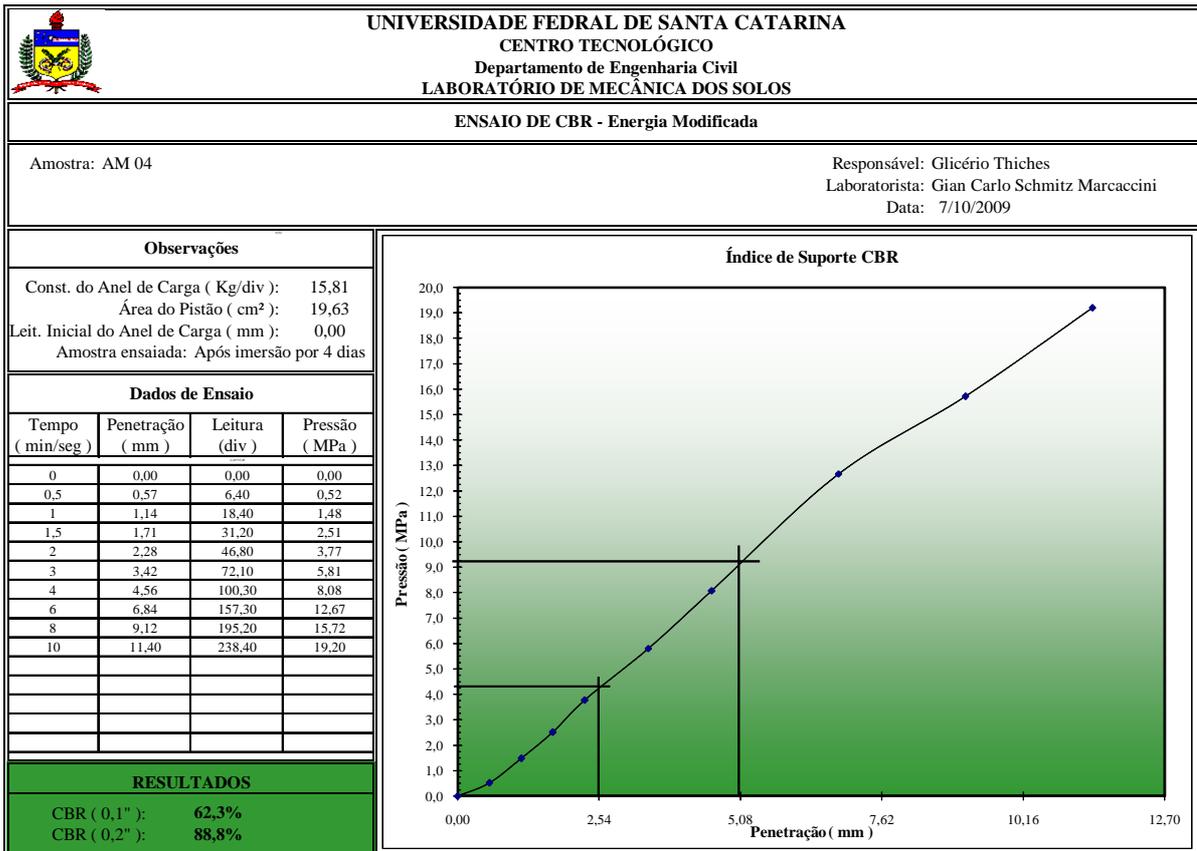


Gráfico 3.19 - Ensaio de CBR (CP-04 – Escória de Aciaria)

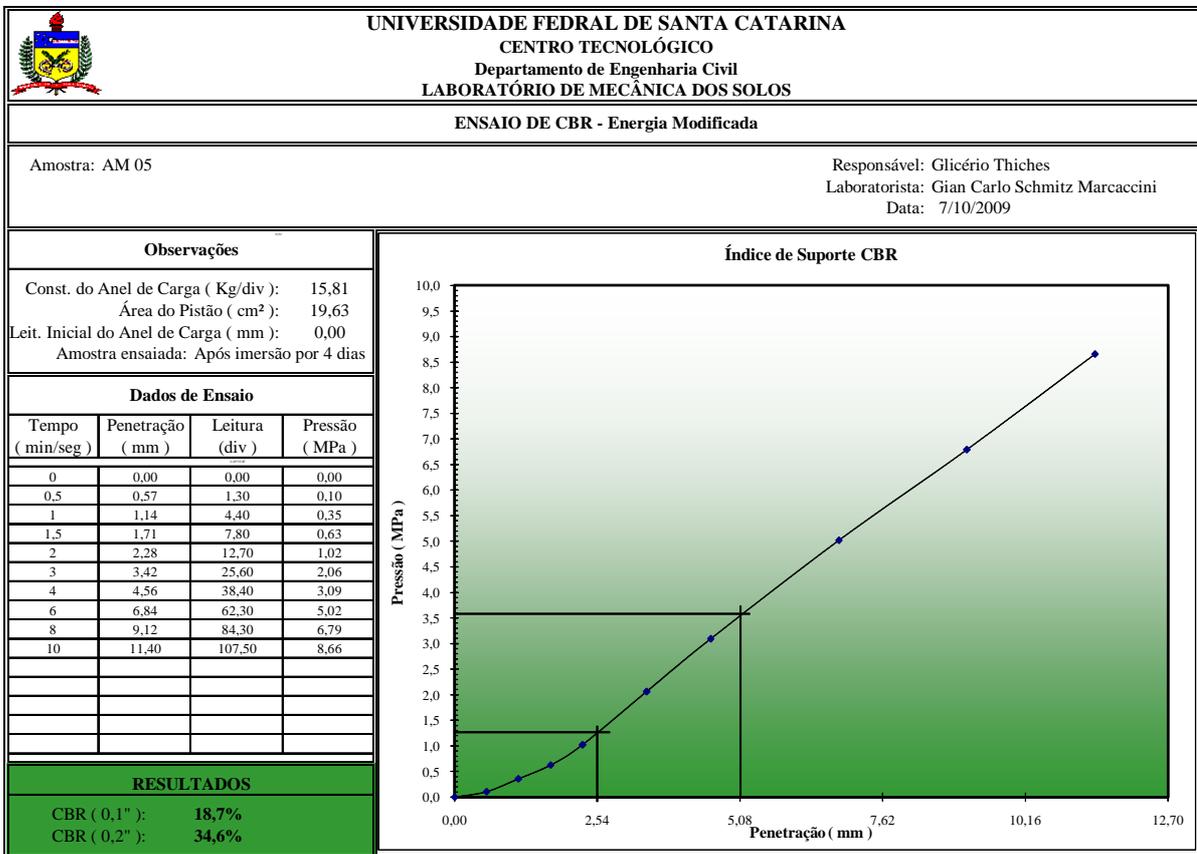


Gráfico 3.20 - Ensaio de CBR (CP-05 – Escória de Aciaria)

O **Gráfico 3.21** foi preparado com os dados obtidos nos cinco que o antecederam, usando como critérios para determinar o CBR à determinada umidade, o maior valor na penetração de 0,1 e 0,2 polegadas, conforme a norma contida no **Anexo A**. Observando-se a curva, vê-se que seu ponto de inflexão ocorre ao redor da umidade ótima, portanto, os valores do CBR e da umidade ótima são respectivamente, 114% e 10,8%.

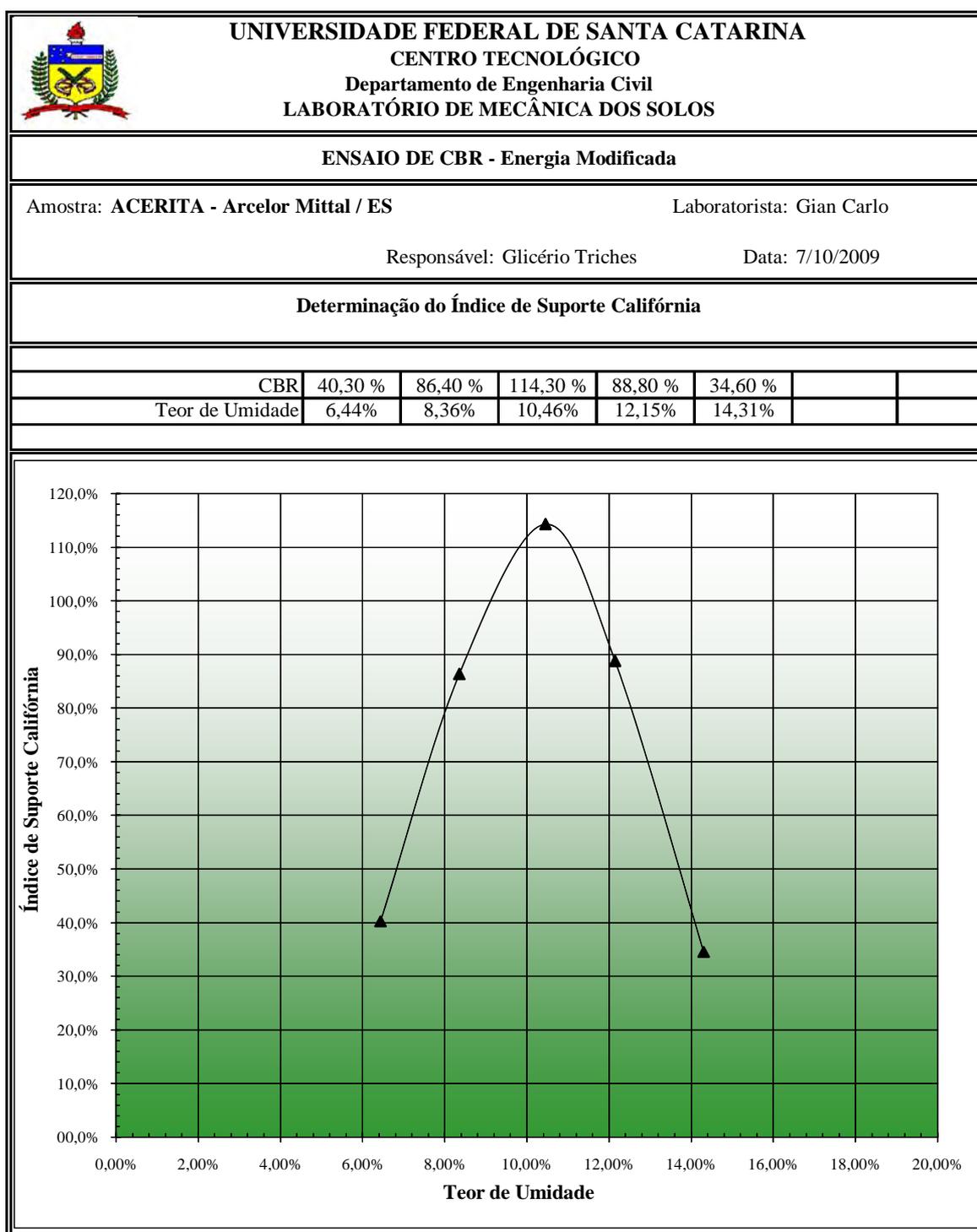


Gráfico 3.21 - Curva CBR x h para a Escória de Aciaria

3.3.3 Mistura escória de aciaria – solo

Inicialmente, pensou-se em realizar a mistura Escória de aciaria e solo, em proporções de 70 e 30%, respectivamente. Porém, como a granulometria do solo é fina, se fosse colocada esta porção do mesmo, a mistura não se encaixaria na Faixa “C” do DNIT. Com isto, resolveu-se fazer uma composição de 80 e 20%, conseguindo-se assim, atender a faixa determinada. Na **Tabela 3.6** está representada a quantidade, em gramas, de material que deve ser colocado por peneira para sete quilos de mistura, quantia esta, para moldar um corpo de prova do ensaio de compactação.

Tabela 3.6 – Composição granulométrica para mistura Escória/Solo

Mistura de Escória de Aciaria e Solo (Para 7kg de mistura)							
Peneira	Abertura (mm)	% pass. de Solo	20% de Solo	% pass. de Escória	80% de Escória	% pass. da mistura	Limite da Faixa "C" % passante
2"	50,8	100,0	20,0	100,0	80,0	100,0	100 - 100
1"	25,4	100,0	20,0	100,0	80,0	100,0	100 - 100
3/8"	9,5	100,0	20,0	62,3	49,8	69,8	50 - 85
Nº 4	4,76	99,9	20,0	39,8	31,8	51,8	35 - 65
Nº 10	2	96,5	19,3	25,4	20,3	39,6	25 - 50
Nº 40	0,425	82,5	16,5	13,1	10,5	27,0	15 - 30
Nº 200	0,075	65,3	13,1	2,0	1,6	14,7	5 - 15

Com a escória peneirada, separada conforme a **Tabela 3.6**, e o solo em massa igual à estabelecida pela mesma tabela, iniciou-se procedimentos para a determinação do CBR e massa específica aparente seca máxima. As **Fotos 3.6 e 3.7** ilustram a homogenização da mistura.



Foto 3.6 - Homogenização da mistura Escória/Solo



Foto 3.7 - Mistura homogenizada

Seguindo o ensaio, com a mistura homogenizada, preparou-se os corpos de prova conforme o ME-129-94. A compactação dos mesmos podem ser vista nas **Fotos 3.8 e 3.9**.

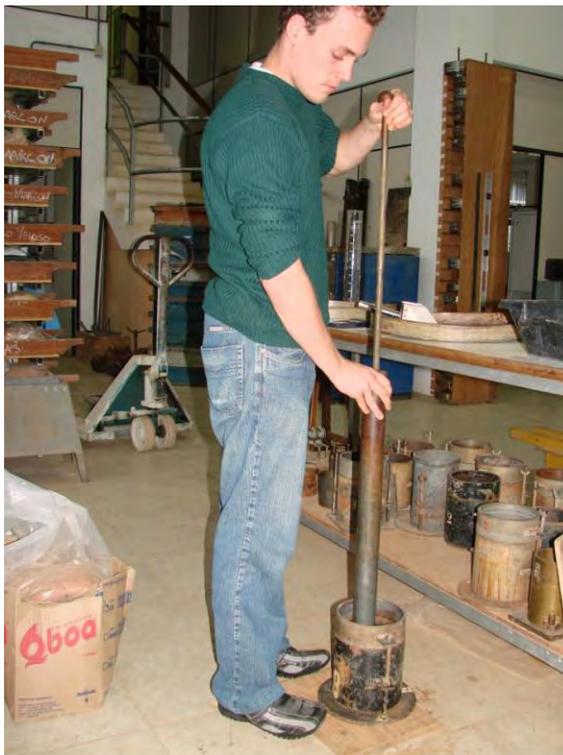


Foto 3.8 - Compactação do corpo de prova (01)



Foto 3.9 - Compactação do corpo de prova (02)

Com a compactação realizada e dados de entrada da planilha lidos, montou-se o **Gráfico 3.22**, e a partir do mesmo, percebeu-se que sua M.E.A. praticamente não variou comparando com a da escória de aciaria. Este fato pode ser explicado por haver uma melhor distribuição granulométrica quando é adicionado o solo.

Porém, fazendo a comparação entre a escória e a mistura deste item, notou-se que houve uma diminuição significativa quanto a sua umidade no ponto de maior M.E.A., passando de 10,5% para 7,6%. Houve esta diminuição porque a escória de aciaria não tem capacidade de absorção instantânea de água, ao contrário do solo. Então, se fosse adicionado água para toda a mistura, somente o solo iria absorver, deixando-o muito saturado, ou seja, diminuindo sua capacidade de suporte. Como no campo a adição de água é realizada num intervalo de tempo pequeno entre a mesma e a homogenização dos agregados, resolveu-se fazê-la em laboratório nestes mesmos padrões, correlacionando assim, os ensaios com o que será executado. Deve-se ressaltar que no campo a escória não está seca como em estufa, ela tem uma umidade de equilíbrio com o meio.

Os resultados obtidos, com referência ao mencionado nos dois parágrafos anteriores, podem ser visualizados no **Gráfico 3.22**.

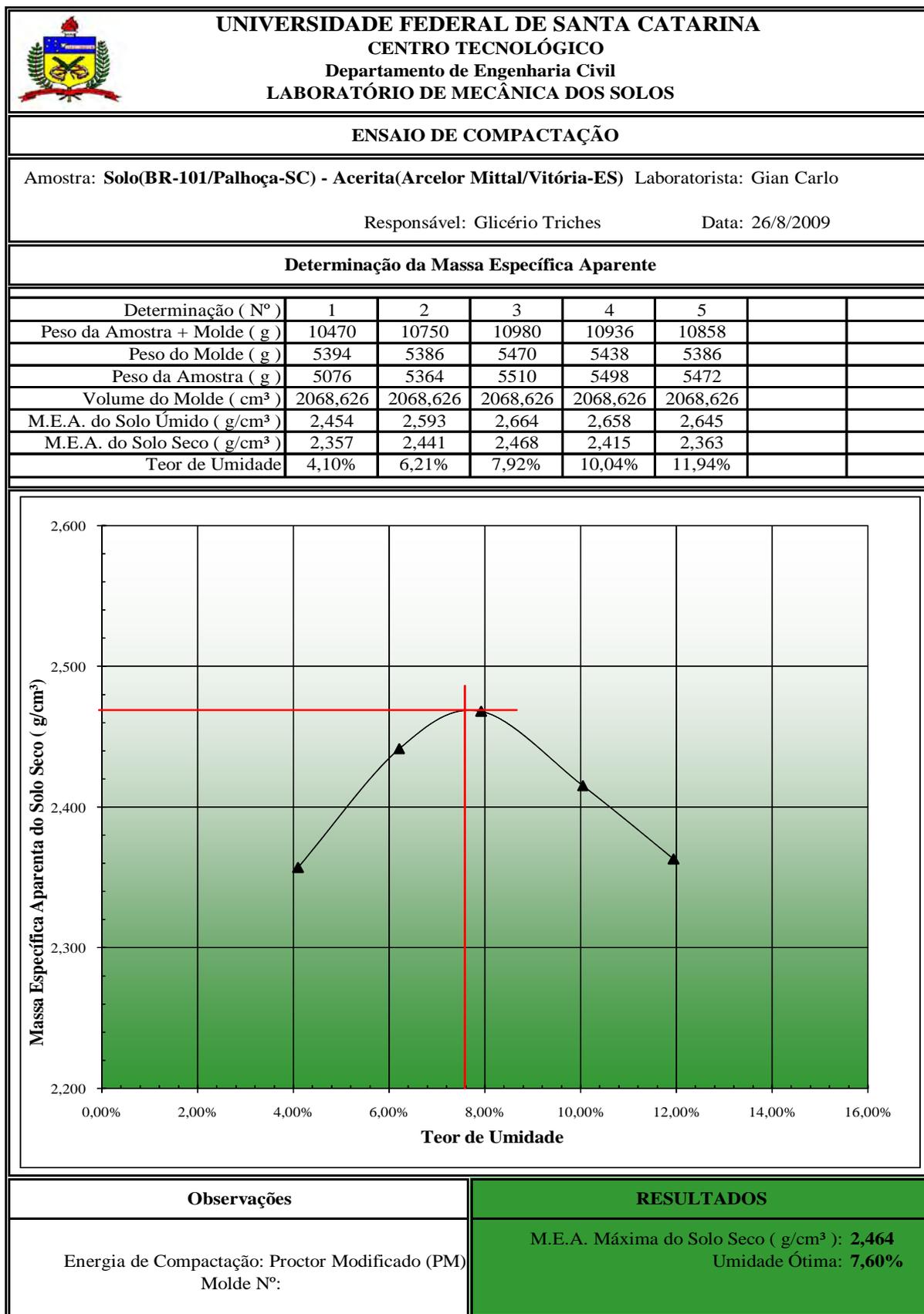
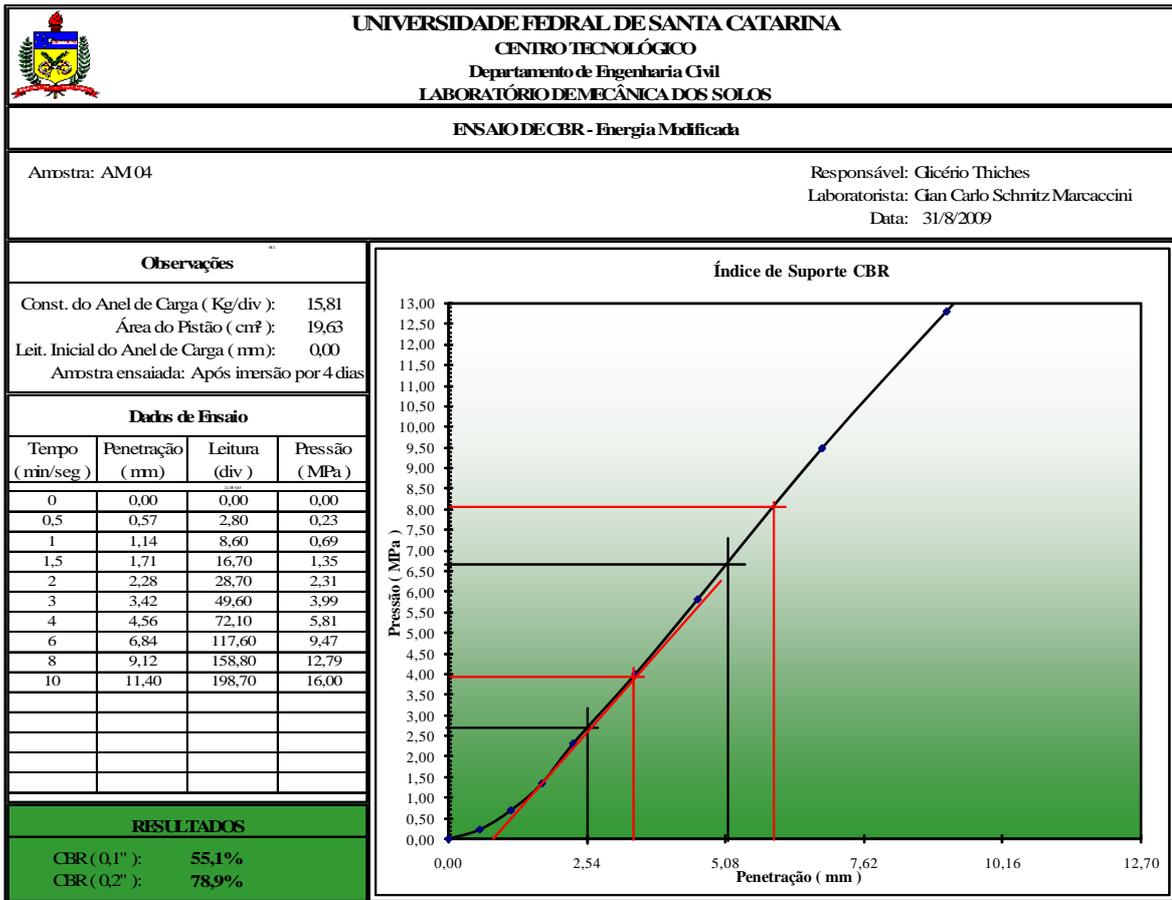


Gráfico 3.22 - Curva de compactação da Mistura Escória – Solo



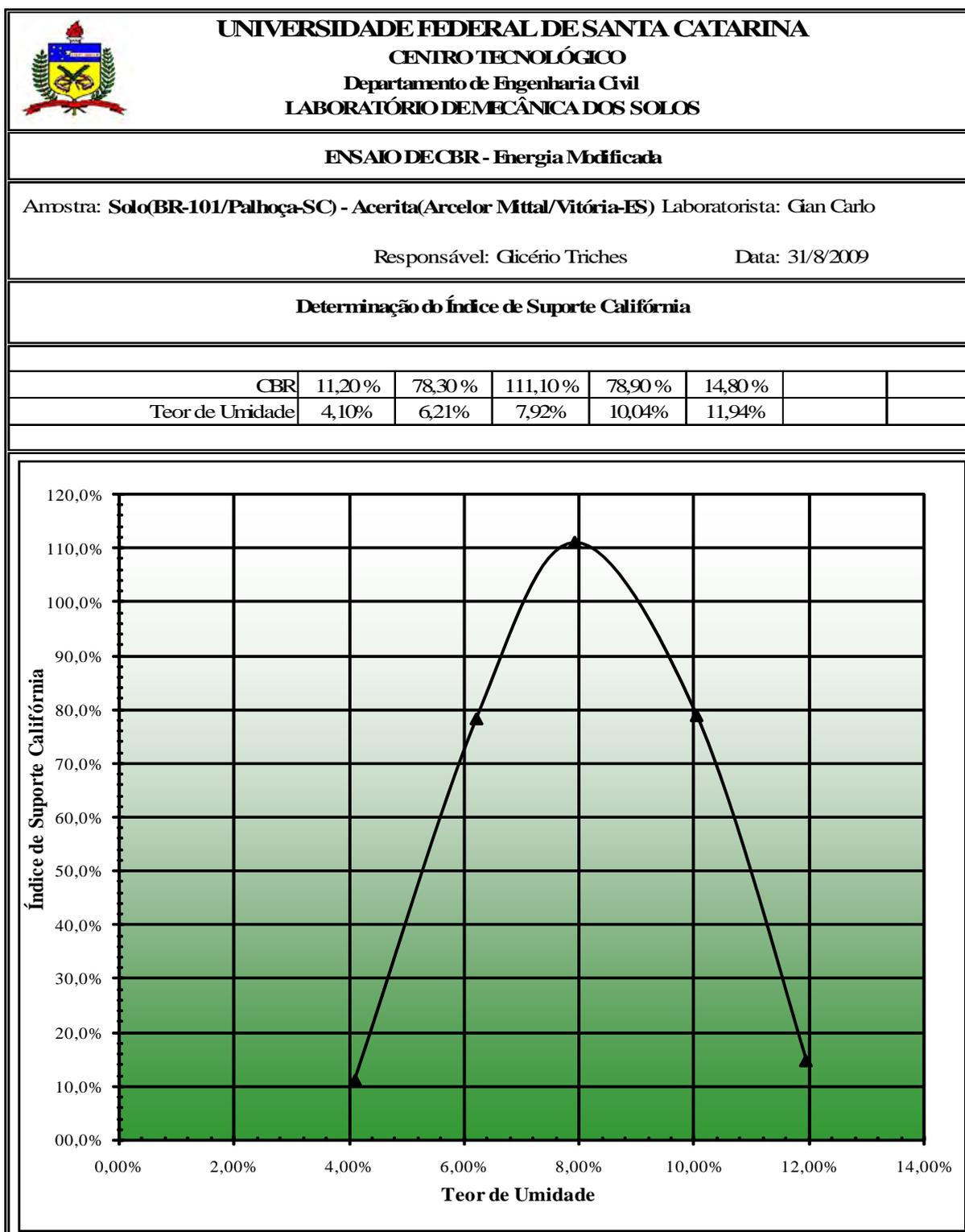


Gráfico 3.28 - Curva CBR x h para a Mistura Escória - Solo

A curva que representa o índice de suporte Califórnia para a mistura, apresentada no **Gráfico 3.28**, tem seu ápice para a umidade igual a 7,9%, sendo atingido o valor de CBR próximo a 110%. Assim, a mistura é apta para ser empregada em camada de base para pavimentação, pois apresenta CBR > 80% e expansão nula, como a ES 303-97 recomenda para tal camada.

As **Fotos** de **3.10** e **3.11** ilustram o aspecto dos corpos de prova após a determinação do CBR.



Foto 3.10 - Corpos de prova após ensaios



Foto 3.11 - Corpo de prova - Mistura Escória de Aciaria e Solo

3.3.4 Mistura brita graduada/solo

Quando se obteve a brita graduada, a mesma estava espalhada na pedreira por montes de granulometrias diferentes, portanto, a mesma não tinha uma curva granulométrica definida, sendo assim, a mesma foi peneirada nas malhas definidas pela Faixa “C” do DNIT. Para preparar um corpo de prova de 7.000 kg com a mistura, iniciou-se o processo com o solo, como já se conhecia a granulometria do mesmo (que representa 20% da mistura), pesou-se 1.400 kg dele, e efetuou-se a complementação com brita graduada até a mistura atingir o centro da Faixa “C”. Isto pode ser visualizado na **Tabela 3.7**. Segundo a pedreira que cedeu a brita, a densidade real deste agregado é de 2,73.

Tabela 3.7 - Composição granulométrica para mistura Brita Graduada/Solo

Mistura Brita Graduada/Solo (Para 7 kg de mistura)				
Peneira	Faixa "C" (DNIT) % passante	Mistura % passante	20% de Solo (g)	80% de Brita Graduada (g)
1"	100	100		2275,0
3/8"	67,5	67,5		1225,0
N° 4	50	50	46,5	828,5
N° 10	37,5	37,5	196,3	853,7
N° 40	22,5	22,5	241,4	417,8
N° 200	10	13	915,9	
			Solo = 1400,0 g	Brita Graduada = 5600,0 g
			Mistura = 7000,0 g	

Usando os mesmo procedimentos para obtenção da mistura Escória de aciaria/Solo, foram moldados os corpos de prova para a mistura Brita Graduada/Solo. Foram obtidos os mesmos gráficos, como para as três composições determinações anteriores (solo, Escória e Escória/Solo). O **Gráfico 3.29** mostra a curva de compactação da mistura Brita graduada/Solo.

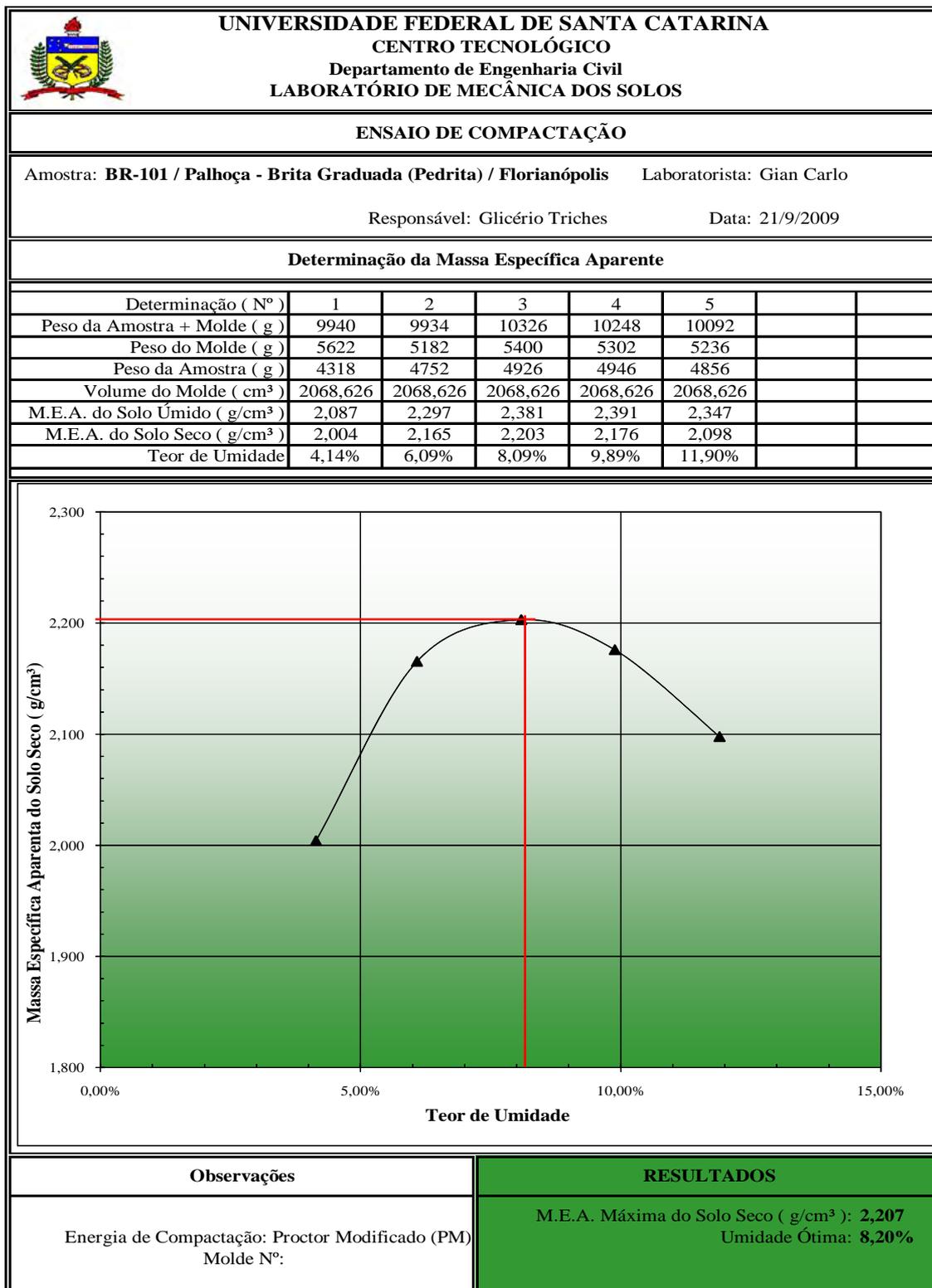


Gráfico 3.29- Curva de compactação da Mistura Brita Graduada/Solo

Com relação ao **Gráfico 3.29**, vê-se que sua massa específica aparente máxima atingiu o valor de 2,207 g/cm³, quando sua umidade está por volta de 8,20%. Assim como a mistura

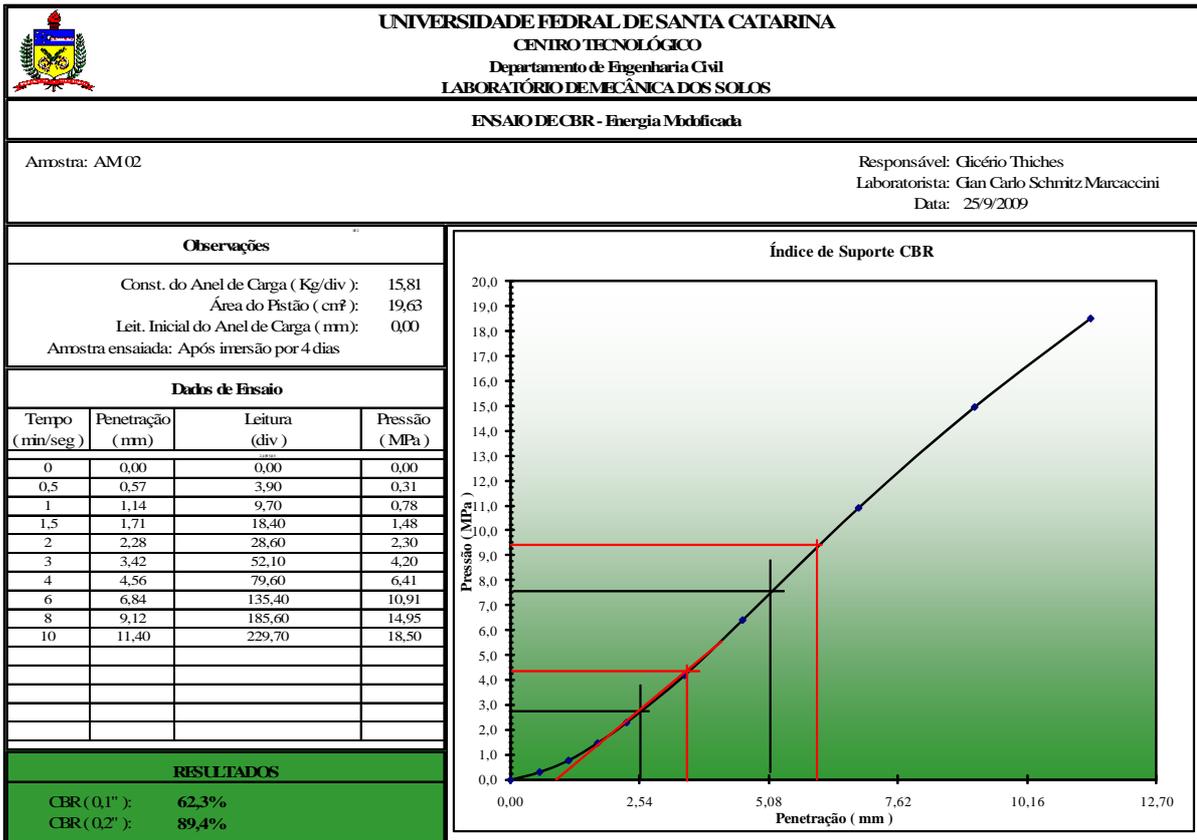


Gráfico 3.31 - Ensaio de CBR (CP-02 – Brita graduada/Solo)

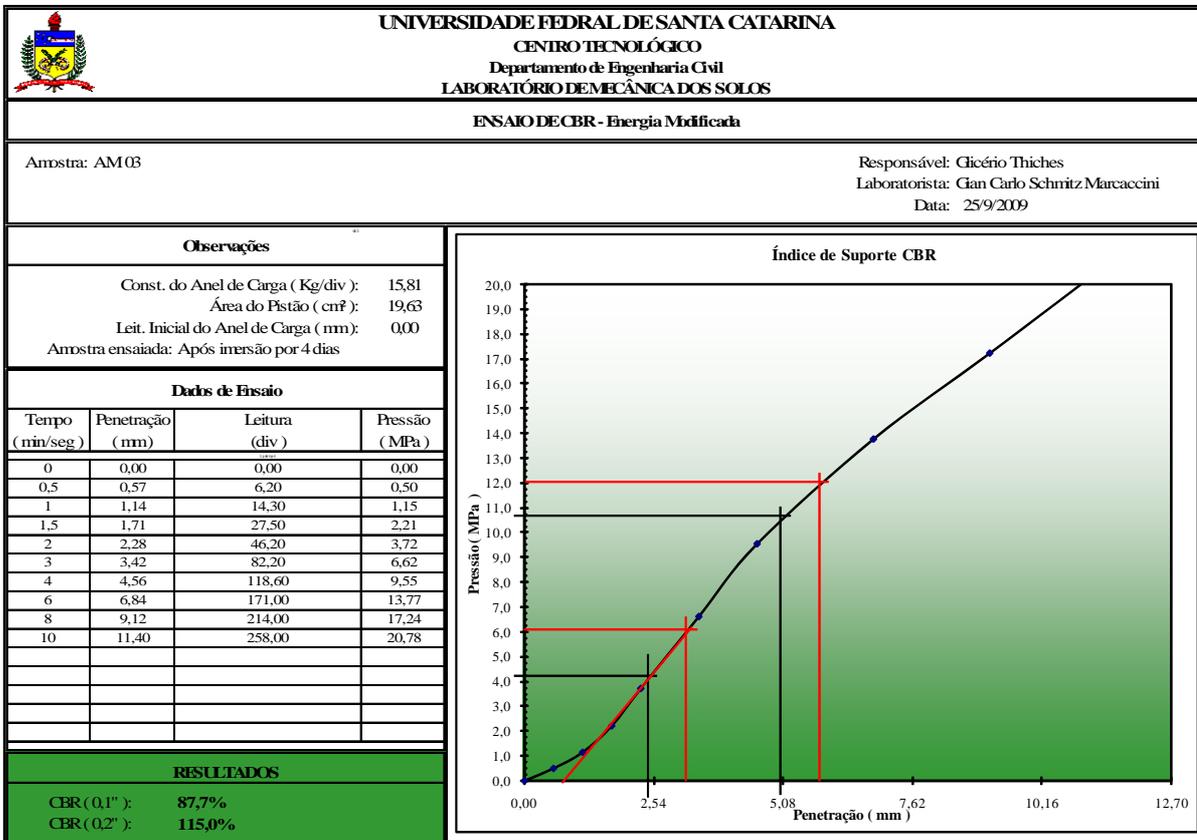


Gráfico 3.32 - Ensaio de CBR (CP-03 – Brita graduada/Solo nas condições de umidade ótima)

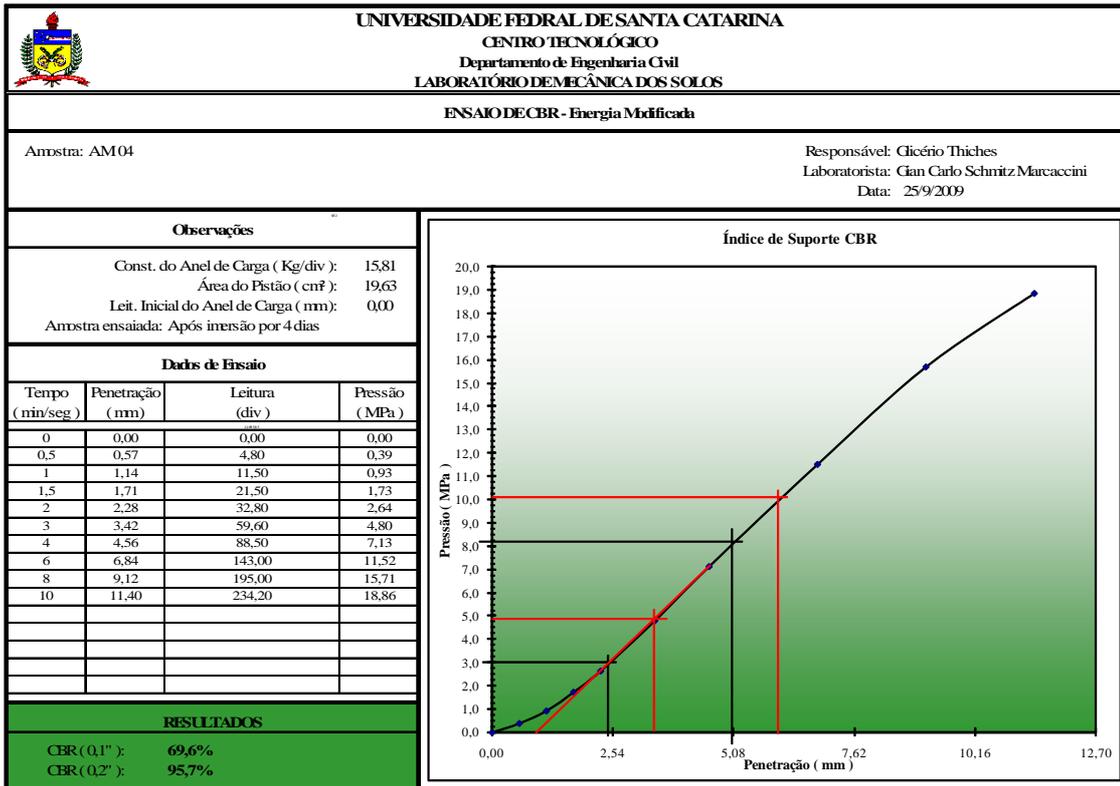


Gráfico 3.33 - Ensaio de CBR (CP-04 – Brita graduada/Solo)

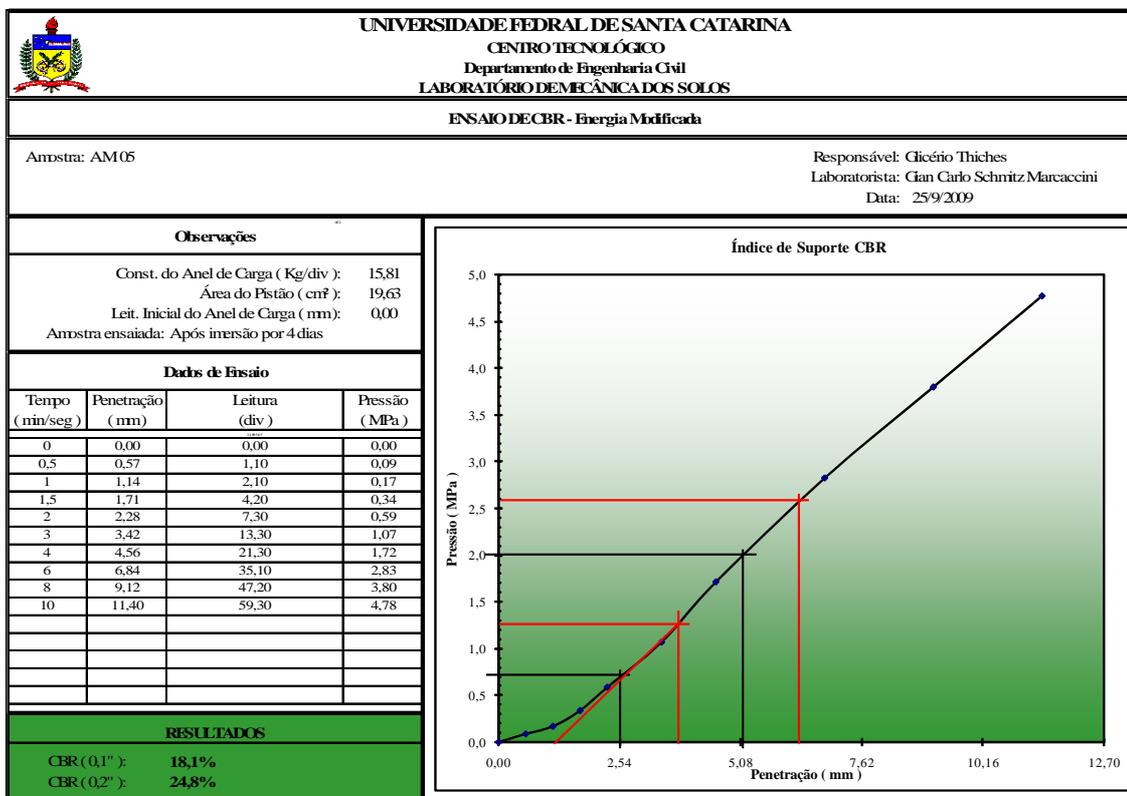


Gráfico 3.34 - Ensaio de CBR (CP-05 – Brita graduada/Solo)

Com os cinco gráficos anteriores, montou-se o **Gráfico 3.35**, com o intuito de simular a curva que representa o índice de suporte Califórnia para a mistura Brita Graduada e Solo. Nota-se

que este gráfico tem seu ápice para a umidade igual a 8,2%, sendo atingido o valor de CBR próximo a 115%. Estando assim, admissível para camada de base para pavimentação, pois é superior a 80%, como a ES 303-97 recomenda para tal camada.

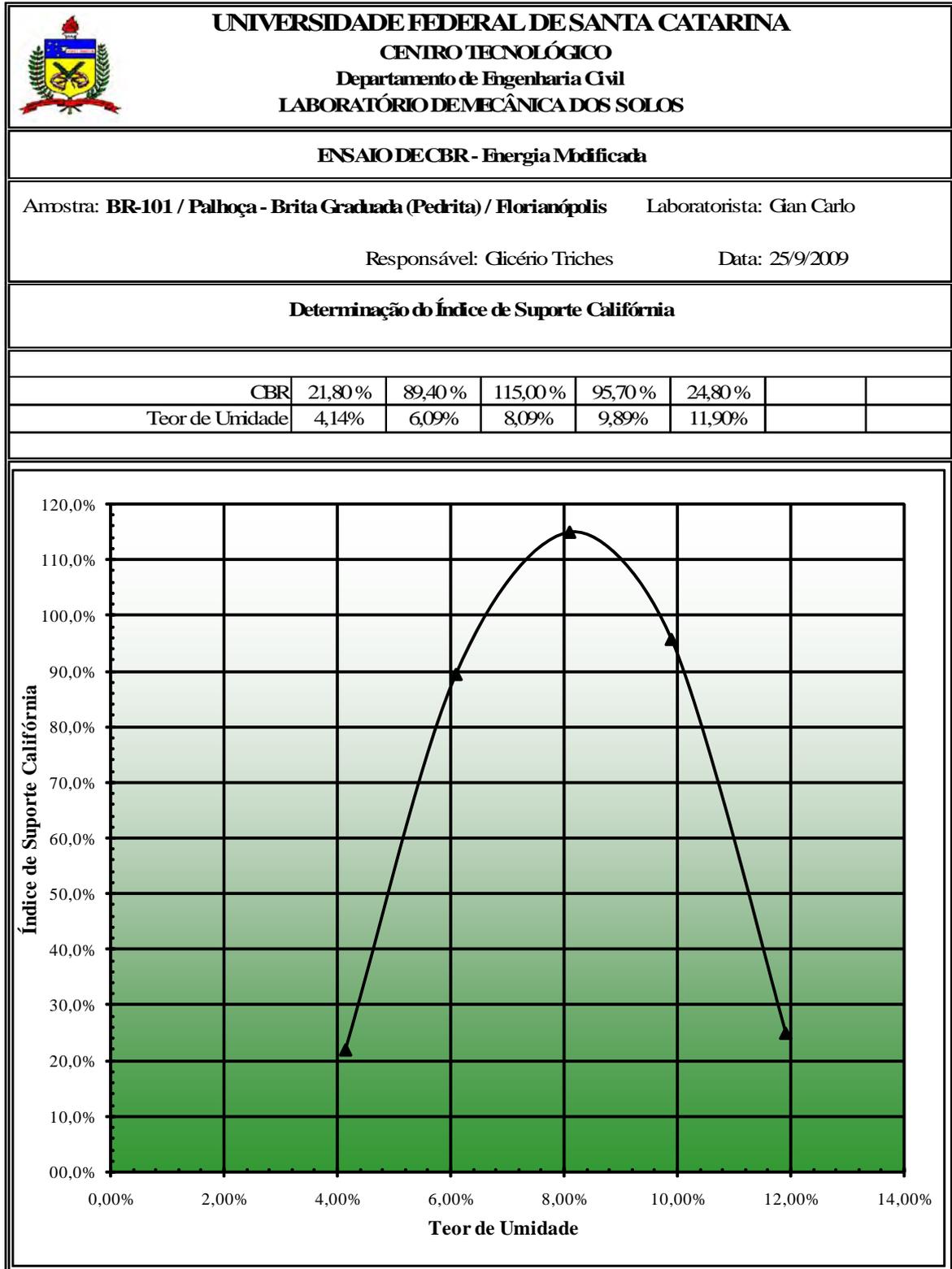


Gráfico 3.35 - Curva CBR x h para a Mistura Brita Graduada - Solo

3.4 Ensaios Triaxiais Dinâmicos

Quando se realiza ensaios em laboratórios, o conveniente é sempre procurar a melhor técnica para relacionar este, com o que acontecerá à amostra durante a operação da rodovia. Falando em camadas sob o pavimento, as cargas que agem nas mesmas são em sua grande maioria, transitórias. Ou seja, veículos passando sobre o pavimento causam carregamentos cíclicos sobre ele. Ensaios como os descritos no item 3.3 deste capítulo, determinam qual CBR que uma amostra possui, aplicando tensões de cisalhamento crescentes e estáticas, envolvendo grandes deslocamentos. Porém, como dito no início do parágrafo, o conveniente é sempre relacionar o laboratório com a prática. Assim, o método para determinar o CBR não é o mais adequado para simular as cargas transientes em uma rodovia.

Buscando relacionar estes extremos, é que será aplicada neste item, a metodologia para determinação do Módulo Resiliente, uma vez que, esta produz tensões pela ação de cargas repetidas sobre os materiais em ensaio, aplicadas em frações de segundos. Assim como uma veículo passando em uma rodovia.

3.4.1 Módulo resiliente para a mistura escória de aciaria – solo

Seguindo o Método de Ensaio 131-94, contido no **Anexo C** deste trabalho, foram moldados dois corpos de prova para a mistura de 80% em Escória de Aciaria e 20% em Solo, levando em conta a umidade encontrada no **Gráfico 3.22**, para a compactação dos mesmos.

A compactação foi realizada em um molde cilíndrico de 10,2 centímetros de diâmetro, e 20,3 centímetros de altura, em cinco camadas, de modo a reproduzir as condições de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima. A sequência de **Fotos**, da **3.12** a **Foto 3.15**, mostram alguns passos da preparação dos corpos de prova.



Foto 3.12 - Homogeneização da mistura nas condições de hót



Foto 3.13 - Adição da mistura no molde



Foto 3.14 - Compactação do corpo de prova



Foto 3.15 - Verificação da altura das camadas para se adequar o número de golpes necessários para reproduzir a MEAS máxima

Com os dois corpos de prova moldados, os mesmos foram submetidos ao ensaio triaxial de carga repetida. Como foi citada no Capítulo 2, a aplicação total de carga neste ensaio é de 0,1 segundo e o repouso de 0,9 segundo; isto, para diferentes níveis de tensões de confinamento (σ_3 – dada por pressão de ar dentro da célula), e de tensões solicitantes (σ_d – aplicadas pelo cilindro pneumático).

As leituras obtidas pelo ensaio triaxial para os dois corpos de prova podem ser observados na **Tabela 3.8**. Já os **Gráficos 3.36 e 3.37**, representam o comportamento do módulo resiliente na mistura, em função a sua tensão de confinamento, ambos em escala logarítmica.

Tabela 3.8 - Leituras do Ensaio Triaxial – Escória de Aciaria e Solo

σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	
		CP-01	CP-02
0,21	0,21	8530	6729
	0,42	9035	6443
	0,63	8230	6042
0,35	0,35	9537	6958
	0,70	8834	6708
	1,05	8513	6553
0,53	0,53	9881	7709
	1,06	9451	7583
	1,59	9275	7562
0,70	0,70	10582	8478
	1,40	10044	8508
	2,10	10262	8664
1,05	1,05	11767	9656
	2,10	11714	9884
	3,15	10772	9309
1,40	1,40	11931	11072
	2,80	11873	11712
	4,20	11088	11051

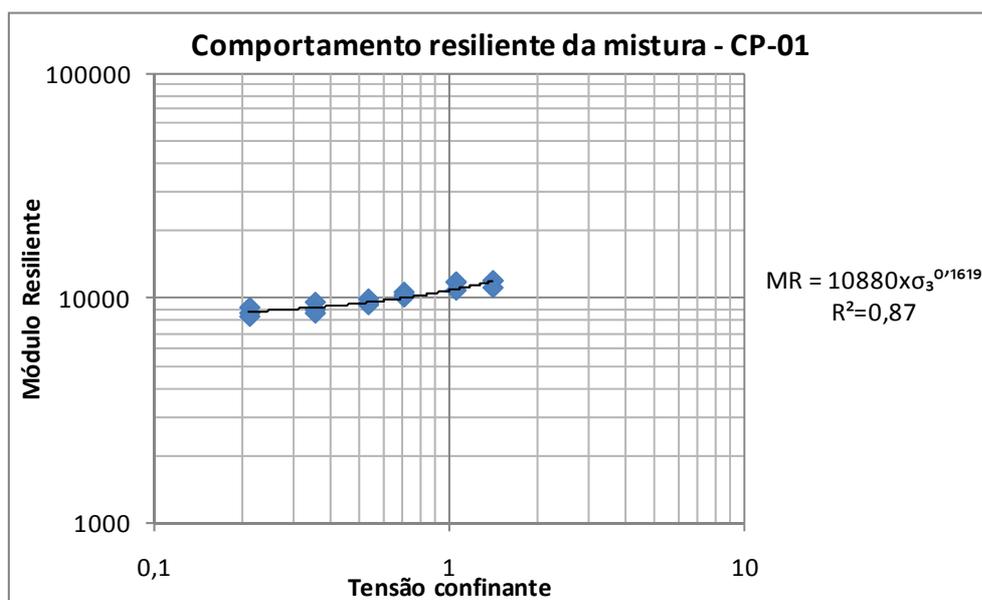


Gráfico 3.36 - Corpo de prova 01 da mistura

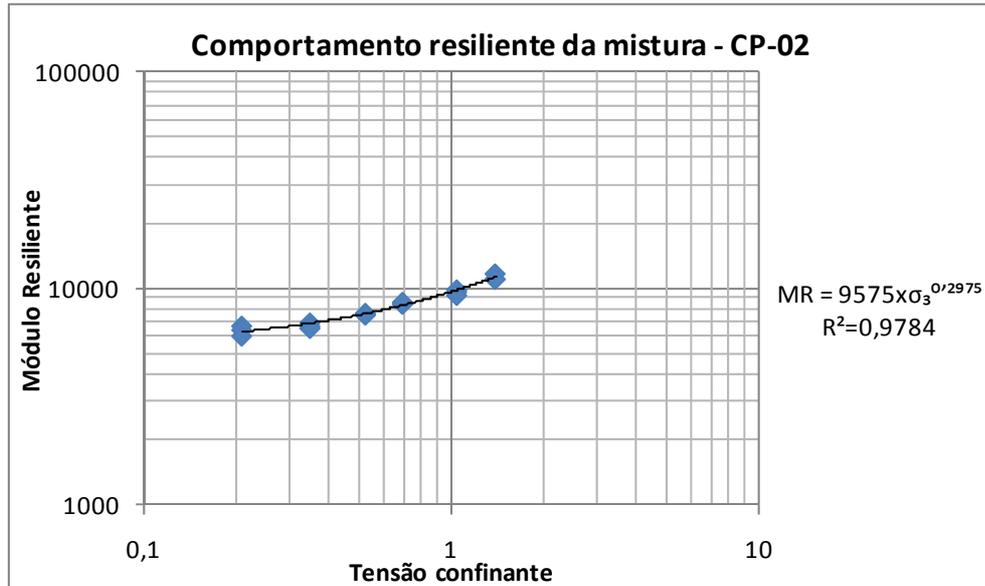


Gráfico 3.37 - Corpo de prova 02 da mistura

Como a mistura em estudo tem característica granular, seu módulo de resiliência é modificado de forma significativa com a mudança da tensão de confinamento e varia pouco com a tensão-desvio. Isto pode ser comprovado nos **Gráficos 3.36 e 3.37**, pois as curvas que representam os ensaios, têm sua equação em função somente da tensão confinante.

Observando os dados obtidos, e aplicando-os na **Figura 3.4**, nota-se que a mistura está acima da reta que delimita o Grupo “C”, porém, pode-se adotar que a mesma possui comportamento deste grupo. Significando assim, que o solo obteve baixo grau de resiliência, podendo ser empregado em todas as camadas de pavimento, resultando em estruturas com baixas deflexões.

Da **Foto 3.16 a 3.19**, será indicada a sequência de como os corpos de prova foram preparados para a execução do ensaio triaxial e como é o layout do sistema que fez as leituras dos dados obtidos.

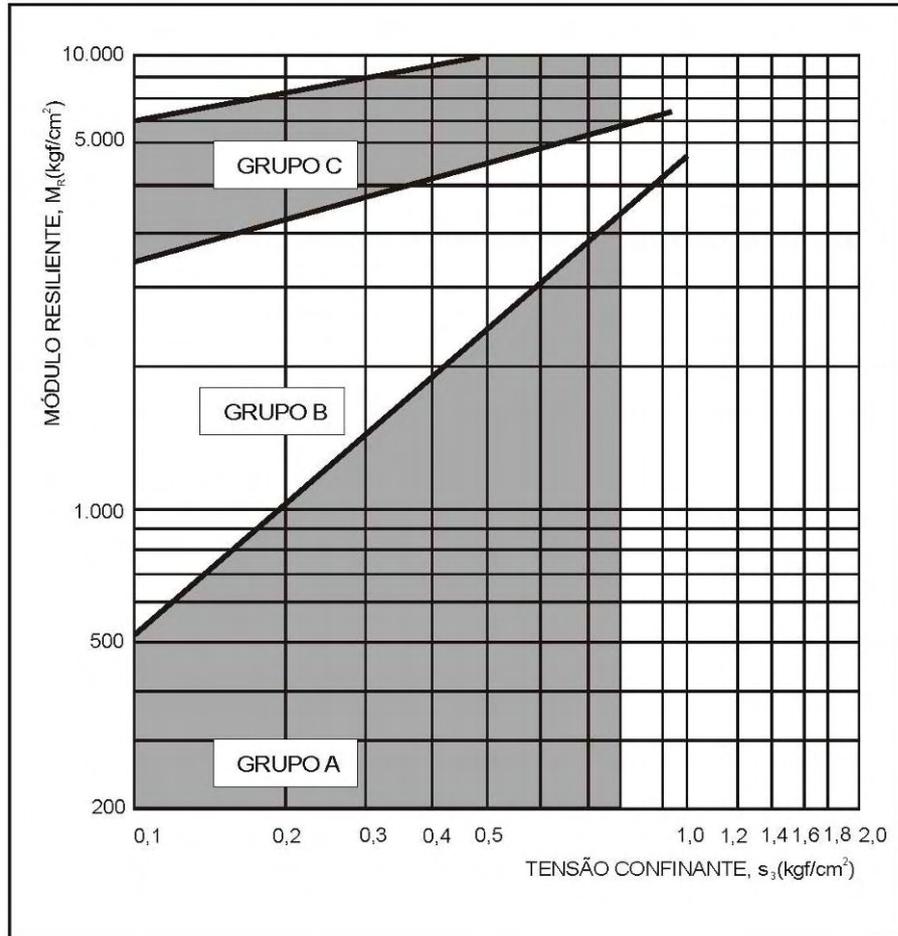


Figura 3.4 – Classificação resiliente de solos granulares

Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT/2006



Foto 3.16 - Corpo de prova com membrana



Foto 3.17 - Célula triaxial preparada

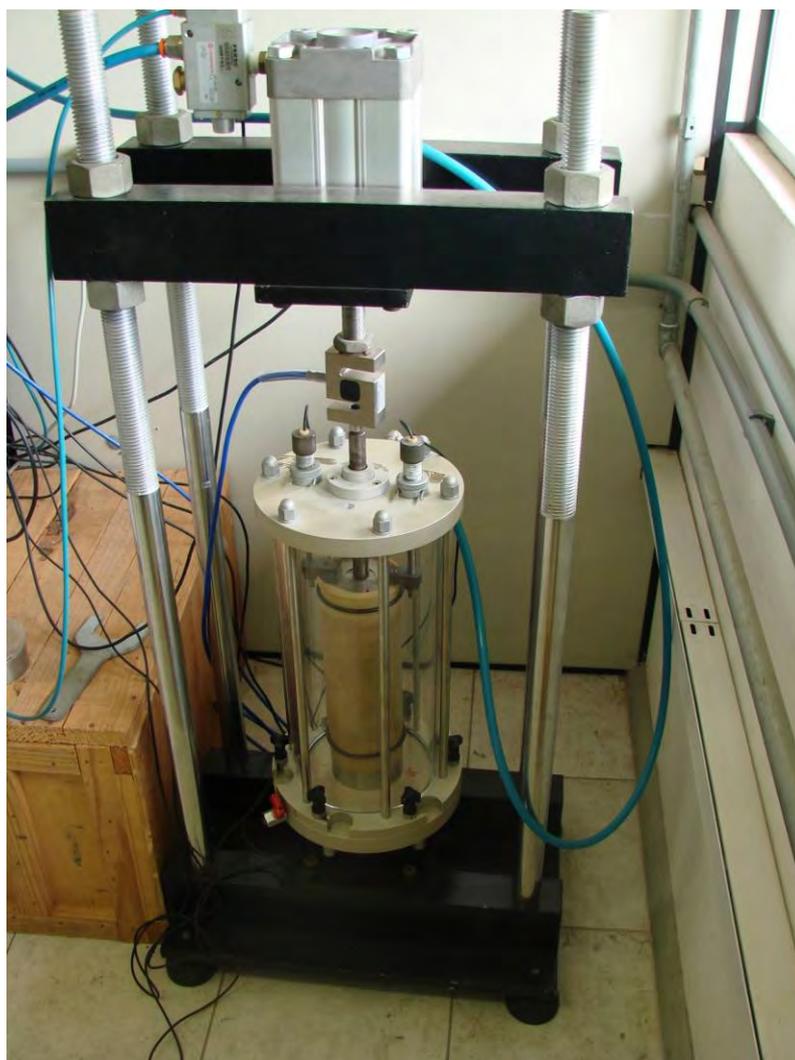


Foto 3.18 - Ensaio em execução



Foto 3.19 – Tela do Programa do Ensaio Dinâmico Triaxial

3.4.2 Módulo resiliente para escória de aciaria

Assim como para a mistura de escória e solo, também foi aplicado o Método de Ensaio 131-94 (contido no **Anexo C** deste trabalho) para a escória. Foram moldados dois corpos de prova, com as mesmas dimensões da mistura, mas levando em conta a umidade encontrada no **Gráfico 3.15** para a compactação dos mesmos.

Os dados obtidos com o ensaio triaxial, podem ser vistos na **Tabela 3.9**, nota-se nesta, que seu módulo resiliente baixou significativamente em comparação a mistura Escória/Solo. Esta diferença pode ser função de um melhor intertravamento entre as partículas de escória e solo, uma vez que para a escória, há agregados que não estão bem acomodados, gerando assim, deformações quando são aplicadas tensões sobre o corpo de prova.

A diferença de módulo trará consequência no dimensionamento, pois com a mistura, o revestimento poderá ser menos espesso, gerando assim uma economia ao projeto. Tal

diminuição será comprovada no próximo capítulo, pois neste será apresentado o dimensionamento para os resultados obtidos no presente capítulo.

Tabela 3.9- Leituras do Ensaio Triaxial – Escória de Aciaria

σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	
		CP-01	CP-02
0,21	0,21	2021	2330
	0,42	2240	2330
	0,63	2364	2448
0,35	0,35	2122	2503
	0,70	2220	2629
	1,05	2417	2812
0,53	0,53	2163	2899
	1,06	2396	3190
	1,59	2663	3416
0,70	0,70	2331	3437
	1,40	2579	3672
	2,10	2793	3840
1,05	1,05	2936	4139
	2,10	3165	4468
	3,15	3206	4547
1,40	1,40	2954	4445
	2,80	3346	4938
	4,20	3762	5305

Nos **Gráficos 3.38 e 3.39**, foram empregados os valores lidos e apresentados na **Tabela 3.9** para formá-los.

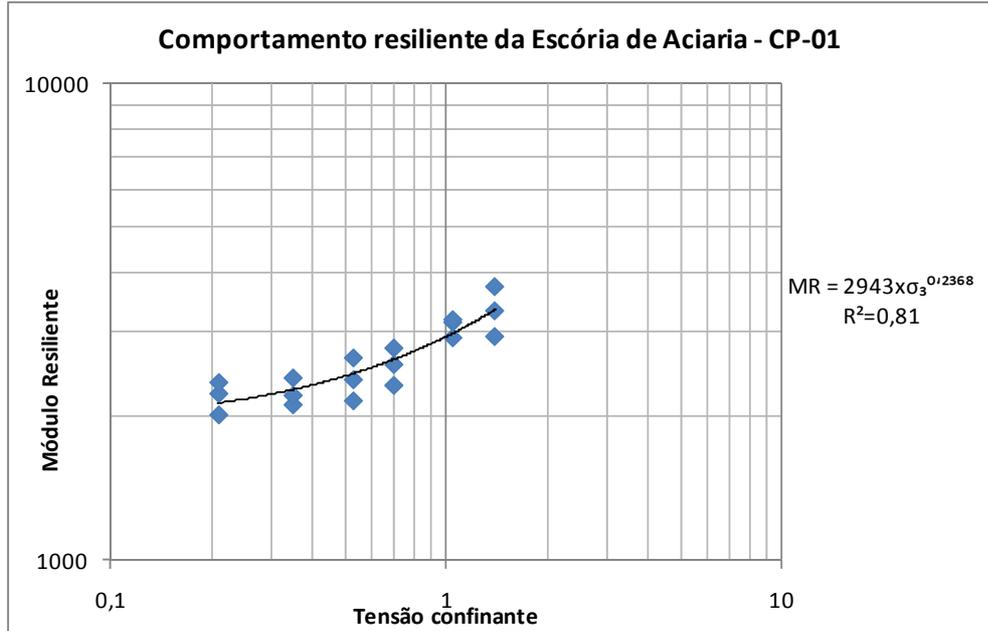


Gráfico 3.38 – Corpo de prova 01 da Escória

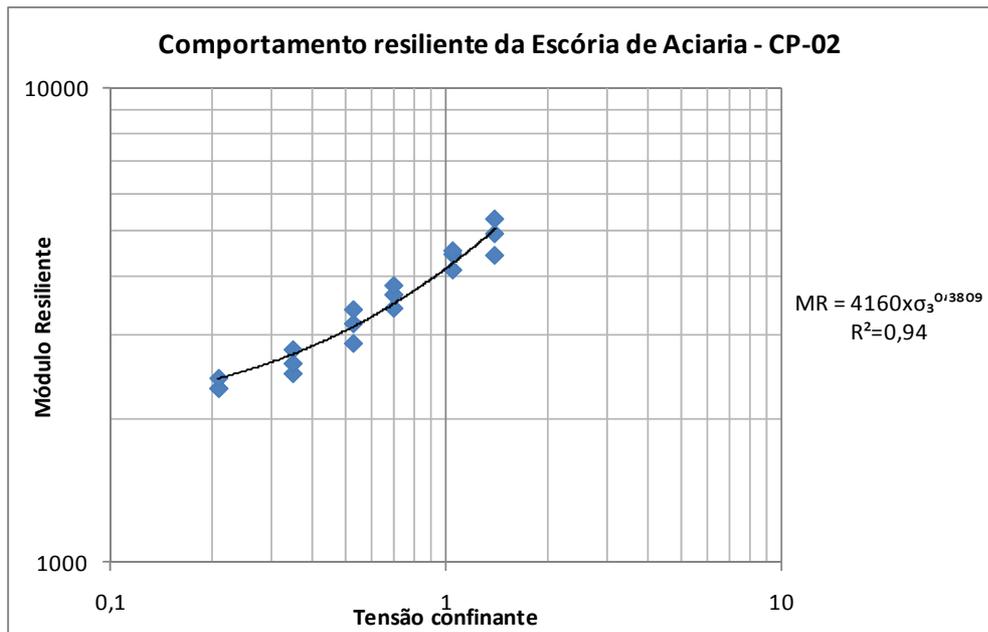


Gráfico 3.39 - Corpo de prova 02 da Escória

4. DIMENSIONAMENTO PARA PAVIMENTAÇÃO

Com todos os ensaios realizados conforme apresentado no Capítulo 3, foram obtidos os valores de suporte para cada material, e o módulo resiliente da escória e da mistura escória/solo. Constatou-se com isto, que as misturas poderiam ser utilizadas como agregado em camadas de base para pavimentação. Em função disto, neste capítulo será apresentado o dimensionamento destas misturas para diferentes níveis de tráfego, conforme o método do DNER/81. Além disto, será comparado o desempenho da escória de aciaria quanto ao seu módulo resiliente, com o da mistura de escória e solo.

4.1 Estudo de Tráfego

Para o presente trabalho, foram simulados dois estudos de tráfego, com o intuito de proporcionar diferentes níveis de solicitações, e assim, realizar o dimensionamento para dois níveis de tráfego. Com a simulação da contagem de tráfego por meio de pesagem dos veículos, procede-se o cálculo do número de solicitações do eixo padrão de 8,2 ton. – $N_{8,2t}$

Para dimensionar um pavimento, é necessário ter ciência do número equivalente ($N_{8,2t}$) de operações de um eixo tomado como padrão, durante o período de projeto da rodovia. Possuindo o eixo padrão, carga de 8,2 toneladas (18.000lb). Com a contagem do tráfego realizada, calculou-se os fatores de equivalência de cada conjunto seguindo as **Tabelas 4.1 e 4.2**.

Tabela 4.1 - Fator de Veículo para USACE

USACE		
Veículos	Intervalo	Fórmula
Dianteiro simples e traseiro simples	0 - 8	$FC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Tandem duplo	0 - 11	$FC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,472}$
	≥ 11	$FC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,484}$
Tandem triplo	0 - 18	$FC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

Tabela 4.2 - Fator de Veículo para AASHTO

AASHTO	
Veículos	Fórmula
Simples de rodagem simples	$FC = (P/7,77)^{4,23}$
Simples de rodagem dupla	$FC = (P/8,17)^{4,32}$
Tandem duplo (rodagem dupla)	$FC = (P/15,08)^{4,14}$
Tandem triplo (rodagem dupla)	$FC = (P/22,95)^{4,22}$

Com base nas fórmulas das Tabelas 4.1 e 4.2, montou-se as Tabelas 4.3 e 4.4, para as diferentes cargas e repetições previstas.

Tabela 4.3 - Cálculo do número $N_{8,2}$ – Volume de tráfego médio

Cargas por Eixo (tf)	Nº de repetições Previstas	Corpo de Engenheiros		AASHTO	
		FEO	$N_{8,2t}$	FEO	$N_{8,2t}$
EIXO SIMPLES					
6	52.373	0,2779	14.555,1753	0,2635	13.801,3500
7,2	43.762	0,5781	25.299,8419	0,5793	25.349,7839
8,4	42.872	1,1055	47.394,3667	1,1274	48.334,9168
9,6	34.872	2,5483	88.863,4297	2,0073	69.998,5911
10	29.734	3,2895	97.808,9972	2,3944	71.195,7473
12	25.498	10,2882	262.329,3814	5,2634	134.205,3458
13,2	18.363	18,6732	342.896,1304	7,9447	145.889,3982
14,4	16.833	32,1778	541.648,6821	11,5698	194.754,8156
15,6	13.872	53,0842	736.384,1167	16,3493	226.797,3944
16,8	9.263	84,3830	781.639,4008	22,5184	208.587,5951
18	8.362	129,9124	1.086.327,9009	30,3374	253.681,0935
19,2	3.874	194,5127	753.542,2894	40,0924	155.317,9466
		$N_{ES} =$		$N_{ES} =$	
		4,78E+06		1,55E+06	
EIXO DUPLO					
15,6	9.472	0,1992	1.886,8493	0,0653	618,2040
16,8	6.382	0,2577	1.644,3624	0,0887	566,0978
18	7.392	0,3274	2.420,1095	0,1180	872,4577
19,2	5.721	0,4096	2.343,4772	0,1542	882,0502
20,4	4.998	0,5056	2.526,9643	0,1982	990,4200
21,6	5.792	0,6166	3.571,2388	0,2511	1.454,1906
22,8	4.289	0,9554	4.097,7514	0,3141	1.346,9782
24	3.782	1,2658	4.787,1257	0,3884	1.468,7583
25,2	3.283	1,6541	5.430,3311	0,4753	1.560,3549
26,4	2.842	2,1348	6.067,0122	0,5762	1.637,6406
27,6	1.731	2,7241	4.715,3869	0,6927	1.198,9883
28,8	1.274	3,4402	4.382,8105	0,8261	1.052,4673
		$N_{ED} =$		$N_{ED} =$	
		4,39E+04		1,36E+04	
EIXO TRIPLO					
28,8	2.731	18,3371	50.078,7484	2,6070	7.119,5910
31,2	1.732	28,6593	49.637,9650	3,6545	6.329,6154
33,6	836	43,3332	36.226,5927	4,9963	4.176,9096
36	413	63,6771	26.298,6279	6,6849	2.760,8554
		$N_{ET} =$		$N_{ET} =$	
		1,62E+05		2,04E+04	
		$N_{projeto} =$		$N_{projeto} =$	
		4,98E+06		1,58E+06	

Tabela 4.4 - Cálculo do número $N_{8,2}$ – Volume de tráfego pesado

Cargas por Eixo (tf)	Nº de repetições Previstas	Corpo de Engenheiros		AASHTO	
		FEO	$N_{8,2t}$	FEO	$N_{8,2t}$
EIXO SIMPLES					
6	3.235.431	0,2779	899.170,6679	0,2635	852.601,8286
7,2	487.212	0,5781	281.668,7207	0,5793	282.224,7368
8,4	426.652	1,1055	471.657,5231	1,1274	481.017,6557
9,6	376.212	2,5483	958.691,4609	2,0073	755.170,6222
10	362.561	3,2895	1.192.632,2677	2,3944	868.124,0780
12	287.413	10,2882	2.956.972,0958	5,2634	1.512.760,2580
13,2	376.201	18,6732	7.024.879,7664	7,9447	2.988.821,9513
14,4	297.413	32,1778	9.570.092,0513	11,5698	3.441.015,5036
15,6	254.281	53,0842	13.498.305,1886	16,3493	4.157.314,6084
16,8	81.767	84,3830	6.899.741,8642	22,5184	1.841.258,9750
18	38.642	129,9124	5.020.076,8652	30,3374	1.172.296,6772
19,2	5.927	194,5127	1.152.876,9099	40,0924	237.627,6379
		$N_{ES} =$	4,99E+07	$N_{ES} =$	1,86E+07
EIXO DUPLO					
15,6	174.623	0,1992	34.785,3974	0,0653	11.397,0262
16,8	127.943	0,2577	32.965,3184	0,0887	11.348,8334
18	10.472	0,3274	3.428,4884	0,1180	1.235,9818
19,2	1.289	0,4096	528,0095	0,1542	198,7350
20,4	15.827	0,5056	8.002,0537	0,1982	3.136,3301
21,6	27.842	0,6166	17.166,8563	0,2511	6.990,2583
22,8	21.742	0,9554	20.772,5135	0,3141	6.828,1652
24	15.874	1,2658	20.092,7640	0,3884	6.164,7459
25,2	14.729	1,6541	24.362,8834	0,4753	7.000,4469
26,4	11.742	2,1348	25.066,4521	0,5762	6.766,0717
27,6	4.579	2,7241	12.473,5740	0,6927	3.171,6737
28,8	4.724	3,4402	16.251,4887	0,8261	3.902,5552
		$N_{ETD} =$	2,16E+05	$N_{ETD} =$	6,81E+04
EIXO TRIPLO					
28,8	3.612	18,3371	66.233,7749	2,6070	9.416,3174
31,2	2.414	28,6593	69.183,6302	3,6545	8.821,9928
33,6	1.582	43,3332	68.553,1934	4,9963	7.904,1519
36	782	63,6771	49.795,4649	6,6849	5.227,5760
		$N_{ETT} =$	2,54E+05	$N_{ETT} =$	3,14E+04
		$N_{projeto} =$	5,04E+07	$N_{projeto} =$	1,87E+07

Nota-se para os dois cálculos, que o $N_{PROJETO}$ da metodologia do USACE foi maior que o da AASHTO em torno de três vezes, como era o esperado. Porém, como será utilizada a metodologia de dimensionamento do USACE (DNER/81 e Resiliência), os valores do $N_{PROJETO}$ serão os desta.

4.2 Método do DNER/81

Depois de realizar os ensaios, e determinar o volume de tráfego para diferentes níveis de tráfego; far-se-á com auxílio do item 2.4.1 do Capítulo 2, o dimensionamento seguindo a Método do DNER/81.

Os coeficientes de Equivalência Estrutural para os diferentes materiais constituídos no pavimento deste dimensionamento serão:

- $K_R = 2,00$ (Revestimento de concreto betuminoso);
- $K_B = 1,00$ (Base com camadas granulares);
- $K_S = 1,00$ (Sub-base com camadas granulares).

Segundo a **Tabela 2.6**, a espessura mínima de revestimento varia conforme a solicitação de tráfego sobre o pavimento, como se tem dois diferentes níveis de tráfego, esta dimensão é igual a:

- revestimento betuminoso com 5,0cm para $N > 10^6$ e $N \leq 5,00 \times 10^6$;
- e concreto betuminoso com 10,0cm para $N > 10^7$ e $N \leq 5,00 \times 10^7$.

Considerando-se que no trecho a ser dimensionado, tenha um segmento homogêneo para o subleito, e este, possuindo $\text{CBR} = 8\%$, e com camada de sub-base, de macadame seco, com CBR superior a 20%, procedeu-se a marcha de cálculo como segue.

4.2.1 Solicitação de tráfego com $N_{8,2t} = 5,00 \times 10^6$

Aplicando a metodologia para dimensionamento de pavimento do DNER/81; e levando em conta que o número de solicitações sobre um subleito com CBR igual a 8% será de $5,00 \times 10^6$ repetições; calculou-se as camadas de suporte segundo as expressão:

1) $R \cdot K_R + B \cdot K_B \geq H_{20}$, onde H_{20} é igual a 27,2cm com base na **Figura 2.2**, para suporte de 20% e número de solicitações conforme informado. A espessura do revestimento (R) também

está determinada, consultando a **Tabela 2.6**, seu valor é de 5,0 cm; então, a expressão citada tem como resolução:

$5 \cdot 2,0 + B \cdot 1,0 \geq 27,2 \therefore B \geq 17,2 \text{ cm}$, para melhor controle de execução, será atribuído como valor de base, 17,5 cm.

2) $R \cdot K_R + B \cdot K_B + h_{20} \cdot K_S \geq H_n$, partindo novamente a consulta da **Figura 2.2**, a altura H_n , necessária para suportar tal carregamento é de 47 cm; assim, a espessura h_{20} pode ser calculada pela substituição na fórmula deste item:

$$5,0 \cdot 2,0 + 17,5 \cdot 1,0 + h_{20} \cdot 1,0 \geq 47,0 \therefore h_{20} \geq 19,5 \text{ cm}$$

Por conseguinte, a seção que representa o dimensionamento acima citado, para as camadas de pavimentação deste nível de tráfego, é exposta na **Figura 4.1**.

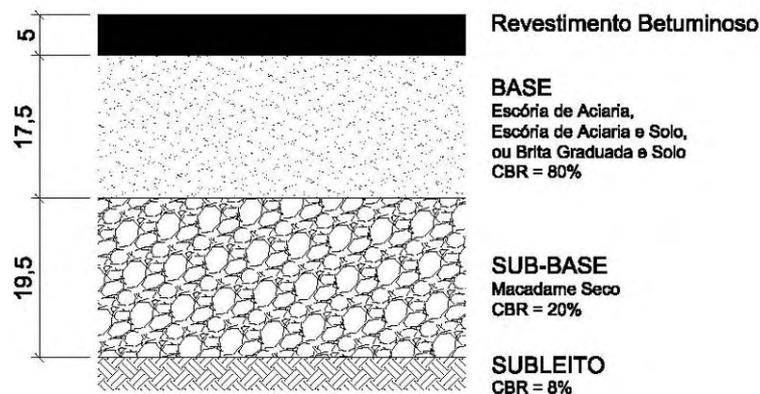


Figura 4.1 - Seção transversal 01 - Para $N=5,00 \times 10^6$

4.2.2 Solicitação de tráfego com $N_{8,2t} = 5,00 \times 10^7$

Aplicando a metodologia para dimensionamento de pavimento do DNER/81; e levando em conta que o número de solicitações sobre um subleito com CBR igual a 8% será de $5,00 \times 10^7$ repetições; calculou-se as camadas de suporte segundo as expressão:

Como o número de repetições ultrapassou o valor de 10^7 , a presente norma recomenda a substituição do valor H_{20} da inequação abaixo, por $1,2x H_{20}$, sendo assim, a mesma já será escrita com a mudança.

1) $R \cdot K_R + B \cdot K_B \geq 1,2H_{20}$, onde H_{20} é igual a 30,5cm com base na **Figura 2.2**, para suporte de 20% e número de solicitações conforme informado. A espessura do revestimento (R) também está determinada, consultando a **Tabela 2.6**, seu valor é de 10,0 cm; então, a expressão citada tem como resolução:

$10 \cdot 2,0 + B \cdot 1,0 \geq 30,5 \therefore B \geq 10,5 \text{ cm}$, constatou-se nesta inequação, que uma camada de 10,5 cm de espessura já daria suporte suficiente. Porém, como é necessária para execução uma camada de no mínimo 15 cm, será atribuído este valor de base.

2) $R \cdot K_R + B \cdot K_B + h_{20} \cdot K_S \geq H_n$, partindo novamente a consulta da **Figura 2.2**, a altura H_n , necessária para suportar tal carregamento é de 54,0 cm; assim, a espessura h_{20} pode ser calculada pela substituição na fórmula deste item:

$$10,0 \cdot 2,0 + 15,0 \cdot 1,0 + h_{20} \cdot 1,0 \geq 54,0 \therefore h_{20} \geq 19,0 \text{ cm}$$

Portanto, a espessura da sub-base será de 19,0 cm.

Por conseguinte, a seção que representa o dimensionamento acima citado, para as camadas de pavimentação deste nível de tráfego, é exposta na **Figura 4.2**.

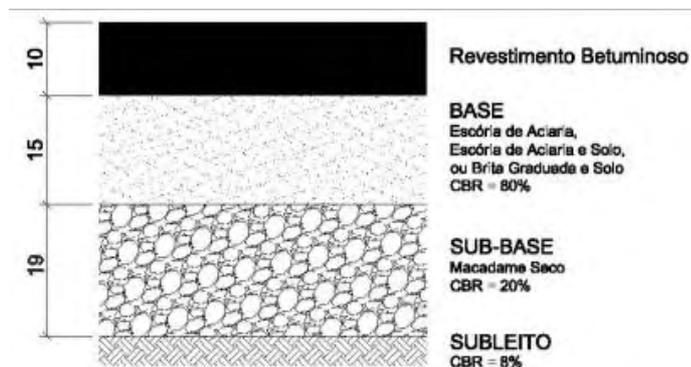


Figura 4.2 - Seção transversal 02 - Para $N=5,00x10^7$

4.3 Análise Mecanicista

Nesta análise serão utilizados os resultados obtidos no item 4.2, e os alcançados nos ensaios de módulo resiliente triaxial, com o intuito de realizar verificações complementares capazes de melhor descrever o comportamento mecânico dos pavimentos.

Os parâmetros essenciais para esta análise são: espessuras e materiais constituintes de todas as camadas, propriedades resistivas dos materiais e propriedades resilientes das camadas que são determinadas através de ensaios laboratoriais.

O cálculo de tensões, deformações e deslocamentos, foi feito com o programa computacional Elsym5.

Os parâmetros mecânicos adotados para os materiais foram os seguintes:

- mistura asfáltica com $MR_{\text{médio}} = 60.000 \text{ kgf/cm}^2$ (para Convencional) e $MR_{\text{médio}} = 45.000 \text{ kgf/cm}^2$ (para asfalto-borracha);
- sub-base de macadame seco com $MR_{\text{médio}} = 2.000 \text{ kgf/cm}^2$;
- subleito, $MR_{\text{médio}} = 1.200 \text{ kgf/cm}^2$;
- e carregamento com eixo padrão de 8,2 toneladas.

Para a escória e mistura escória/solo, o MR foi definido para tensões intermediárias obtidas nos ensaios conforme os **Gráficos 3.36** ao **3.39**.

Empregando-se o programa Elsym5 para este conjunto de parâmetros, foi possível verificar os níveis de tensões, deformações e deslocamentos, em cada estrutura simulada.

4.3.1 Análise da estrutura para o nível de tráfego médio – $N = 5,00 \times 10^6$

Partindo das suposições comentadas anteriormente, e com os módulos resilientes da escória e da mistura, formulou-se a **Tabela 4.5** para descrever os dados de entrada no programa Elsym5.

A sequência de passos para rodar o programa Elsym5 será descrita neste item, sendo que para as avaliações posteriores, será admitida esta para elaboração da tabela de resultados. Utilizando material betuminoso convencional como revestimento, as **Figuras 4.3 e 4.4** representam os dados de entrada para o tráfego médio, que tem na sua composição de base, somente escória ou com mistura de escória e solo, respectivamente.

Tabela 4.5 – Dados para nível de tráfego médio

Camada	Espessura (cm)	Coef. Poisson	MR (kgf/cm ²)	Carregamento (kgf/roda)
Revest.: Convencional	5,0	0,27	60.000	2.050
Asfalto Borracha			45.000	
Base - Escória	17,5	0,35	3.000	
Base - Escória/Solo	17,5	0,35	7.000	
Sub-base	19,5	0,35	2.000	
Subleito	0,0	0,45	1.200	

ELASTIC LAYER DATA

Number of layers: 4

Layer Number	(top to bottom)	Thickness (inches)	Poisson's Ratio	Modulus of Elasticity
1		5.00	.27	60000.00
2		17.50	.35	3000.00
3		19.50	.35	2000.00
4		.00	.45	1200.00

*Note: Enter Zero thickness when bottom layer is semi-infinite.

Do you want to modify the data (Y/N)? _

Figura 4.3 - Dados para tráfego médio - Escória

ELASTIC LAYER DATA

Number of layers: 4

Layer Number	(top to bottom)	Thickness (inches)	Poisson's Ratio	Modulus of Elasticity
1		5.00	.27	60000.00
2		17.50	.35	7000.00
3		19.50	.35	2000.00
4		.00	.45	1200.00

*Note: Enter Zero thickness when bottom layer is semi-infinite.

CR: Next field; F2: Jump To end of screen

Figura 4.4 - Dados para tráfego médio - Escória/Solo

Sendo o eixo simples de rodas duplas (ESRD) o eixo considerado padrão, com 8,2 toneladas, será informado ao programa a carga por cada pneu, devendo assim ser lançado o valor de 2,05t, ou seja, 2050 kgf. A pressão de cada pneu será adotada de 0,57 MPa (5,7 kgf/cm²). A distância entre aplicações de carga entre as rodas duplas é de 32 cm. Esta configuração pode ser visualizada no Elsym5 conforme a **Figura 4.5**.

LOAD DATA

Enter two of the following, the third is calculated.

Load: 2050.00lbs Pressure: 5.70 psi Load Radius: .00inches

Number of load locations: 2

Location number =	Coordinates	X =	Y =
1		.00	.00
2		32.00	.00

Figura 4.5 - Dados para carregamento

Como desejasse obter os valores da deflexão, deformação por tração e tensão no subleito, tem-se que informar estes pontos em análise ao Elsym5; estes são representados em forma de coordenadas XY e sua posição quanto à profundidade. A **Figura 4.6** demonstra os pontos que serão avaliados.

EVALUATION LOCATION DATA

Results are evaluated for all combinations of X-Y coordinates and
Depths of Z.

Number of X-Y positions: 2
Number of Z position : 3

Position	X	Y	Position	Z
1	.00	.00	1	.00
2	16.00	.00	2	5.00
			3	42.00

Figura 4.6 - Dados dos pontos de análise

Os resultados que o programa Elsym5 apresenta, serão mostrados através de figuras para este nível de carregamento, e a partir delas, serão agrupados os valores de maior relevância na **Tabela 4.6**. As deflexões na superfície (**Figura 4.7**), as deformações de tração nas fibras inferiores do revestimento (**Figura 4.8**) e as tensões do subleito (**Figura 4.9**), foram obtidas utilizando somente a escória como agregado na base. Já as **Figuras 4.10, 4.11 e 4.12**, representam respectivamente, deflexão, deformação de tração e tensão, quando utilizou-se a mistura Escória/Solo na camada de base.

Displacements

XP	YP	UX	UY	UZ
.00	.00	.110E-02	.000E+00	.436E-01
16.00	.00	.000E+00	.000E+00	.417E-01

RESULTS MENU FOR ELSYM5

LAYER = 1 Z = .00

1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==> _

Figura 4.7 – Deflexão da superfície - Escória

```

                Normal Strains                Shear Strains
XP      YP      EXX      EYY      EZZ      EXY      EXZ      EYZ
.00     .00     .179E-03  .233E-03  -.195E-03 .000E+00  .788E-05  .000E+00
16.00   .00    -.152E-03  .188E-03  -.347E-04 .000E+00  .000E+00  .000E+00

                Principal -- Strains          Shear Strains
XP      YP      PE 1      PE 2      PE 3      PSE1      PSE2      PSE3
.00     .00     .233E-03  .179E-03  -.195E-03 .428E-03  .543E-04  .374E-03
16.00   .00     .188E-03  -.347E-04  -.152E-03 .339E-03  .222E-03  .117E-03

                RESULTS MENU FOR ELSYMS
                -----
                LAYER = 1      Z = 5.00

1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==>

```

Figura 4.8 - Deformação de tração no revestimento – Escória

```

                Normal Stresses                Shear Stresses
XP      YP      SXX      SYX      SZZ      SXY      SXZ      SYZ
.00     .00     .189E+00  .274E+00  -.445E+00 .000E+00  .808E-01  .000E+00
16.00   .00     .226E+00  .301E+00  -.490E+00 .000E+00  .000E+00  .000E+00

                Principal -- Stresses          Shear Stresses
XP      YP      PS1      PS2      PS3      PSS1      PSS2      PSS3
.00     .00     .274E+00  .199E+00  -.455E+00 .364E+00  .372E-01  .327E+00
16.00   .00     .301E+00  .226E+00  -.490E+00 .395E+00  .373E-01  .358E+00

                RESULTS MENU FOR ELSYMS
                -----
                LAYER = 3      Z = 42.00

1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==>

```

Figura 4.9 - Tensão no Subleito - Escória

```

Displacements
XP      YP      UX      UY      UZ
.00     .00     .984E-03 .000E+00 .349E-01
16.00   .00     .000E+00 .000E+00 .335E-01

RESULTS MENU FOR ELSYMS
-----
LAYER = 1      Z = .00

1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==>
    
```

Figura 4.10 - Deflexão da superfície - Escória/Solo

```

Normal Strains
XP      YP      EXX      EYY      EZZ
.00     .00     .975E-04 .118E-03 -.133E-03
16.00   .00     -.119E-03 .838E-04 -.417E-05

Shear Strains
EXY      EXZ      EYZ
.000E+00 .112E-04 .000E+00
.000E+00 .000E+00 .000E+00

Principal -- Strains
XP      YP      PE 1      PE 2      PE 3
.00     .00     .118E-03 .976E-04 -.133E-03
16.00   .00     .838E-04 -.417E-05 -.119E-03

Shear Strains
PSE1      PSE2      PSE3
.251E-03 .201E-04 .230E-03
.203E-03 .880E-04 .115E-03

RESULTS MENU FOR ELSYMS
-----
LAYER = 1      Z = 5.00

1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==> _
    
```

Figura 4.11 - Deformação de tração no revestimento - Escória/Solo

Normal Stresses					Shear Stresses		
XP	YP	SXX	SYX	SZZ	SXY	SXZ	SYZ
.00	.00	.162E+00	.225E+00	-.365E+00	.000E+00	.634E-01	.000E+00
16.00	.00	.191E+00	.246E+00	-.398E+00	.000E+00	.000E+00	.000E+00

Principal -- Stresses					Shear Stresses		
XP	YP	PS1	PS2	PS3	PSS1	PSS2	PSS3
.00	.00	.225E+00	.170E+00	-.372E+00	.299E+00	.275E-01	.271E+00
16.00	.00	.246E+00	.191E+00	-.398E+00	.322E+00	.276E-01	.294E+00

RESULTS MENU FOR ELSYM5

LAYER = 3 Z = 42.00

1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==>

Figura 4.12 - Tensão no Subleito - Escória/Solo

Além de expor os resultados relevantes para a estrutura calculada pelo método do DNER/81, a **Tabela 4.6** também mostrará estes parâmetros para outras configurações da seção, variando a espessura do agregado em estudo (base com escória, ou com mistura escória/solo) e o material do revestimento. Isto, com o intuito de verificar segundo as **Tabelas 4.7 e 4.8**, se as referidas seções suportam as solicitações de projeto. Os **Gráficos 4.1 e 4.2** representam os resultados obtidos nestas tabelas.

Os modelos que serão utilizados para realizar a análise mecanicista são:

- Fontes (2009): $N = 1,815 \times 10^{15} (1/et)^{4.036}$ (para revestimento convencional);
- Fontes (2009): $N = 2,031 \times 10^{20} (1/et)^{5.915}$ (para asfalto-borracha);
- Brown et. al. (1977): $N = 8,9 \times 10^{-13} (1/et)^{4.90}$;
- Pinto (1991): $N = 2,10 \times 10^{-3} (1/et)^{2.6}$;
- USACE: $\log \delta = 3,148 - 0,188 \log N$;
- Klomp (1962): $\sigma_{v,adm} = (0,006 \times MR) / (1 + 0,7 \log N)$;

O critério para que a estrutura seja aceita, é de que o número de solicitações calculado a partir dos resultados do programa Elsym5 seja superior ao calculado para o projeto.

Tabela 4.6 - Dados Elsym5 para diferentes espessuras de base com tráfego médio e revestimento de 5 cm

Tipo do revestimento	Espessura da base (cm)	Base de Escória			Base de Escória / Solo		
		δ ($\times 10^{-2}$ mm)	e_t (cm/cm)	σ_s (kgf/cm ²)	δ ($\times 10^{-2}$ mm)	e_t (cm/cm)	σ_s (kgf/cm ²)
Convencional	15	44,5	2,36E-04	0,535	36,5	1,23E-04	0,443
	17,5	43,6	2,33E-04	0,490	34,9	1,18E-04	0,398
	20	42,7	2,31E-04	0,450	33,5	1,14E-04	0,359
Asfalto borracha	15	46,0	2,53E-04	0,548	37,4	1,19E-04	0,456
	17,5	45,0	2,50E-04	0,502	35,8	1,14E-04	0,410
	20	44,1	2,47E-04	0,461	34,3	1,11E-04	0,370

Tabela 4.7 - N_{adm} para diferentes espessuras de base e revestimento de 5 cm (Base de Escória)

		$N_{PROJETO} = 5 \times 10^6$ (Base de Escória)			
Parâmetros	Espessura da Base (cm)	15	17,5	20	
		Modelo	$N_{adm,15}$	$N_{adm,17,5}$	$N_{adm,20}$
e_t	Fontes (2009) - Revest. Convencional		4,81E+05	5,06E+05	5,24E+05
	Fontes (2009) - Revest. Asfalto-borracha		1,24E+06	1,33E+06	1,43E+06
	Pinto (1991)		5,66E+06	5,85E+06	5,98E+06
	Brown (1977)		5,27E+05	5,61E+05	5,86E+05
	δ	USACE	9,48E+07	1,06E+08	1,18E+08
$\sigma_{subleito}$	Klomp (1962)	6,27E+17	3,65E+19	2,68E+21	

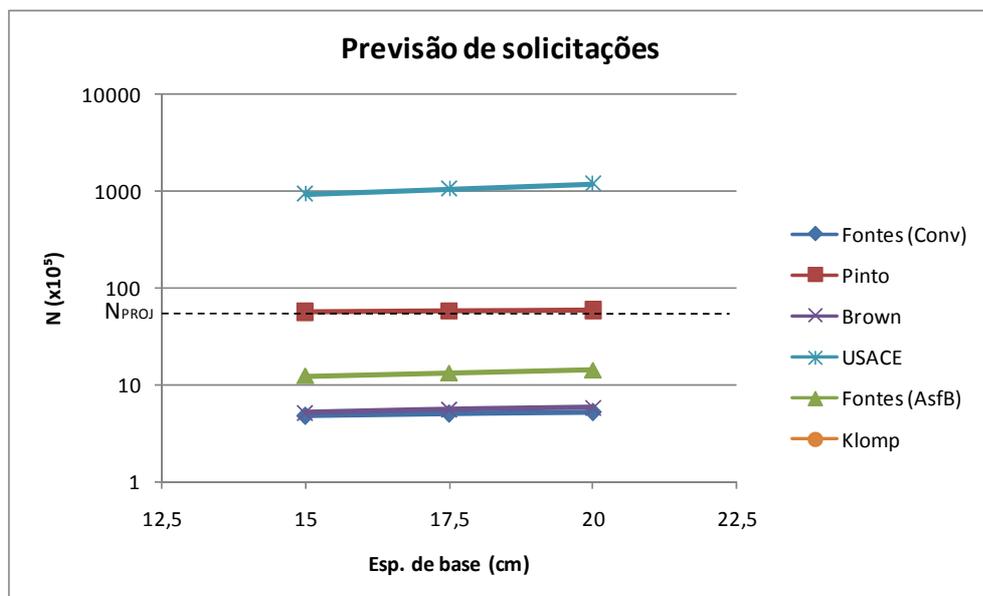


Gráfico 4.1 - Previsão de solicitações para base de escória com revestimento de 5 cm – Tráfego Médio

É possível notar da **Tabela 4.7** que os 5,0 cm de revestimento convencional não atenderia ao tráfego de projeto solicitado, assim como se o revestimento fosse executado com asfalto-borracha.

Fazendo a mesma relação quando utilizada a mistura Escória/Solo, a **Tabela 4.8** e o **Gráfico 4.2**, mostram que como houve um aumento no módulo resiliente devido a incorporação do solo à escória, a espessura de 15 cm atende ao projeto. Verificando assim, que houve uma diminuição de 2,5 cm em comparação ao calculado pelo método do DNER/81.

Tabela 4.8 - N_{adm} para diferentes esp. de base e revestimento de 5 cm (Base de Escória/Solo)

		NPROJETO = 5×10^6 (Base de Escória/Solo)		
Parâmetros	Espessura da Base (cm)	15	17,5	20
	Modelo	$N_{adm,15}$	$N_{adm,17,5}$	$N_{adm,20}$
et	Fontes (2009) - Revest. Convencional	6,67E+06	7,88E+06	9,06E+06
	Fontes (2009) - Revest. Asfalto-borracha	1,07E+08	1,38E+08	1,62E+08
	Pinto (1991)	3,08E+07	3,43E+07	3,75E+07
	Brown (1977)	1,28E+07	1,57E+07	1,86E+07
δ	USACE	2,72E+08	3,45E+08	4,29E+08
$\sigma_{subleito}$	Klomp (1962)	6,16E+21	2,60E+24	1,67E+27

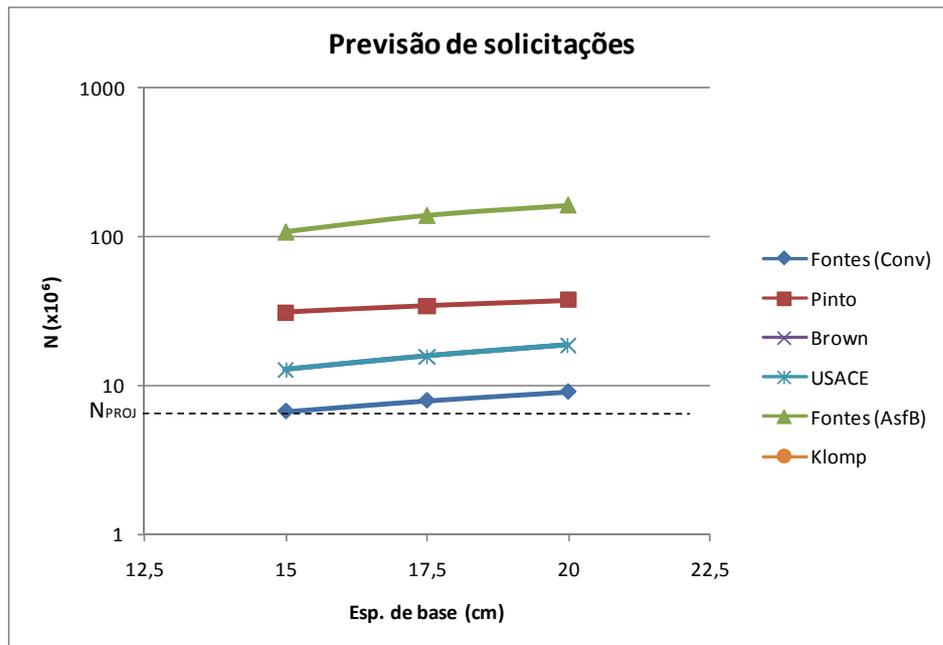


Gráfico 4.2 - Previsão de solicitações para base de escória/solo com revestimento de 5 cm – Tráfego Médio

Além da espessura mínima para execução da camada de base (15 cm) satisfazer ao tráfego solicitado, observou-se na **Tabela 4.8** que utilizando a mistura escória/solo, a espessura de 5 cm de revestimento convencional atenderia ao tráfego, não necessitando assim, usar o revestimento de asfalto-borracha.

4.3.2 Análise da estrutura para o nível de tráfego pesado – $N = 5,00 \times 10^7$

Assim como para o item 4.3.1, para o tráfego pesado também foram utilizados os valores das espessuras encontradas segundo o método do DNER/81, os módulos resilientes da base foram encontrados conforme o capítulo 3, e os demais dados, atribuídos com base em publicações anteriores. Estes valores podem ser vistos na **Tabela 4.9**.

Tabela 4.9 - Dados para nível de tráfego pesado

Camada	Espessura (cm)	Coef. Poisson	MR (kgf/cm ²)	Carregamento (kgf/roda)
Revest.: Convencional	10,0	0,27	60.000	2.050
Asfalto Borracha			45.000	
Base - Escória	15,0	0,35	3.000	
Base - Escória/Solo	15,0	0,35	7.000	
Sub-base	19,0	0,35	2.000	
Subleito	0,0	0,45	1.200	

Com auxílio do programa computacional Elsym5, foram determinados os parâmetros necessários para verificar se esta estrutura suporta o nível de carregamento que lhe foi atribuído quando em projeto, variando-se a espessura da base. Estes parâmetros podem ser visualizados na **Tabela 4.10**.

Tabela 4.10 - Dados Elsym5 para diferentes espessuras de base

Tipo do revestimento	Espessura da base (cm)	Base de Escória			Base de Escória / Solo		
		δ (x10 ⁻² mm)	e_t (cm/cm)	σ_s (kgf/cm ²)	δ (x10 ⁻² mm)	e_t (cm/cm)	σ_s (kgf/cm ²)
Convencional	15	33,9	1,68E-04	0,380	29,3	1,16E-04	0,325
	17,5	33,3	1,65E-04	0,353	28,1	1,12E-04	0,297
	20	32,7	1,64E-04	0,329	27,1	1,08E-04	0,272
Asfalto borracha	15	35,3	1,92E-04	0,401	30,4	1,25E-04	0,341
	17,5	34,6	1,89E-04	0,372	29,2	1,20E-04	0,311
	20	33,9	1,87E-04	0,346	28,2	1,17E-04	0,285

Aplicando a sequência de raciocínio da seção anterior, foram elaboradas as **Tabelas 4.11 e 4.12**, e seus respectivos **Gráficos 4.3 e 4.4**, para comprovar que a variação da espessura da camada de base, não aumenta significativamente o número de solicitações admissíveis da estrutura.

Tabela 4.11 - N_{adm} para diferentes espessuras de base e revestimento de 10 cm (Base de Escória)

		$N_{PROJETO} = 5 \times 10^7$ (Base de Escória)		
Parâmetros	Espessura da Base (cm)	15	17,5	20
	Modelo	$N_{adm,15}$	$N_{adm,17,5}$	$N_{adm,20}$
et	Fontes (2009) - Revest. Convencional	1,89E+06	2,04E+06	2,09E+06
	Fontes (2009) - Revest. Asfalto-borracha	6,34E+06	6,96E+06	7,41E+06
	Pinto (1991)	1,37E+07	1,43E+07	1,46E+07
	Brown (1977)	2,79E+06	3,05E+06	3,14E+06
	δ	USACE	4,03E+08	4,43E+08
$\delta_{subleito}$	Klomp (1962)	4,36E+25	5,12E+27	6,84E+29

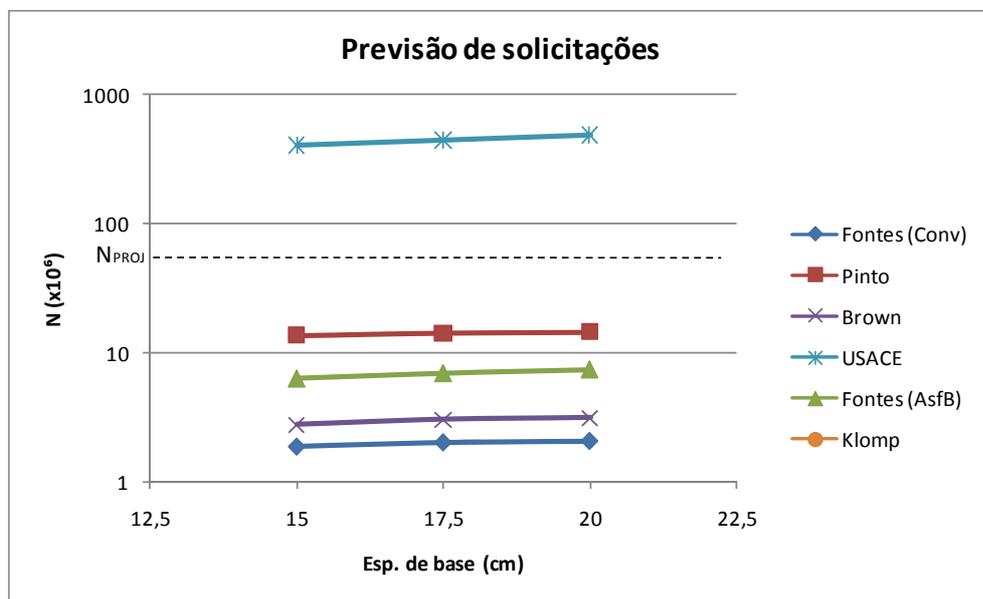


Gráfico 4.3 - Previsão de solicitações para base de escória com revestimento de 10 cm – Tráfego Pesado

Analisando quando há escória na base, a Tabela 4.11 mostra que 10 cm de revestimento convencional não atende ao tráfego, assim como quando é aplicado asfalto-borracha nesta camada.

Tabela 4.12 - N_{adm} para diferentes espessuras de base e revestimento de 10 cm (Base de Escória/Solo)

		NPROJETO = 5×10^7 (Base de Escória/Solo)		
Parâmetros	Espessura da Base (cm)	15	17,5	20
	Modelo	Nadm,15	Nadm,17,5	Nadm,20
et	Fontes (2009) - Revest. Convencional	8,45E+06	9,73E+06	1,13E+07
	Fontes (2009) - Revest. Asfalto-borracha	8,03E+07	1,02E+08	1,19E+08
	Pinto (1991)	3,59E+07	3,93E+07	4,32E+07
	Brown (1977)	1,71E+07	2,03E+07	2,43E+07
	δ	USACE	8,75E+08	1,09E+09
$\delta_{subleito}$	Klomp (1962)	1,66E+30	1,60E+33	2,44E+36

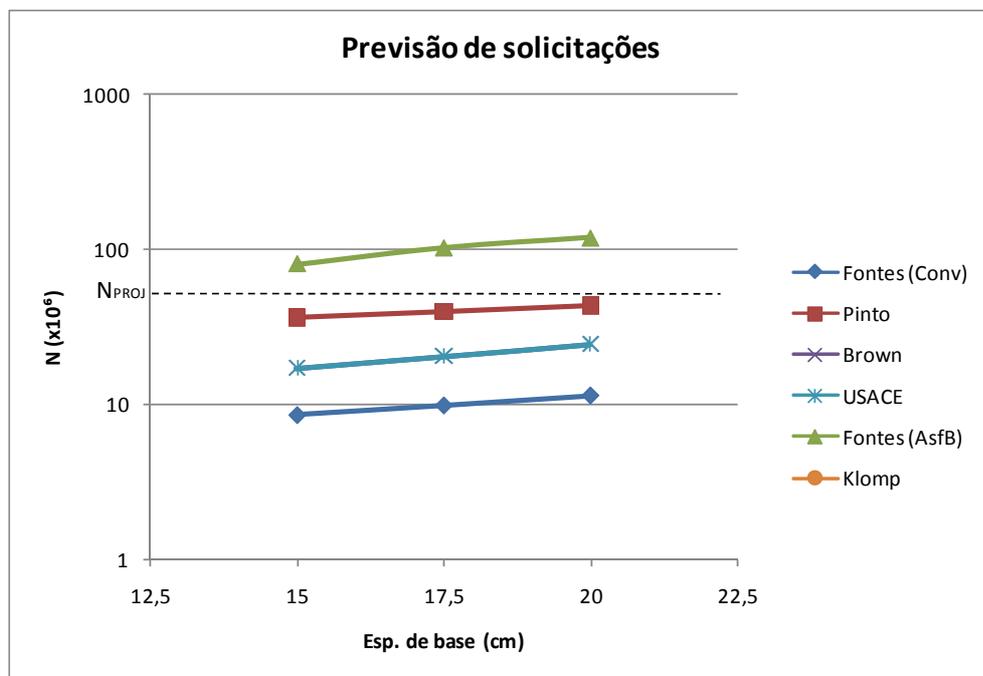


Gráfico 4.4 - Previsão de solicitações para base de escória/solo com revestimento de 10 cm – Tráfego Pesado

Tendo como referência Fontes,2009, é possível concluir que quando a camada de base é executada com a mistura escória/solo, os 10 cm de revestimento convencional não atende ao tráfego de projeto. Porém, quando nesta camada são utilizados 10 cm de asfalto-borracha, a espessura atende com folga as solicitações previstas, podendo ser reduzida para uma análise mais econômica.

4.3.3 Variação da espessura do revestimento

Observou-se que realizando a variação de espessura das camadas de base, a partir de um determinado instante, o aumento da mesma não diminui as deformações por tração no revestimento. Pensando nisto, resolveu-se formular tabelas e gráficos como os anteriores, mas nesta análise foram mantidas constantes as espessuras das camadas de base e sub-base conforme o método do DNER/81, variando somente a espessura do revestimento. Isto, com o intuito de diminuir as deformações de tração no revestimento; e assim, segundo os autores que formularam a previsão de sollicitação a partir destas deformações, verificar se o $N_{Projeto}$ é menor que o N_{adm} .

A **Tabela 4.13** representa os resultados obtidos a partir do programa Elsym5 em função da variação da espessura do revestimento para o tráfego médio segundo o item 4.2.1, tanto para a escória, como para a mistura de escória/solo na camada de base. E ainda, modificando o revestimento entre, convencional e asfalto-borracha. Aplicando os métodos de previsão de sollicitações a partir dos parâmetros encontrados na **Tabela 4.13**, formulou-se a **Tabela 4.14** e o **Gráfico 4.5** que representa quando há escória como material na camada de base. Seguindo este procedimento, elaborou-se a **Tabela 4.15** e o **Gráfico 4.6**, quando a base é formada por escória e solo.

Tabela 4.13 - Dados Elsym5 para diferentes espessuras de revestimento e base com 17,5 cm

Tipo do revestimento	Espessura do revestimento (cm)	Base de Escória			Base de Escória / Solo		
		δ ($\times 10^{-2}$ mm)	e_t (cm/cm)	σ_s (kgf/cm ²)	δ ($\times 10^{-2}$ mm)	e_t (cm/cm)	σ_s (kgf/cm ²)
Convencional (Base de 17,5 cm)	5	43,6	2,33E-04	0,490	34,9	1,18E-04	0,398
	7	38,4	2,07E-04	0,429	31,8	1,24E-04	0,352
	9	34,9	1,79E-04	0,374	29,2	1,17E-04	0,312
	11	31,7	1,53E-04	0,326	27,0	1,06E-04	0,276
	13	28,9	1,31E-04	0,285	25,2	9,49E-05	0,245
Asfalto borracha (Base de 17,5 cm)	5	45,0	2,50E-04	0,502	35,8	1,14E-04	0,410
	7	40,0	2,31E-04	0,444	32,8	1,28E-04	0,365
	9	36,1	2,03E-04	0,391	30,3	1,24E-04	0,325
	9,5	35,3	1,96E-04	0,379	29,7	1,23E-04	0,316
	10	34,5	1,89E-04	0,367	29,2	1,20E-04	0,307

Tabela 4.14 - N_{adm} para diferentes espessuras de revestimento e base de 17,5 cm (Base de Escória)

		$N_{PROJETO} = 5 \times 10^6$ (Base de Escória)						
Parâmetros	Espessura da Base (cm)	5	7	9	9,5	10	11	13
	Modelo	$N_{adm,5}$	$N_{adm,7}$	$N_{adm,9}$	$N_{adm,9,5}$	$N_{adm,10}$	$N_{adm,11}$	$N_{adm,13}$
et	Fontes (2009) - Revest. Convencional	5,06E+05	8,16E+05	1,47E+06	-	-	2,76E+06	5,17E+06
	Fontes (2009) - Revest. Asfalto-borracha	1,33E+06	2,12E+06	4,56E+06	5,61E+06	6,96E+06	-	-
	Pinto (1991)	5,85E+06	5,71E+08	1,16E+07	-	-	1,75E+07	2,61E+07
	Brown (1977)	5,61E+05	1,00E+06	2,04E+06	-	-	4,41E+06	9,44E+06
	δ	USACE	1,06E+08	2,08E+08	3,45E+08	-	-	5,76E+08
$\sigma_{subleito}$	Klomp (1962)	3,65E+19	3,53E+22	1,18E+26	-	-	1,33E+30	4,59E+34

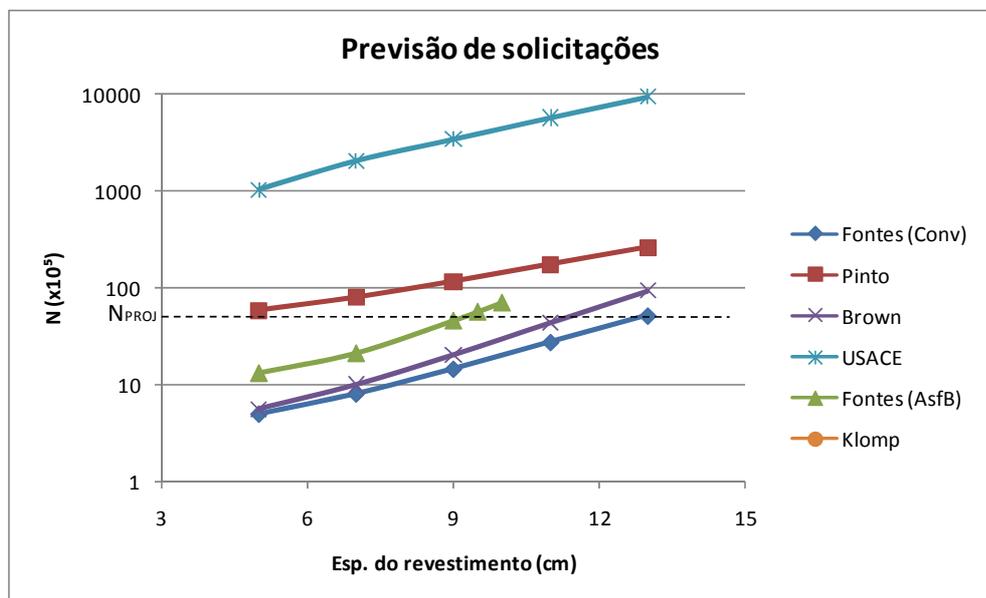


Gráfico 4.5 - Previsão de solicitações para base de escória de 17,5 cm e com variação de revestimento – Tráfego Médio

Para o tráfego médio com revestimento convencional e base de 17,5 cm de escória, nota-se que são necessários 13,0 cm de mistura. No entanto, se este revestimento fosse executado com asfalto-borracha, o mesmo teria 9,5 cm de espessura. Reduzindo assim 3,5 cm do revestimento.

Tabela 4.15 - N_{adm} para diferentes espessuras de revestimento e base de 17,5 cm (Base de Escória/Solo)

		$N_{PROJETO} = 5 \times 10^6$ (Base de Escória/Solo)						
Parâmetros	Espessura da Base (cm)	5	7	9	9,5	10	11	13
	Modelo	$N_{adm,5}$	$N_{adm,7}$	$N_{adm,9}$	$N_{adm,9,5}$	$N_{adm,10}$	$N_{adm,11}$	$N_{adm,13}$
et	Fontes (2009) - Revest. Convencional	7,88E+06	6,45E+06	8,16E+06	-	-	1,22E+07	1,90E+07
	Fontes (2009) - Revest. Asfalto-borracha	1,38E+08	6,98E+07	8,42E+07	8,83E+07	1,02E+08	-	-
	Pinto (1991)	3,43E+07	3,02E+07	3,51E+07	-	-	4,53E+07	6,04E+07
	Brown (1977)	1,57E+07	1,23E+07	1,64E+07	-	-	2,66E+07	4,58E+07
δ	USACE	3,45E+08	5,66E+08	8,91E+08	-	-	1,35E+09	1,95E+09
$\delta_{subleito}$	Klomp (1962)	2,60E+24	6,20E+27	3,46E+31	-	-	6,89E+35	3,58E+40

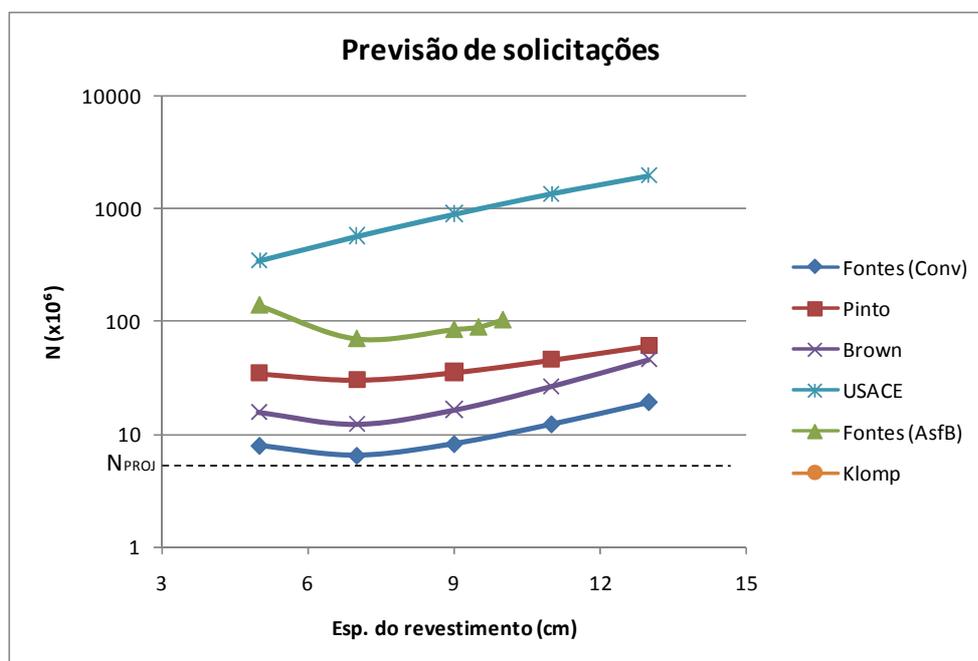


Gráfico 4.6 - Previsão de solicitações para base de escória/solo de 17,5 cm e com variação de revestimento – Tráfego Médio

Quando há a mistura Escória/Solo como base, a espessura de revestimento convencional de 5,0 cm atenderia ao tráfego. Portanto, se ao invés de utilizar somente a escória na camada de base, for adicionado solo a esta, reduz-se em 8,0 cm a espessura da mistura convencional.

Do mesmo modo que foi realizada a análise de suporte da estrutura variando a espessura do revestimento betuminoso para o carregamento de médio porte segundo o item 4.2.1, também será efetuado este procedimento para o item 4.2.2., que prevê um nível de solicitação pesado.

A **Tabela 4.16** representa os resultados obtidos a partir do programa Elsym5 em função da variação da espessura do revestimento para o tráfego pesado, tanto para a escória, como para a mistura escória/solo na camada de base, alterando também, entre revestimento convencional e asfalto-borracha. Aplicando os métodos de previsão de solicitações a partir dos parâmetros encontrados na **Tabela 4.16**, formulou-se a **Tabela 4.17** e o **Gráfico 4.7** que a representa, quando há escória como material na camada de base. Seguindo este entendimento, elaborou-se a **Tabela 4.18** e o **Gráfico 4.8**, quando a base é formada por escória e solo.

Tabela 4.16 - Dados Elsym5 para diferentes espessuras de revestimento e base com 15,0 cm

Tipo do revestimento	Espessura do revestimento (cm)	Base de Escória			Base de Escória / Solo		
		δ ($\times 10^{-2}$ mm)	e^t (cm/cm)	σ_s (kgf/cm ²)	δ ($\times 10^{-2}$ mm)	e^t (cm/cm)	σ_s (kgf/cm ²)
Convencional (Base de 15,0 cm)	8	37,4	1,96E-04	0,439	31,7	1,26E-04	0,370
	10	33,9	1,68E-04	0,380	29,3	1,16E-04	0,325
	12	30,8	1,44E-04	0,329	27,0	1,04E-04	0,286
	14	28,2	1,24E-04	0,287	25,1	9,29E-05	0,253
	16	25,9	1,08E-04	0,251	23,5	8,28E-05	0,224
	18	24,0	9,57E-05	0,222	22,1	7,49E-05	0,199
	20	22,5	8,49E-05	0,196	20,8	6,78E-05	0,178
	22	21,1	7,56E-05	0,175	-	-	-
	23	20,5	7,14E-05	0,165	-	-	-
Asfalto borracha (Base de 15,0 cm)	8	38,7	2,20E-04	0,458	32,8	1,33E-04	0,385
	10	35,3	1,92E-04	0,401	30,4	1,25E-04	0,341
	12	32,3	1,67E-04	0,351	28,2	1,14E-04	0,303
	14	29,7	1,45E-04	0,309	26,4	1,03E-04	0,270
	15	28,6	1,35E-04	0,290	25,6	9,77E-05	0,255
	16	27,6	1,27E-04	0,273	24,8	9,25E-05	0,241
	18	25,7	1,13E-04	0,242	23,4	8,41E-05	0,216

Tabela 4.17 - N_{adm} para diferentes espessuras de revestimento e base de 15,0 cm (Base de Escória)

NPROJETO = 5×10^7		(Base de Escória)									
Parâmetros	Espessura da Base (cm)	Modelo									
		Nadm,8	Nadm,10	Nadm,12	Nadm,14	Nadm,15	Nadm,16	Nadm,18	Nadm,20	Nadm,22	Nadm,23
et	Fontes (2009) - Revest. Convencional	1,02E+06	1,89E+06	3,53E+06	6,45E+06	-	1,13E+07	1,84E+07	2,98E+07	4,76E+07	5,99E+07
	Fontes (2009) - Revest. Asfalto-borracha	2,83E+06	6,34E+06	1,45E+07	3,34E+07	5,09E+07	-	-	-	-	-
et	Pinto (1991)	9,17E+06	1,37E+07	2,04E+07	3,02E+07	-	4,32E+07	5,91E+07	8,07E+07	1,09E+08	1,27E+08
	Brown (1977)	1,31E+06	2,79E+06	5,93E+06	1,23E+07	-	2,43E+07	4,39E+07	7,90E+07	1,40E+08	1,85E+08
δ	USACE	2,39E+08	4,03E+08	6,71E+08	1,07E+09	-	1,69E+09	2,53E+09	3,57E+09	5,02E+09	5,85E+09
$\sigma_{subleito}$	Klomp (1962)	1,00E+22	4,36E+25	6,84E+29	2,57E+34	-	3,55E+39	8,01E+44	1,12E+51	2,22E+57	8,11E+60

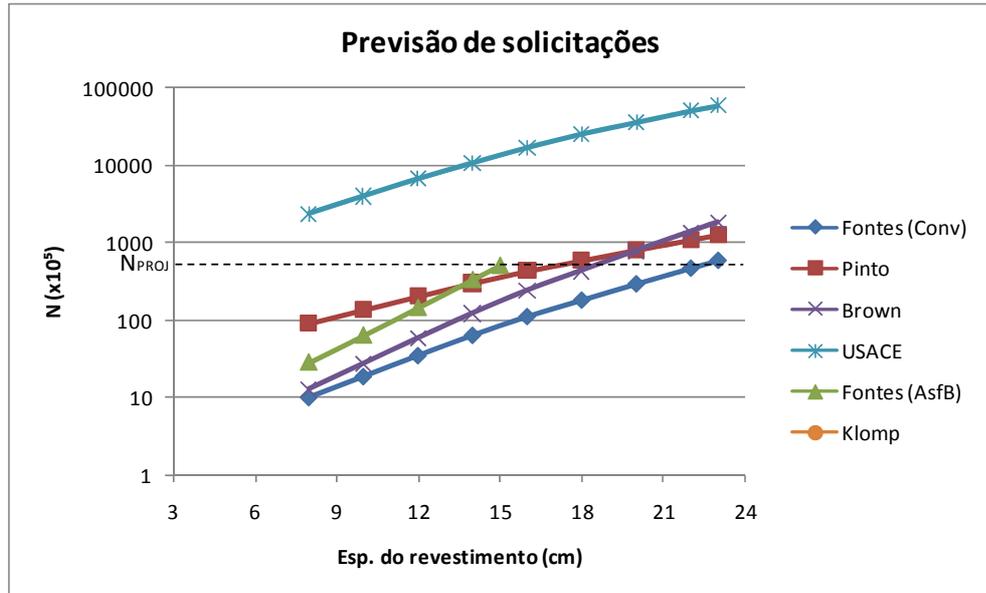


Gráfico 4.7 - Previsão de solicitações para base de escória de 15,0 cm e com variação de revestimento – Tráfego Pesado

É possível concluir a partir da **Tabela 4.17** que para base de 15,0 de escória, são necessários 23,0 cm de revestimento convencional para atender ao tráfego pesado. Entretanto, se esta camada fosse executada com asfalto-borracha, a espessura da mesma diminuiria para 15 cm.

Tabela 4.18 - N_{adm} para diferentes espessuras de revestimento e base de 15,0 cm (Base de Escória/Solo)

		$N_{PROJETO} = 5 \times 10^7$ (Base de Escória/Solo)							
Parâmetros	Espessura da Base (cm)	8	10	12	14	15	16	18	20
	Modelo	$N_{adm,8}$	$N_{adm,10}$	$N_{adm,12}$	$N_{adm,14}$	$N_{adm,15}$	$N_{adm,16}$	$N_{adm,18}$	$N_{adm,20}$
et	Fontes (2009) - Revest. Convencional	6,05E+06	8,45E+06	1,31E+07	2,07E+07	-	3,29E+07	4,94E+07	7,38E+07
	Fontes (2009) - Revest. Asfalto-borracha	5,56E+07	8,03E+07	1,38E+08	2,52E+08	5,09E+07	-	-	-
	Pinto (1991)	2,89E+07	3,59E+07	4,76E+07	6,39E+07	-	8,62E+07	1,12E+08	1,45E+08
	Brown (1977)	1,14E+07	1,71E+07	2,92E+07	5,08E+07	-	8,93E+07	1,46E+08	2,38E+08
	δ	USACE	5,76E+08	8,75E+08	1,35E+09	1,99E+09	-	2,83E+09	3,92E+09
$\sigma_{subleito}$	Klomp (1962)	2,35E+26	1,66E+30	3,43E+34	1,68E+39	-	3,09E+44	1,81E+50	2,27E+56

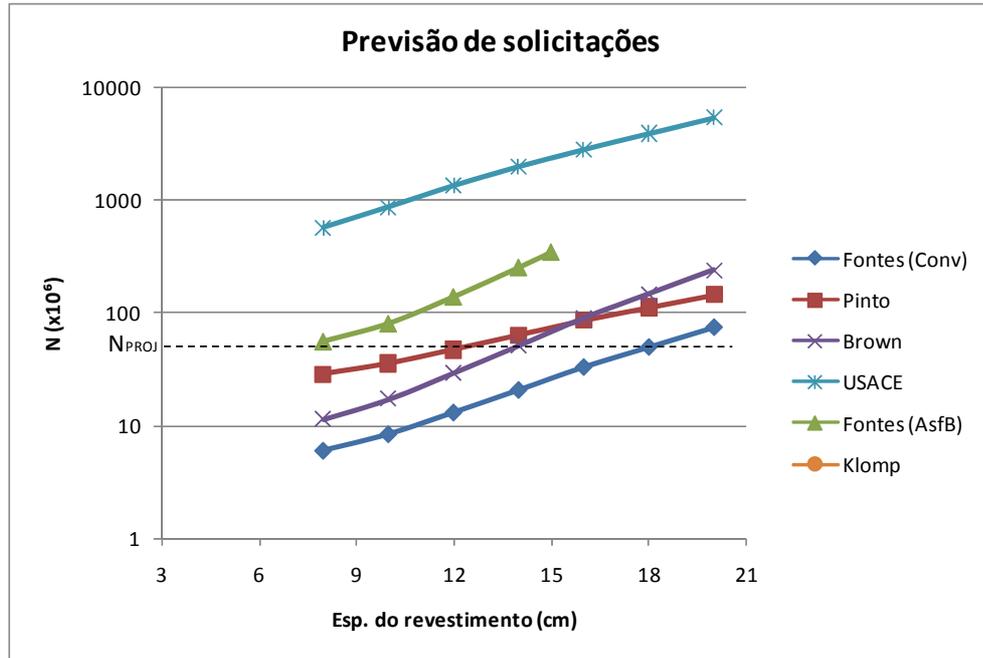


Gráfico 4.8 - Previsão de solicitações para base de escória/solo de 15,0 cm e com variação de revestimento – Tráfego Pesado

Para o tráfego pesado com revestimento convencional e base de 15,0 cm de escória, nota-se da **Tabela 4.18** que são necessários 18,0 cm de mistura. Porém, se este revestimento fosse executado com asfalto-borracha, bastaria apenas 8,0 cm de espessura. Reduzindo assim 10,0 cm do revestimento.

Assim, como os resultados obtidos para o nível de solicitação médio, para o tráfego pesado houve uma redução na camada de revestimento decorrente da utilização na camada de base à mistura Escória/Solo, esta redução foi de 23,0 cm para 18,0 cm quando utilizado revestimento convencional e de 15,0 cm para 8,0 cm quando o revestimento empregado for asfalto-borracha. Podendo afirmar assim, que haveria uma diminuição do revestimento em função da adição de solo à camada de base com escória. E assim, diminuir o custo na execução.

4.3.4 Análise para estruturas menos espessas

Este item desenvolverá algumas variações de espessura na estrutura, tanto para o revestimento, quanto para a camada de base. Para o tráfego médio, na **Tabela 4.19** são apresentados os resultados dos parâmetros para algumas destas composições de estrutura. Já as **Tabelas 4.20** e **4.21**, respectivamente, quando utilizada escória e mistura escória/solo de

base, representam a verificação para as referidas seções, se as mesmas suportam as solicitações de projeto.

Tabela 4.19 - Dados Elsym5 para diferentes estruturas – Tráfego médio

Tipo do revestimento	Nº da análise	Espessura do revestimento (cm)	Espessura da base (cm)	Espessura da Sub-base (cm)	Base de Escória			Base de Escória / Solo		
					δ ($\times 10^{-2}$ mm)	e_t (cm/cm)	σ_s (kgf/cm ²)	δ ($\times 10^{-2}$ mm)	e_t (cm/cm)	σ_s (kgf/cm ²)
Convencional	1	5,0	15,0	19,5	44,5	2,36E-04	0,535	36,5	1,23E-04	0,443
	2	7,5	17,5	19,5	37,5	2,00E-04	0,415	31,1	1,23E-04	0,342
	3	12,5	15,0	19,5	30,1	1,38E-04	0,314	26,5	1,01E-04	0,274
	4	13,0	17,5	19,5	28,9	1,31E-04	0,285	25,2	9,49E-05	0,245
	5	13,5	15,0	19,5	28,8	1,28E-04	0,293	25,5	9,56E-05	0,257
Asfalto borracha	6	5,0	15,0	19,5	46,0	2,53E-04	0,548	37,4	1,19E-04	0,456
	7	7,5	17,5	19,5	38,9	2,24E-04	0,431	32,1	1,28E-04	0,355
	8	9,0	20,0	19,5	35,5	2,01E-04	0,363	29,2	1,21E-04	0,297
	9	9,5	15,0	19,5	36,0	1,99E-04	0,409	30,9	1,28E-04	0,347
	10	9,5	17,5	19,5	35,3	1,96E-04	0,379	29,7	1,23E-04	0,316

Tabela 4.20 - N_{adm} para diferentes previsões (Escória) – Tráfego médio

		NPROJETO=5x10 ⁶ (Base de Escória)									
Parâmetros	Nº da Análise	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
et	Modelo										
	Fontes (2009) - Revest. Convencional	4,81E+05	9,37E+05	4,19E+06	5,17E+06	5,68E+06	-	-	-	-	-
	Fontes (2009) - Revest. Asfalto-borracha	-	-	-	-	-	1,24E+06	2,55E+06	4,83E+06	5,13E+06	5,61E+06
	Pinto (1991)	5,66E+06	8,70E+06	2,28E+07	2,61E+07	2,78E+07	-	-	-	-	-
	Brown (1977)	5,27E+05	1,19E+06	7,31E+06	9,44E+06	1,06E+07	-	-	-	-	-
δ	USACE	9,48E+07	2,36E+08	7,59E+08	9,42E+08	9,59E+08	-	-	-	-	-
$\sigma_{subleito}$	Klomp (1962)	6,27E+17	2,27E+23	2,13E+31	4,59E+34	4,75E+33	-	-	-	-	-

Tabela 4.21 - N_{adm} para diferentes previsões (Escória/Solo) – Tráfego médio

		NPROJETO=5x10 ⁶ (Base de Escória/Solo)									
Parâmetros	Nº da Análise	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
et	Modelo										
	Fontes (2009) - Revest. Convencional	6,67E+06	6,67E+06	1,48E+07	1,90E+07	1,84E+07	-	-	-	-	-
	Fontes (2009) - Revest. Asfalto-borracha	-	-	-	-	-	1,07E+08	6,98E+07	9,73E+07	6,98E+07	8,83E+07
	Pinto (1991)	3,08E+07	3,08E+07	5,14E+07	6,04E+07	5,93E+07	-	-	-	-	-
	Brown (1977)	1,28E+07	1,28E+07	3,37E+07	4,58E+07	4,42E+07	-	-	-	-	-
δ	USACE	2,72E+08	6,37E+08	1,49E+09	1,95E+09	1,83E+09	-	-	-	-	-
$\sigma_{subleito}$	Klomp (1962)	6,16E+21	4,43E+28	1,29E+36	3,58E+40	3,92E+38	-	-	-	-	-

Quando a estrutura for constituída com base de escória e revestimento convencional, a **Tabela 4.20** representa a estrutura que suportaria o tráfego de projeto, que seria 13,0 cm de revestimento, 17,5 cm de base e 19,5 cm de sub-base. Esta tabela mostra também, que utilizando-se a mesma base, mas modificando o revestimento para asfalto-borracha, a espessura de revestimento diminuiria para 9,5 cm, e base para 15,0 cm. Quando misturado solo à escória, a estrutura com 5,0 cm de revestimento convencional, 15,0 cm de base e a

mesma sub-base, suporta o mesmo tráfego da considerada quando há somente escória na base. Como 5,0 cm de revestimento convencional já suportam o tráfego solicitado, não compensa utilizar asfalto-borracha para execução do mesmo.

Pode-se notar para o tráfego médio, que há uma redução de 8,0 cm de revestimento convencional quando utilizada a mistura escória/solo.

Para o tráfego pesado, será realizado o mesmo procedimento, alterando a espessura do revestimento e da base. Com auxílio do programa Elsym5, foram determinados os parâmetros necessários para verificar se esta estrutura suporta o nível de carregamento que lhe foi atribuído quando em projeto, os resultados dos mesmos podem ser visualizados na **Tabela 4.22**. A partir destes resultados, foi verificado nas **Tabelas 4.23 e 4.24** se a estrutura resiste ao número de solicitações calculado em projeto.

Tabela 4.22 - Dados Elsym5 para diferentes estruturas – Tráfego pesado

Tipo do revestimento	Nº da análise	Espessura do revestimento (cm)	Espessura da base (cm)	Espessura da Sub-base (cm)	Base de Escória			Base de Escória / Solo		
					δ ($\times 10^{-2}$ mm)	e_t (cm/cm)	σ_s (kgf/cm ²)	δ ($\times 10^{-2}$ mm)	e_t (cm/cm)	σ_s (kgf/cm ²)
Convencional	1	10,0	15,0	19,0	33,9	1,68E-04	0,380	29,3	1,16E-04	0,325
	2	15,0	17,5	19,0	26,6	1,14E-04	0,253	23,6	8,45E-05	0,220
	3	17,0	20,0	19,0	24,3	9,96E-05	0,211	21,6	7,37E-05	0,183
	4	20,0	20,0	19,0	22,0	8,31E-05	0,178	19,9	6,37E-05	0,157
	5	23,0	15,0	19,0	20,5	7,14E-05	0,165	19,2	5,84E-05	0,152
Asfalto borracha	6	8,0	20,0	19,0	37,3	2,15E-04	0,392	30,4	1,24E-04	0,318
	7	10,0	15,0	19,0	35,3	1,92E-04	0,401	30,4	1,25E-04	0,341
	8	15,0	15,0	19,0	28,6	1,35E-04	0,290	25,6	9,77E-05	0,255
	9	17,5	15,0	19,0	26,2	1,16E-04	0,250	23,7	8,60E-05	0,222
	10	20,0	20,0	19,0	23,6	9,84E-05	0,194	21,2	7,17E-05	0,170

Tabela 4.23 - N_{adm} para diferentes previsões (Escória) – Tráfego pesado

Parâmetros	Mbdelo	Nº da Análise	NPROJETO= 5x10 ⁷ (Base de Escória)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fontes (2009) - Revest. Convencional			1,89E+06	9,06E+06	1,56E+07	3,25E+07	5,99E+07	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-	3,25E+06	6,34E+06	5,09E+07	1,25E+08	3,30E+08
Fontes (2009) - Revest. Asfalto-borracha			1,37E+07	3,75E+07	5,33E+07	8,54E+07	1,27E+08	-	-	-	-	-
			2,79E+06	1,86E+07	3,61E+07	8,78E+07	1,85E+08	-	-	-	-	-
δ	USACE		4,03E+08	1,46E+09	2,37E+09	4,02E+09	5,85E+09	-	-	-	-	-
			4,36E+25	1,68E+39	2,08E+47	2,27E+56	8,11E+60	-	-	-	-	-
$\sigma_{subleito}$	Klomp (1962)		4,36E+25	1,68E+39	2,08E+47	2,27E+56	8,11E+60	-	-	-	-	-

Tabela 4.24 - N_{adm} para diferentes previsões (Escória/Solo) – Tráfego pesado

Parâmetros	Modelo	NPROJETO=5x10 ⁷ (Base de Escória/Solo)										
		Nº da Análise	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
et	Fontes (2009) - Revest. Convencional		8,45E+06	3,03E+07	5,27E+07	9,49E+07	1,35E+08	-	-	-	-	-
	Fontes (2009) - Revest. Asfalto-borracha		-	-	-	-	-	8,42E+07	8,03E+07	3,45E+08	7,33E+08	2,15E+09
	Pinto (1991)		3,59E+07	8,17E+07	1,17E+08	1,70E+08	2,14E+08	-	-	-	-	-
	Brown (1977)		1,71E+07	8,09E+07	1,58E+08	3,23E+08	4,94E+08	-	-	-	-	-
	δ	USACE		8,75E+08	2,77E+09	4,43E+09	6,85E+09	8,29E+09	-	-	-	-
Osubleito	Klomp (1962)		1,66E+30	2,11E+45	5,99E+54	1,22E+64	1,74E+66	-	-	-	-	-

Comparando a estrutura quando utilizado revestimento convencional e base de Escória, com outra com o mesmo revestimento, mas com base de mistura Escória/Solo, notou-se de acordo com as **Tabelas 4.23 e 4.24**, que a espessura do revestimento diminui em 5,0 cm com a adição do solo, e a da base aumento em 5,0 cm. Contudo, como o preço do revestimento é superior ao da base, a execução ficará mais econômica em função disto. Quando comparando estas duas bases com revestimento de asfalto-borracha, a diminuição é de 7,0 cm no revestimento, contudo, a base passaria a ter um acréscimo de espessura de 5,0 cm.

Na **Tabela 4.25** será apresentado o resumo das melhores combinações das estruturas dimensionadas pela Análise Mecanicista para o tráfego médio e pesado. Estas estruturas serão avaliadas quanto ao seu preço no Capítulo 6, para então, analisar qual estrutura é mais econômica para os dois tráfegos.

Tabela 4.25 - Resumo das estruturas dimensionadas pela Análise Mecanicista

Nível de Tráfego	Camadas				
	Revestimento (cm)		Base (cm)		Subleito (cm)
	Convencional	Asfalto Borracha	Escória	Escória/Solo	Macadame Seco
Médio	13,0	-	17,5	-	19,5
	5,0	-	-	15,0	19,5
	-	9,5	15,0	-	19,5
Pesado	23,0	-	15,0	-	19,0
	17,0	-	-	20,0	19,0
	-	15,0	15,0	-	19,0
	-	8,0	-	20,0	19,0

Com o intuito de comparar a primeira avaliação prevista, que se trata do custo da Escória de Aciaria em relação ao da Brita Graduada, foi consultada a tabela de Preço Referencial de Serviços do DER-ES, em relação a Maio de 2009, e BDI de 35,00%; onde cita:


 Tabela Referencial Maio 2009
 Valores com BDI de 35,00 %

Data Base: Maio/2009

Grupo de Serviço: 2 - PAVIMENTAÇÃO

Código	Serviço	Unidade	Preço Unitário	Transporte
13.02.013	Base de escória/argila na proporção 80:20, inclusive aquisição, carga e transporte da argila e da escória	M3	22,98	*
13.02.046	Base de solo brita 80% em peso inclusive transporte da brita	M3	53,94	*

Figura 4.13 - Tabela Referencial - DER-ES

Considerando que a distância de transporte para os dois materiais é a mesma, vê-se conforme a **Figura 4.13**, que o custo de aquisição da Brita Graduada é de R\$ 53,94 por metro cúbico, enquanto que para a Escória de Aciaria este valor é de R\$ 22,98 para a mesma quantidade. A **Tabela 4.26**, exibirá algumas dimensões para executar um pavimento em função de volumes de tráfego calculados pelo USACE. A **Tabela 4.27**, representa uma comparação de custos para aquisição dos materiais acima citados, para realizar um quilômetro de projeto, com largura de 10 metros e espessura da camada de base conforme as calculadas para os tráfegos segundo o método do DNER/81 do Capítulo 4.

Tabela 4.26 - Consumo por km de projeto

CONSUMO PARA UM QUILOMETRO DE PROJETO			
Volume de Tráfego	B (m) (Esp. da Base)	Largura (m)	Volume (m³)
$N_{8,2t}=5,00 \times 10^6$	0,175	10,0	1750,0
$N_{8,2t}=5,00 \times 10^7$	0,150	10,0	1500,0

Tabela 4.27 - Comparação de custos iniciais

Comparação de Custos iniciais				
Volume (m³)	Preço Unitário		Preço Total	
	13.02.013*	13.02.046**	13.02.013*	13.02.046**
1750,0	R\$ 22,98	R\$ 53,94	R\$ 40.215,00	R\$ 94.395,00
1500,0	R\$ 22,98	R\$ 53,94	R\$ 34.470,00	R\$ 80.910,00

Fonte: DER-ES
 13.02.013* = Base de escória/argila na proporção 80:20, inclusive aquisição, carga e transporte da argila e da escória
 13.02.046** = Base de solo brita 80% em peso, inclusive transporte da brita

Utilizando os preços unitários do DER-ES para as camadas e base, e os da **Figura 4.15** (DER-PR) para os revestimentos, montou-se a **Tabela 4.28** com as melhores combinações estruturais dimensionadas pela Análise Mecanicista, conforme a **Tabela 4.25**. Para assim, analisar qual estrutura apresenta menor preço para aquisição.

Como a Escória de Aciaria deste trabalho foi produzida no Estado do Espírito Santo, pensou-se em adotar todos os preços do DER deste. Porém, como não havia preço para a camada de asfalto-borracha no DER-ES, optou-se por utilizar os valores do DER-PR para os revestimentos. A data base para ambos os órgãos foi de maio/09, sendo que o BDI do DER-ES é de 35%, e do DER-PR de 30%.

A taxa de consumo do CAP-50/70 segundo o DER-PR é de 5,7%, já para o asfalto-borracha é de 7,0%. A seção transversal genérica que representar as medidas utilizadas para montar a **Tabela 4.28** é mostrada na **Figura 4.14**.

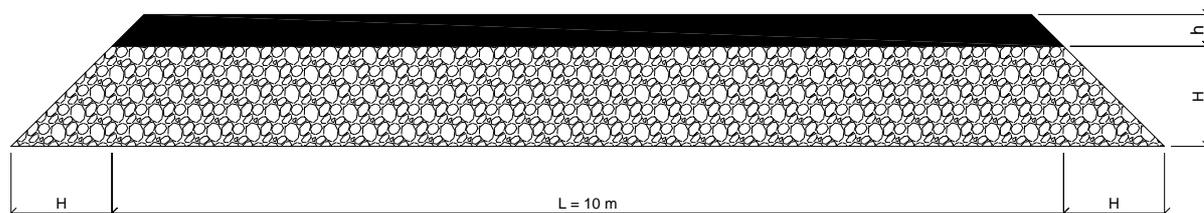


Figura 4.14 - Seção Genérica

DER-PR - Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná		21/05/2009 - 17:19:15						
Diretoria Técnica - Coordenadoria de Custo e Orçamento								
Relatório de Composição do Serviço		Página: 136 de 159						
Data Base: 15/05/2009		Valores expressos em Reais (R\$)						
Serviço: 58900 Fornecimento de CAP-50/70		Unidade: t						
(A) Equipamento	Código	CT	Qtde.	Ut. Pr.	Ut. Imp	Vi. Hr. Prod	Vi. Hr. Imp.	Custo Horário
(A) Total:								0,00
(B) Mao-de-Obra	Código	Eq. Salarial	Consumo		Sal/Hora	Custo Horário		
(B) Total:								0,00
(C) Itens de Incidência	Código	%	M. O.	Mat.	Equip.	Custo		
(C) Total:								0,00
Custo Horário da Execução (A) + (B) + (C)								0,00
(D) Produção da Equipe	1,00	(E) Custo Unitário da Execução [(A) + (B) + (C)] / (D)						0,00
(F) Materiais	Código	Unid.	Custo Unitário	Consumo		Custo Unitário		
Cimento asfáltico CAP-50/70	17050	t	1.180,00	1,0000		1.180,00		
(F) Total:								1.180,00
(G) Serviços	Código	Unid.	Custo Unitário	Consumo		Custo Unitário		
(G) Total:								0,00
(H) Itens de Transporte	Código	Unid.	Fórmula	X1	X2	Custo	Consumo	Custo Unit.
(H) Total:								0,00
Custo Direto Total (E) + (F) + (G) + (H)								1.180,00
Bonificação: 30,00%								354,00
Preço Unitário Total								1.534,00

DER-PR - Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná		21/05/2009 - 17:19:15						
Diretoria Técnica - Coordenadoria de Custo e Orçamento								
Relatório de Composição do Serviço		Página: 135 de 159						
Data Base: 15/05/2009		Valores expressos em Reais (R\$)						
Serviço: 58905 Fornecimento de asfalto modificado por borracha		Unidade: t						
(A) Equipamento	Código	CT	Qtde.	Ut. Pr.	Ut. Imp	Vi. Hr. Prod	Vi. Hr. Imp.	Custo Horário
(A) Total:								0,00
(B) Mao-de-Obra	Código	Eq. Salarial	Consumo		Sal/Hora	Custo Horário		
(B) Total:								0,00
(C) Itens de Incidência	Código	%	M. O.	Mat.	Equip.	Custo		
(C) Total:								0,00
Custo Horário da Execução (A) + (B) + (C)								0,00
(D) Produção da Equipe	1,00	(E) Custo Unitário da Execução [(A) + (B) + (C)] / (D)						0,00
(F) Materiais	Código	Unid.	Custo Unitário	Consumo		Custo Unitário		
Asfalto modificado por borracha	17060	t	1.418,41	1,0000		1.418,41		
(F) Total:								1.418,41
(G) Serviços	Código	Unid.	Custo Unitário	Consumo		Custo Unitário		
(G) Total:								0,00
(H) Itens de Transporte	Código	Unid.	Fórmula	X1	X2	Custo	Consumo	Custo Unit.
(H) Total:								0,00
Custo Direto Total (E) + (F) + (G) + (H)								1.418,41
Bonificação: 30,00%								425,52
Preço Unitário Total								1.843,93

Figura 4.15 - Tabela Referencial - DER-PR

Tabela 4.28 - Preço para as diferentes estruturas otimizadas

Nível de Tráfego	Espessuras (cm)						Preço para execução de 1 quilometro										Preço Total
	Revestimento		Base		Volume Revest. (m³)	Volume Base (m³)	Preço Unitário (R\$)					Preço por material (R\$)					
	Convencional	Asfalto Borracha	Escória	Escória/Solo			13.03.031 (t)*	17050 (t)**	17060 (t)***	13.02.028 (m³)****	13.02.013 (m³)*****	13.03.031	17050	17060	13.02.028	13.02.013	
Médio	13	-	17,5	-	1.300	1.781	183,60	1.534,00	1.843,93	24,17	22,98	572.832,00	272.806,56	-	43.037,71	-	RS 888.676,27
	5	-	-	15	950	1.524	183,60	1.534,00	1.843,93	24,17	22,98	220.320,00	104.925,60	-	36.245,58	-	RS 360.491,18
	-	9,5	-	-	500	1.523	183,60	1.534,00	1.843,93	24,17	22,98	418.608,00	-	294.291,23	36.798,83	-	RS 749.698,05
	23	-	-	-	2.300	1.523	183,60	1.534,00	1.843,93	24,17	22,98	1.013.472,00	482.657,76	-	-	-	RS 1.532.928,99
Pesado	17	-	-	20	1.700	2.060	183,60	1.534,00	1.843,93	24,17	22,98	749.088,00	356.747,04	-	47.338,80	-	RS 1.153.173,84
	-	15	-	-	1.500	1.523	183,60	1.534,00	1.843,93	24,17	22,98	660.960,00	-	464.670,36	36.798,83	-	RS 1.162.429,19
	-	8	-	20	800	2.060	183,60	1.534,00	1.843,93	24,17	22,98	362.512,00	-	247.824,19	-	47.338,80	RS 647.674,99

Nota: * Código da Tabela Referencial do DER - ES para CBUQ (massa asfáltica) inclusive fornecimento e transporte comercial do CAP

** Código da Tabela Referencial do DER - PR para Fornecimento de CAP-50/70

*** Código da Tabela Referencial do DER - PR para Fornecimento de asfalto modificado por borraça

**** Código da Tabela Referencial do DER - ES para Base de escória de adianta, inclusive transporte da escória

***** Código da Tabela Referencial do DER - ES para Base de escória/argila na proporção 80:20, inclusive aquisição, carga e transporte da argila e da escória

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Levando em conta que o foco principal desta pesquisa foi a avaliação do uso da Escória de Aciaria como material integrante na camada de base em pavimentos, o resultado foi satisfatório, pois os valores das suas propriedades mecânicas foram bons.

Um parâmetro preocupante para este agregado siderúrgico é o fato do mesmo possuir comportamento expansivo alto. Porém, como os ensaios laboratoriais realizados apresentaram valores nulos, confirmou-se que o tratamento de redução de expansão realizado na ArcelorMittal Tubarão teve sua finalidade almejada. Tais experimentos também comprovaram que o CBR pode atingir valores próximos ao do material usual para esta camada, a Brita Graduada.

Mesmo havendo igual consumo em volume em relação à Brita Graduada conforme a **Tabela 4.26**, viu-se que seus preços não são os mesmos. Sendo assim, a Escória de Aciaria é aproximadamente 43% mais barata que a Brita Graduada.

Outra avaliação que foi objetivo deste trabalho, diz respeito ao comportamento na escória de aciaria quanto ao módulo resiliente. E esta, também obteve resultados positivos, pois os valores de MR alcançaram valores na ordem de 3.000 kfg/cm² quando utilizado este agregado, caracterizando assim, um material do Grupo B segundo a classificação de Pinto e Preussler, 1976. A mistura de escória e solo também foi analisada para esta metodologia, e seu resultado foi além do esperado, atingindo valores em torno de 7.000 kgf/cm² para tensões medianas, e até 11.000 kgf/cm² para maiores tensões de confinamento e desvio.

Com auxílio da **Tabela 4.28**, verificou-se para o tráfego médio que a estrutura mais econômica seria a com 5 cm em revestimento convencional e 15 cm de base com a mistura Escória/Solo, chegando ao valor de R\$ 360.491,18. Sendo que a estrutura com asfalto-borracha ficou quase duas vezes mais cara, verificando assim, que não é viável utilizar este revestimento para tráfego médio. Notou-se nesta tabela também, que a adição de solo à escória resultou numa economia de R\$ 528.185,09 devido a redução de 8,0 cm na camada do revestimento convencional.

Para o tráfego pesado, a **Tabela 4.28** mostra que ao utilizar revestimento convencional, o preço passa de R\$ 1.532.928,59 para R\$ 1.153.173,84 somente com o incremento de solo à escória. Já para o revestimento com asfalto-borracha, a diferença entre utilizar somente a escória na camada de base, e utilizar a mistura escória/solo para esta camada, é de R\$ 514.754,19. Sendo assim, a estrutura mais econômica para este tráfego é quando há utilização de revestimento com asfalto-borracha e base com mistura escória/solo, sendo o valor para aquisição dos materiais de base e revestimento, de R\$ 647.674,99.

Mostrando assim, que ao empregar solo à escória, há uma significativa economia para execução de uma estrutura a ser pavimentada.

Como a mistura Escória/Solo obteve módulo resiliente superior a duas vezes ao da Escória, este resultado é importante para o dimensionamento pela Análise Mecanicista, resultando assim, em menores espessuras com a adição do solo. Se estas duas composições fossem comparadas seguindo a metodologia tradicional, não haveria diminuição da camada de base com a adição do solo, pois o CBR para as duas é superior a 80%.

Constatou-se ainda, que se deve tomar cuidado ao utilizar o programa Elsym5 para pequenas espessuras de revestimento. Isto, devido aos resultados da tensão de tração na parte inferior da mistura betuminosa, pois os dados obtidos para este parâmetro resultaram valores inferiores a realidade.

6. REFERÊNCIAS

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. **Análise Mecanicista de Pavimentos**. Disponível em: <http://www.ufsm.com.br/engcivil/material_didatico/TRP1001_infraestrutura_de_transp/notas_de_aula/analise_mecanicista_de_pavimentos.pdf>. Acesso em: 20 out 2009.

BERNUCCI, Liedi Légi Bariani. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2007. 501p.

COMPANHIA SIDERÚRGICA DE TUBARÃO – CST. **Acerita, escória de aciaria com redução de expansão**. Disponível em: <<http://www.cst.com.br>>. Acesso em: 20 jun 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Emprego de escória de aciaria em pavimentos rodoviários**. DNER-PRO 263/94. 3 p. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/normas/procedimento.htm>. Acesso em: 14 set 2009.

_____. **Escória de aciaria para pavimentos rodoviários**. DNER-EM 262/94. 4 p. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/normas/especificacaomaterial.htm>. Acesso em: 14 set 2009.

_____. **Manual de Pavimentação**. DNIT. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 278 p. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/download_manuais.htm>. Acesso em: 14 set 2009.

_____. **Manual de Restauração de pavimentos asfálticos**. DNIT. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 310 p. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Restauracao.pdf>. Acesso em: 14 set 2009.

_____. **Solos-compactação utilizando amostras não trabalhadas**. DNER-ME 129/94. 7 p. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/normas/metodo.htm>. Acesso em: 14 set 2009.

_____. **Solos-determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas.** DNER-ME 049/94. 14 p. Disponível em: < http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/normas/metodo.htm>. Acesso em: 14 set 2009.

_____. **Solos-determinação do módulo de resiliência.** DNER-ME 131/94. 8 p. Disponível em: < http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/normas/metodo.htm>. Acesso em: 14 set 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – IBS. **Produção de aço.** Disponível em: < <http://www.ibs.org.br/index.asp>>. Acesso em: 20 jun 2009.

FONTES, L. P. T. da L. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos.** Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil , Universidade Federal de Santa Catarina, 541p, Florianópolis, 2009.

MEDINA, J. de. **Mecânica dos Pavimentos.** Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.

RAPOSO, C. O. L. **Estudo experimental de compactação e expansão de escória de aciaria LD para uso em pavimentação.** Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, 163p, Vitória, 2005.

PINTO, S; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis.** Rio de Janeiro, S Pinto, 259 p. 2002.

ANEXOS

ANEXO A

MT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM**Solos - determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas****Norma rodoviária****Método de Ensaio****DNER-ME 049/94****p. 01/14****RESUMO**

Este documento, que é uma norma técnica, determina o valor relativo do suporte de solos, utilizando-se amostras deformadas não trabalhadas de material que passa na peneira de 19 mm, correspondente à umidade ótima e massa específica aparente máxima seca, obtidas nas condições que o Método estabelece.

ABSTRACT

This document of test is intended for determining the California bearing ratio of soils when they are compacted in the laboratory at optimum moisture content to varying degrees of density using a 2,49 kg hammer dropped from a height of 305 mm. The test is useful for evaluating subgrade and base courses containing materials passing the 19 mm sieve. It presents requirements concerning apparatus, sampling, and conditions for obtaining results.

SUMÁRIO

- 0 Apresentação
- 1 Objetivo
- 2 Referência
- 3 Aparelhagem
- 4 Amostra
- 5 Ensaio
- 6 Cálculos
- 7 Resultados

Anexo normativo

0 APRESENTAÇÃO

Esta Norma decorreu da necessidade de se adaptar, quanto à forma, a DNER-ME 049/74 à DNER-PRO 101/93, mantendo-se inalterável o seu conteúdo técnico.

Macrodescritores MT: norma, ensaio em laboratório, método de ensaio, ensaio de solo

Microdescritores DNER: ensaio, ensaio de laboratório, ensaio de solo, ensaio CBR

Palavras-chave IRRD/IPR: ensaio (6255), método de ensaio (6288), solo (4156), índice califórnia (CBR) (3087), amostra (material) (6251)

Descritores SINORTEC: normas, amostras, ensaio do solo

Aprovada pelo Conselho Administrativo em 24/02/75

Resolução nº * Sessão nº CA/ 7/75

Processo nº 51100000887/94-7

* dado não disponível

Autor : DNER/DrDTc (IPR)

Adaptação da DNER-ME 049/74 à DNER-PRO 101/93, aprovada pela DrDTc em 05/04/94.

1 OBJETIVO

Esta Norma fixa as condições para determinação do Índice de Suporte Califórnia de solos utilizando amostras não trabalhadas.

2 REFERÊNCIA

2.1 Referência bibliográfica

No preparo desta Norma foi consultado o seguinte documento:

DNER-ME 049/74, designada Índice de Suporte Califórnia de solos utilizando amostras não trabalhadas.

3 APARELHAGEM

A aparelhagem necessária é a seguinte:

- a) conjunto de bronze ou latão, constituído de molde cilíndrico com 15,20 cm de diâmetro interno e 17,80 cm de altura, com entalhe superior externo em meia espessura; cilindro complementar com 5,00 cm de altura, com entalhe inferior interno em meia espessura, e prato de base perfurado com 24,00 cm de diâmetro, com dispositivo para fixação do molde cilíndrico antes referido (Figura 1 em anexo);
- b) disco espaçador maciço, de aço, com 15,00 cm de diâmetro e 6,40 cm de altura (Figura 2 em anexo);
- c) soquete cilíndrico de bronze ou latão, para compactação, face inferior plana, de altura de queda de 45,70 cm, com 4,50 kg de peso e 5,00 cm de diâmetro de face inferior (Anexo-Figura 3);
- d) prato perfurado de bronze ou latão, com 14,90 cm de diâmetro e 0,50 cm de espessura, com haste central de bronze ou latão, ajustável, constituída de uma parte fixa rosqueada e de uma camisa rosqueada internamente e recartilhada externamente, com a face superior plana para contato com o extensômetro (Anexo-Figura 4);
- e) tripé porta-extensômetro, de bronze ou latão, com dispositivo para fixação do extensômetro (Anexo-Figura 5);
- f) disco anelar de aço para sobrecarga, dividido diametralmente em duas partes, com 2,27 kg de peso total, com diâmetro externo de 14,90 cm e diâmetro interno de 5,40 cm (Figura 6 em anexo);
- g) extensômetro com curso mínimo de 10 mm, graduado em 0,01 mm;
- h) prensa para determinação do índice de suporte Califórnia (Anexo-Figura 3) composta de:
 - quadro formado por base e travessa de ferro fundido e 4 (quatro) tirantes de aço, apresentando a travessa um entalhe inferior para suspensão de um conjunto dinamométrico;
 - macaco de engrenagem, de operação manual por movimento giratório de uma manivela, com duas velocidades, acompanhado de um prato reforçado ajustável ao macaco, com 24 cm de diâmetro, para suportar o molde;
 - conjunto dinamométrico com capacidade para 4 000 kg, sensível a 2,5 kg, constituído por: anel de aço com dimensões compatíveis com a carga acima apresentada, com dispositivo para se fixar ao entalhe da travessa; extensômetro graduado em 0,001 mm, fixa ao centro do anel para medir encurtamento diametrais; pistão de penetração (Figura 8 em anexo), de aço, com 4,96 cm de diâmetro e com uma altura de cerca de 19 cm, variável conforme as condições de ensaio, fixo à parte inferior do anel; e extensômetro graduado em 0,01 mm, com curso maior que 12,70 mm, fixo lateralmente ao pistão, de maneira que seu pino se apoie na borda superior do molde.

DNER-ME 049/94

p. 03/14

- i) extrator de amostras do molde cilíndrico, para funcionamento por meio de macaco hidráulico, com movimento alternativo de uma alavanca;
- j) balde de chapa de ferro galvanizado com capacidade de cerca de 20 litros, com fundo de diâmetro mínimo de 25 cm;
- l) papel de fitro circular de cerca de 15 cm de diâmetro;
- m) balança com capacidade de 20 kg, sensível a 5 g.

4 AMOSTRA

4.1 A amostra recebida será seca ao ar, destorroada no almofariz pela mão de gral, homogeneizada e reduzida, com o auxílio do repartidor de amostas ou por quarteamento, até se obter uma amostra representativa de 6 000 g, para solos siltosos ou argilosos e 7 000 g, para os arenosos ou pedregulhosos.

4.2 Passa-se esta amostra representativa na peneira de 19 mm; havendo material retido nessa peneira, procede-se à substituição do mesmo por igual quantidade em peso do material passando na de 19 mm e retido na 4,8 mm, obtido de outra amostra representativa conforme o item 4.1.

4.3 Repete-se as operações referidas nos itens 4.1 e 4.2 tantas vezes quantos corpos-de-prova tiverem de ser moldados, geralmente cinco.

5 ENSAIO

5.1 Moldagem do corpo-de-prova

5.1.1 Fixa-se o molde à sua base metálica, ajusta-se o cilindro complementar e apoia-se o conjunto em base plana e firme. Compacta-se o material referido no Capítulo 4, com o disco espaçador especificado no item 3.b, como fundo falso, em cinco camadas iguais de forma a se ter uma altura total de solo de cerca de 12,5 cm, após a compactação. Cada camada receberá 12 golpes do soquete (caso de materiais de subleito), 26 ou 56 golpes (caso de materiais de sub-base e base), caindo de 45,7 cm, distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada.

5.1.2 Remove-se o cilindro complementar, tendo-se antes o cuidado de destacar, com o auxílio de uma faca, o material a ele aderente. Com uma régua rígida biselada rasa-se o material na altura exata do molde e determina-se, com aproximação de 5 g, o peso do material úmido compactado, P'_h .

5.1.3 Retira-se do material excedente da moldagem uma amostra representativa de cerca de 100 g para a determinação da umidade. Pesa-se esta amostra e seca-se em estufa a 105 °C - 110 °C até constância de peso, e fazem-se as pesagens com aproximação de 0,1 g.

5.1.4 Repetem-se as operações dos itens 5.1.1, 5.1.2 e 5.1.3 para teores crescentes de umidade, utilizando amostras de solo não trabalhadas, tantas vezes quantas necessárias para caracterizar a curva de compactação. Estes corpos-de-prova moldados serão utilizados nos ensaios de expansão e penetração.

Procede-se ao cálculo da massa específica aparente do solo conforme descrito no Capítulo 6.

5.2 Expansão

Terminadas as moldagens necessárias para caracterizar a curva de compactação, o disco espaçador de cada corpo-de-prova será retirado, os moldes invertidos e fixados nos respectivos pratos-base perfurados.

Em cada corpo-de-prova, no espaço deixado pelo disco espaçador será colocada a haste de expansão com os pesos anelares que equivalem ao peso do pavimento.

Esta sobrecarga não poderá ser menor do que 4,536 kg.

Adapta-se, ainda, na haste de expansão, um extensômetro fixo ao tripé porta-extensômetro, colocado na borda superior do cilindro, destinado a medir as expansões ocorridas, que deverão ser anotadas de 24 em 24 horas, em porcentagens da altura inicial do corpo-de-prova. Os corpos-de-prova deverão permanecer imersos em água durante 4 (quatro) dias.

Terminado o período de embebição, cada molde com o corpo-de-prova será retirado da imersão e deixada escoar a água durante 15 minutos, pesando-se a seguir o conjunto. Findo esse tempo, o corpo-de-prova estará preparado para a penetração.

Procede-se ao cálculo da expansão e da água absorvida durante a embebição, conforme descrito no Capítulo 6.

5.3 Penetração

O ensaio de penetração é realizado em uma prensa conforme especificado no item 3.h.

Para esse ensaio deverão ser colocadas no topo de cada corpo-de-prova, dentro do molde cilíndrico as mesmas sobrecargas utilizadas no ensaio de expansão (ver item 5.2).

Leva-se esse conjunto ao prato da prensa e faz-se o assentamento do pistão de penetração no solo através da aplicação de uma carga de aproximadamente 4,5 kg controlada pelo deslocamento do ponteiro do extensômetro do anel dinamométrico; zeram-se, a seguir, o extensômetro do anel dinamométrico e o que mede a penetração do pistão no solo. Aciona-se a manivela da prensa (dispositivo micrométrico) com a velocidade de 1,27 mm/min (0,05 pol/min). Cada leitura considerada no extensômetro do anel é função de uma penetração do pistão no solo e de um tempo especificado para o ensaio, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Leituras obtidas no extensômetro do anel em função da penetração do pistão no solo e do tempo.

Tempo min	Penetração		Leitura no extensômetro do anel mm
	pol	mm	
0,5	0,025	0,63	-
1,0	0,050	1,27	-
1,5	0,075	1,90	-
2,0	0,100	2,54	-
3,0	0,150	3,81	-
4,0	0,200	5,08	-
6,0	0,300	7,62	-
8,0	0,400	10,16	-
10,0	0,500	12,70	-

As leituras efetuadas no extensômetro do anel medem encurtamentos diametrais provenientes da atuação das cargas.

DNER-ME 049/94

p. 05/14

No gráfico de aferição do anel tem-se a correspondência entre as leituras lidas no extensômetro do anel e as cargas atuantes.

O cálculo do Índice de Suporte Califórnia (ISC) correspondente a cada corpo-de-prova será calculado conforme descrito no Capítulo 6.

6 Cálculos

6.1 O cálculo da massa específica aparente do solo seco compactado de cada corpo-de-prova moldado como descrito no item 5.1 na umidade h , é feito como segue:

6.1.1 Determina-se primeiramente a massa específica aparente úmida (μ_h), de cada corpo-de-prova, pela fórmula:

$$\mu_h = \frac{P'_h}{V}, \text{ em g/cm}^3$$

onde:

P'_h - peso do solo úmido compactado, obtido como indicado em 5.1.2, em g;

V - volume do solo úmido compactado, em cm^3 .

6.1.2 A seguir se obtém a massa específica aparente do solo seco compactado (μ_s) pela fórmula:

$$\mu_s = \mu_h \times \frac{100}{100 + h} \text{ em g/cm}^3$$

onde:

h - teor de umidade do solo compactado como indicado em 5.1.3, em percentagem.

$$h = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

onde:

P_h - peso do material úmido;

P_s - peso do material seco.

DNER-ME 049/94
p. 06/14

6.1.3 O cálculo de expansão e da água absorvida (item 5.2) durante a embebição para cada corpo-de-prova será feito obedecendo a Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 - Cálculo da expansão e da água absorvida

1	2	3	4	5	6
Data	Hora	Tempo Decorrido min	Molde n°		
			Leituras no extensômetro mm	Diferença de leituras no extensômetro mm	Expansão %
Peso do molde e solo úmido após embebição, g					
Peso da água absorvida, g					

As colunas apresentadas na Tabela 2 indicam:

- Coluna 1 - data do início do ensaio;
- Coluna 2 - hora das leituras efetuadas no extensômetro;
- Coluna 3 - tempo decorrido entre as leituras do extensômetro, que deverão ser de 24 em 24 horas;
- Coluna 4 - leituras no extensômetro;
- Coluna 5 - diferença das leituras efetuadas de 24 em 24 horas;
- Coluna 6 - porcentagem de expansão relativa à altura inicial do corpo-de-prova.

O cálculo do Índice de Suporte Califórnia (item 5.3) correspondente a cada corpo-de-prova será feito obedecendo a Tabela 3 abaixo:

Tabela 3 - Cálculo do Índice de Suporte Califórnia (ISC)

1	2		3	4	5	6	7
Tempo em minutos	Penetração		Pressão padrão kg/cm ²	Leituras no extensômetro mm	Molde N°		ISC %
	mm	pol			Pressão		
					Calculada kg/cm ²	Corrigida kg/cm ²	
0,5	0,63	0,025	-				
1,0	1,27	0,050	-				
1,5	1,90	0,075	-				
2,0	2,54	0,100	70				
3,0	3,81	0,150	-				
4,0	5,08	0,200	105				
6,0	7,62	0,300	132				
8,0	10,16	0,400	161				
10,0	12,70	0,500	182				

DNER-ME 049/94
p. 07/14

As colunas apresentadas no quadro indicam:

- Coluna 1 - tempo;
- Coluna 2 - penetração ocorrida no tempo especificado;
- Coluna 3 - pressão padrão, que é a correspondente a um determinado tipo de pedra britada que apresenta Índice de Suporte Califórnia de 100%
- Coluna 4 - leituras no extensômetro do anel;
- Coluna 5 - pressão correspondente às leituras do anel no gráfico de aferição do mesmo;
- Coluna 6 - pressão corrigida;
- Coluna 7 - o Índice de Suporte Califórnia (ISC).

A pressão corrigida (coluna 6) pode ser obtida pela correção da curva pressão-penetração. Consiste em ajustar o ponto zero da curva a fim de corrigir os efeitos provenientes da irregularidade da superfície do corpo-de-prova.

Apresentando a curva pressão-penetração um ponto de inflexão, traça-se uma tangente à curva nesse ponto até que a mesma intercepte o eixo das abscissas; a curva corrigida será então esta tangente mais a porção convexa da curva original, considerada a origem mudada para o ponto em que a tangente corta o eixo das abscissas; seja c a distância deste ponto à origem dos eixos. Soma-se às abscissas dos pontos correspondentes às penetrações de 0,1 polegada e 0,2 polegadas a distância c , com o que se determina, na curva obtida, os valores correspondentes das novas ordenadas, as quais representam os valores das pressões corrigidas para as penetrações antes referidas.

A correção pode ser obtida como mostra o gráfico da figura 9 em anexo.

O Índice de Suporte Califórnia (ISC), em percentagem, para cada corpo-de-prova é obtido pela fórmula:

$$\text{ISC} = \frac{\text{pressão calculada ou pressão corrigida}}{\text{pressão padrão}} \times 100,$$

adotando-se o maior dos valores obtidos nas penetrações de 0,1 e 0,2 polegadas.

7 RESULTADOS

7.1 Determinação da massa específica aparente máxima, seca e úmida ótima

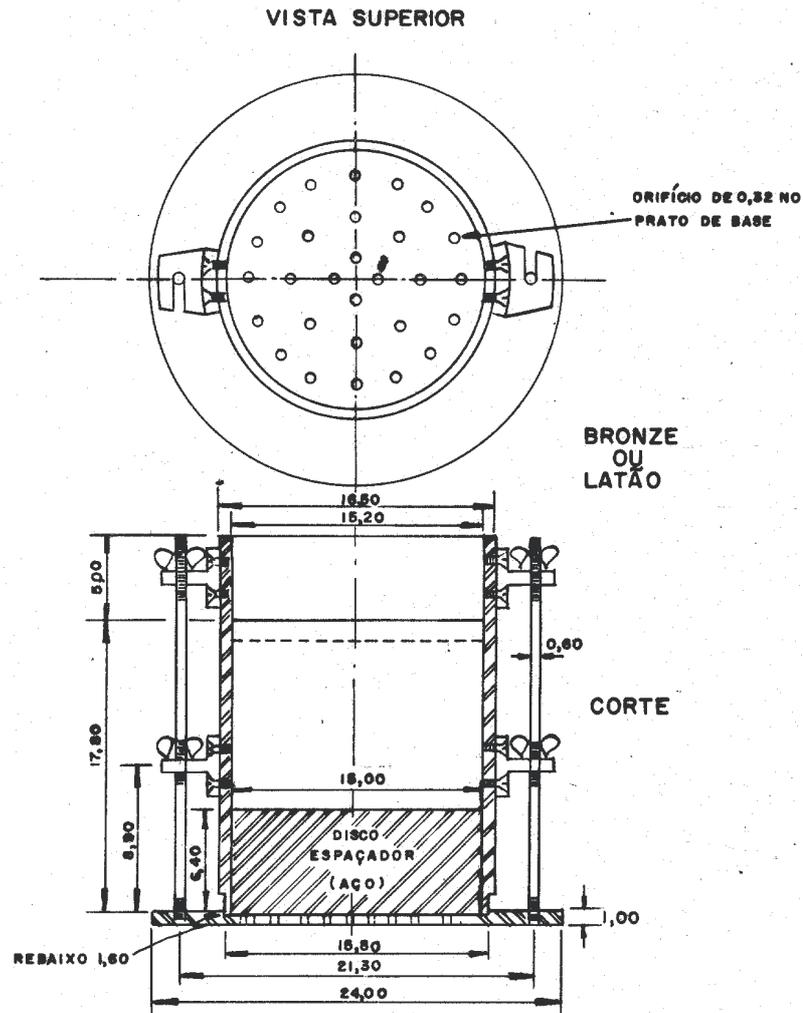
Os valores das massa específicas aparentes, secas, de cada corpo-de-prova, e os valores correspondentes das umidades de moldagem permitirão o traçado da curva de compactação do solo.

A ordenada máxima da curva fornece a massa específica aparente, máxima seca, e a abscissa que lhe corresponde é a umidade ótima do solo.

7.2 Determinação do Índice de Suporte Califórnia final

De preferência, na mesma folha em que se representa a curva de compactação, usando-se a mesma escala das umidades de moldagem, registram-se, em escala adequada, sobre o eixo das ordenadas, os valores dos Índices de Suporte Califórnia obtidos segundo este Método, correspondentes aos valores das umidades que serviram para a construção da curva de compactação anteriormente descrita.

O valor da ordenada desta curva, correspondente à umidade ótima antes determinada, fornece o Índice de Suporte Califórnia (ISC).



UNIDADE DE MEDIDA: CENTÍMETRO (cm)

FIGURA 1 - MOLDE CILÍNDRICO, CILINDRO COMPLEMENTAR E BASE METÁLICA

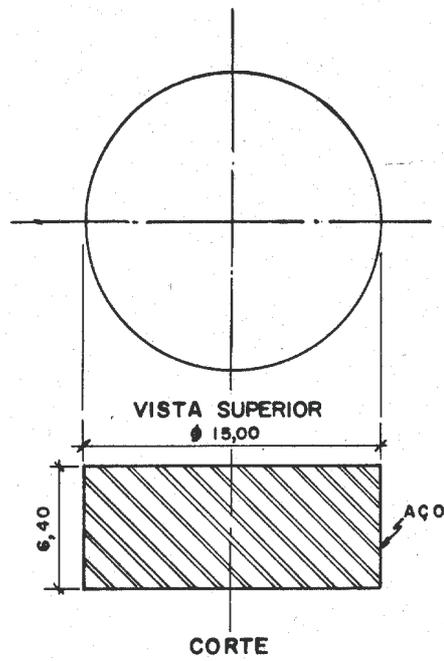


FIGURA 2 - DISCO ESPAÇADOR

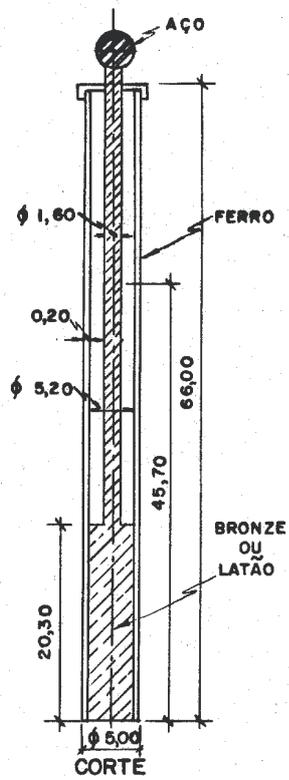
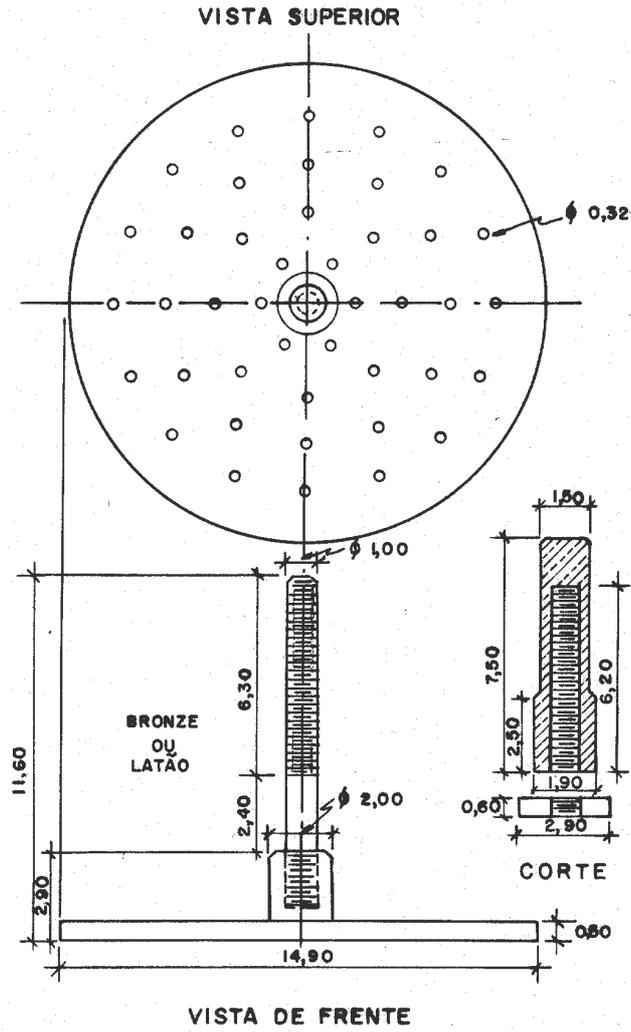


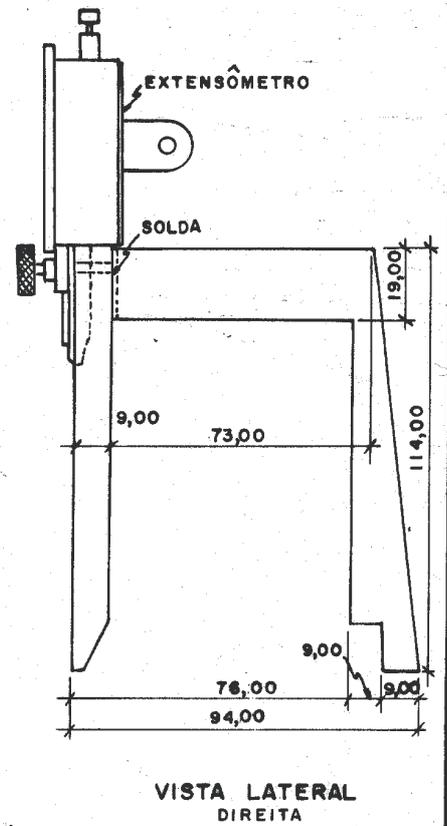
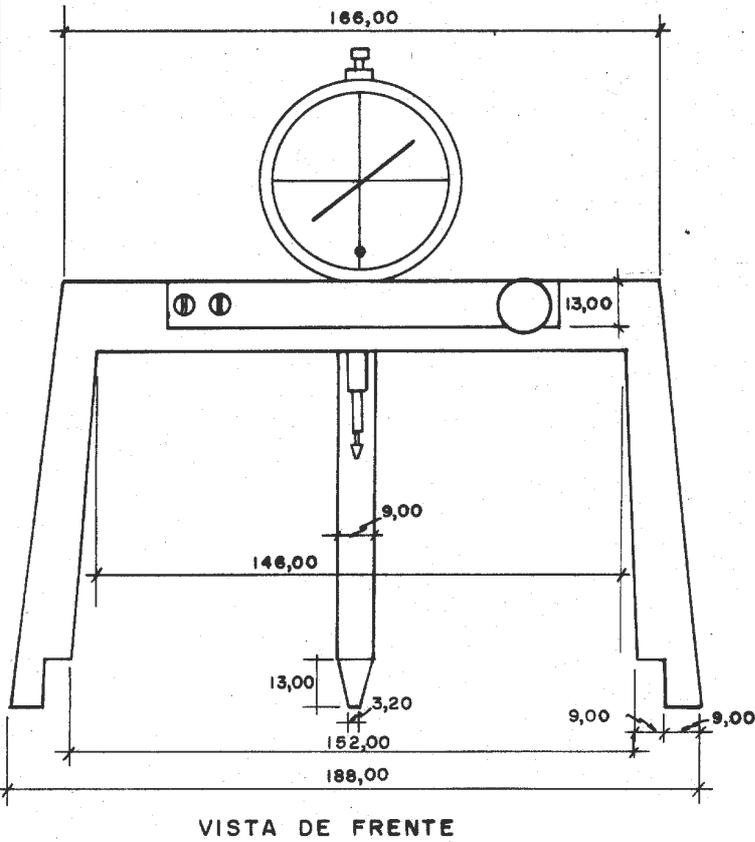
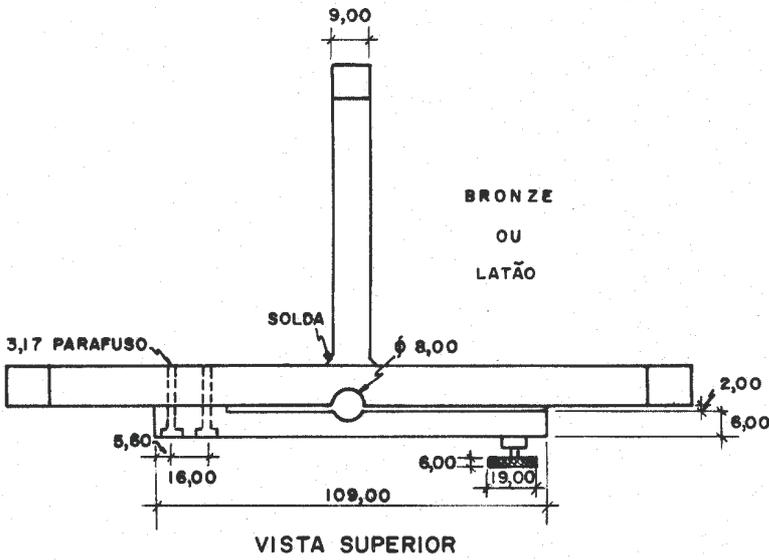
FIGURA 3 - SOQUETE

UNIDADE DE MEDIDA - CENTÍMETRO (cm)



UNIDADE DE MEDIDA: CENTÍMETRO (cm)

FIGURA 4 - PRATO PERFURADO COM HASTE AJUSTÁVEL



UNIDADE DE MEDIDA : MILÍMETRO (mm)

FIGURA 5 - TRIPÉ PORTA-EXTENSÔMETRO

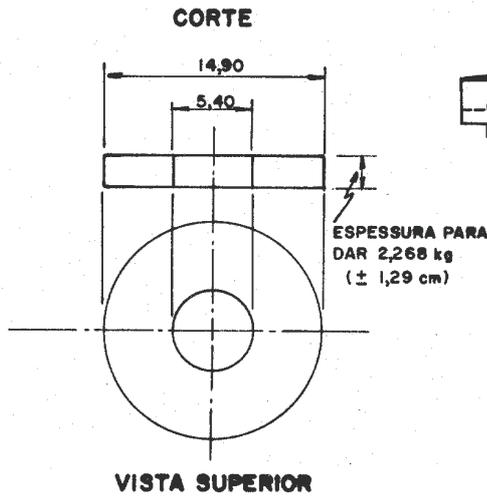


FIGURA 6 - DISCO ANELAR

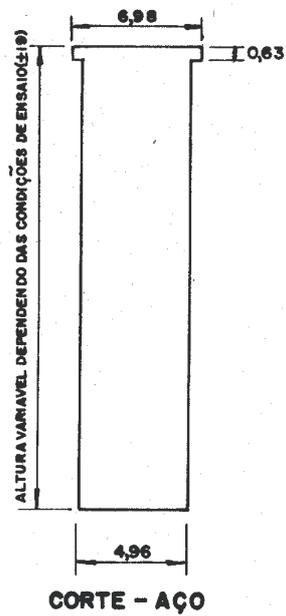


FIGURA 8 - PISTÃO DE PENETRAÇÃO

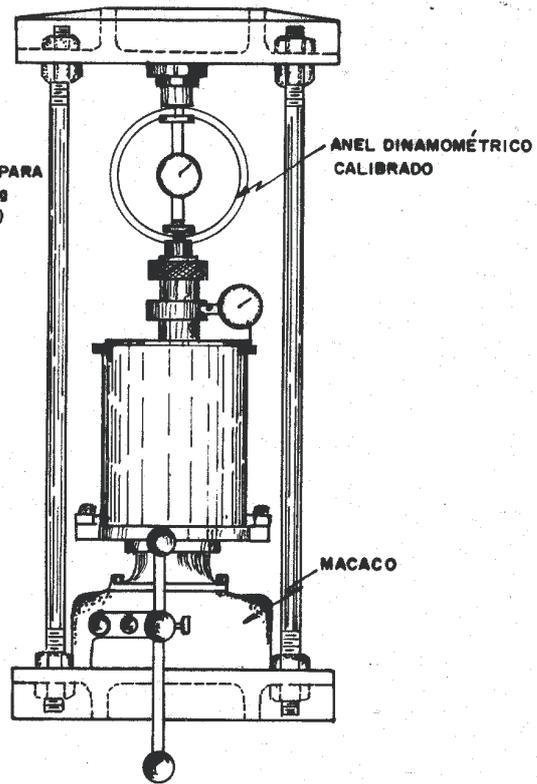


FIGURA 7 - PRENSA PARA DETERMINAÇÃO DO I.S.C.

UNIDADE DE MEDIDA : CENTÍMETRO (cm)

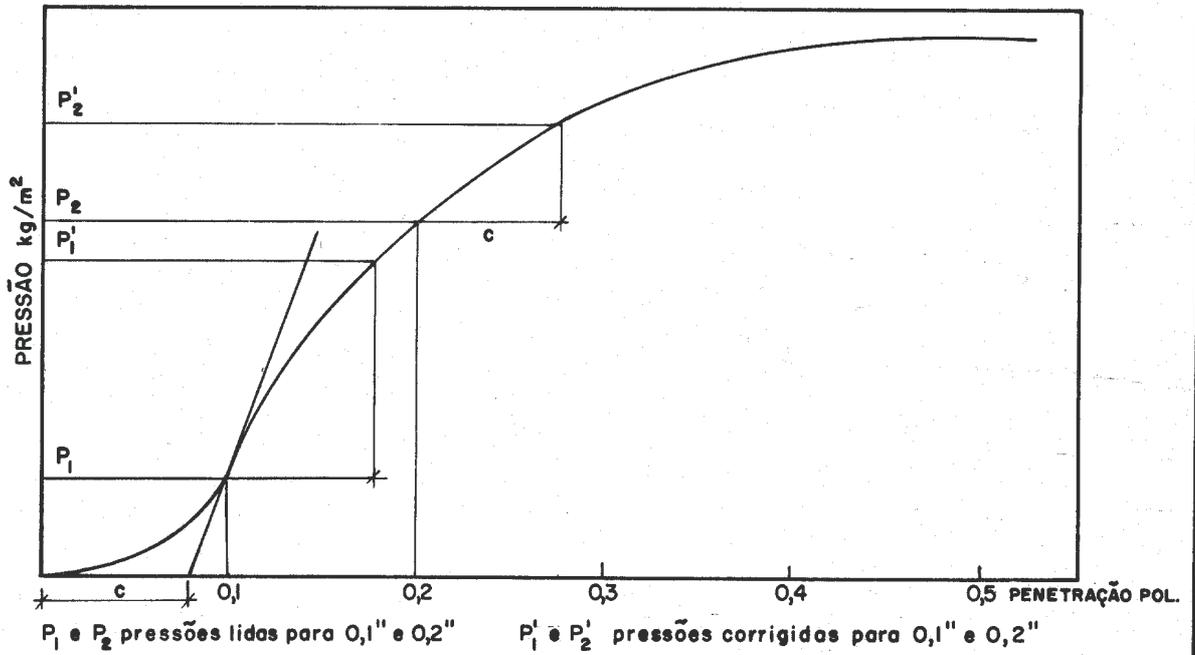
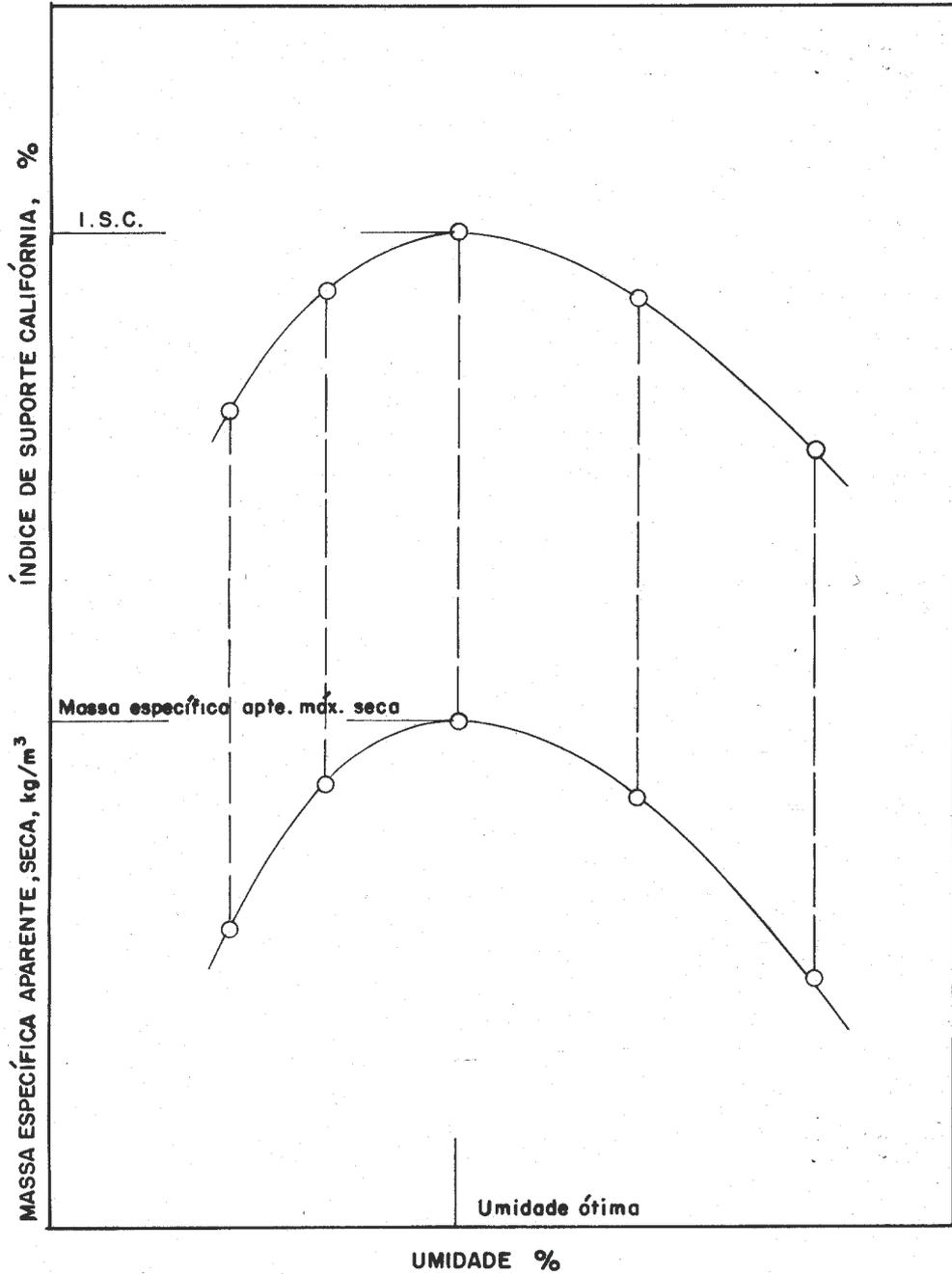


FIGURA 9



UMIDADE %

FIGURA 10

ANEXO B

MT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM**Solos - compactação utilizando amostras não trabalhadas****Norma rodoviária****Método de Ensaio****DNER-ME 129/94****p. 01/07****RESUMO**

Este documento, que é uma norma técnica, estabelece um método para determinar a correlação entre o teor de umidade e a massa específica aparente do solo seco, quando a fração do solo que passa pela peneira de 19 mm é compactada nas energias de compactação normal, intermediária e modificada, usando amostras não trabalhadas.

ABSTRACT

This document presents the procedure for determining the relationship between the moisture content and density of soil material passing a 19 mm sieve, when compacted on the normal, intermediate and modified energies and when using undisturbed samples. It describes the apparatus and the required calculations.

SUMÁRIO

- 0 Apresentação
- 1 Objetivo
- 2 Referências
- 3 Aparentagem
- 4 Preparação da amostra
- 5 Execução do ensaio
- 6 Energias de compactação
- 7 Cálculos
- 8 Resultados

Anexo normativo

0 APRESENTAÇÃO

Esta Norma decorreu da necessidade de se adaptar, quanto à forma, a DNER-ME 129/89 à DNER-PRO 101/93, mantendo-se inalterável o seu conteúdo técnico.

Macrodescriptores MT: ensaio, ensaio de solo, ensaio em laboratório**Microdescriptores DNER:** compactação, ensaio, ensaio de compactação, ensaio de laboratório, ensaio de solo**Palavras-chave IRRD/IPR:** compactação (3686), ensaio (6255), método de ensaio (6288), solo (4156)**Descritores SINORTEC:** normas, ensaio de compactação do solo, ensaio do solo

Aprovada pelo Conselho de Administração em 21/07/89

Resolução nº 1680/89, Sessão nº CA/ 27/89

Processo nº 51100000896/94-6

Autor : DNER/DrDTc (IPR)

Adaptação da DNER-ME 129/89 à DNER-PRO 101/93, aprovada pela DrDTc em 05/04/94.

1 OBJETIVO

Esta Norma fixa um método de determinação da correlação entre o teor de umidade de solo e sua massa específica aparente seca, quando a fração de solo que passa na peneira de 19 mm é compactada nas energias normal, intermediária e modificada, utilizando amostras não trabalhadas.

2 REFERÊNCIAS

2.1 Referências bibliográficas

Nopreparo desta Norma foram consultados os seguintes documentos:

- a) DNER-ME 129/89, designada Compactação de solos;
- b) DNER-ME 047/64, designada Compactação de solos - método A;
- c) DNER-ME 048/64, designada Compactação de solos - método B;
- d) ABNT MB-33, de 1984, registrada no SINMETRO como NBR-7182, designada Solo - ensaio de compactação;
- e) AASHTO T 180-86, designada Moisture - density relations of soils using a 10 lb (4,54 kg) rammer and an 18 in drop.;
- f) ASTM D 1557-78, designada Moisture - density relations of soils and soil-aggregate mixtures using 10 lb (4,54 Kg) rammer and 18 in (45,7 cm) drop.

3 APARELHAGEM

A aparelhagem necessária é a seguinte:

- a) molde cilíndrico metálico de 15,24 cm \pm 0,05 cm de diâmetro interno e 17,78 cm \pm 0,02 cm de altura, com entalhe superior externo em meia espessura; cilindro complementar com 6,08 cm de altura e com o mesmo diâmetro do molde, com entalhe inferior interno em meia espessura e na altura de 1 cm; base metálica com dispositivo de fixação ao molde cilíndrico e ao cilindro complementar, tudo conforme a Figura 1 em anexo. O molde cilíndrico e o complementar devem ser constituídos do mesmo material;
- b) disco espaçador metálico de 15,00 cm \pm 0,05 cm de diâmetro e de altura igual a 6,35 cm \pm 0,02 cm, conforme Figura 2 em anexo;
- c) soquete metálico cilíndrico, de face interior plana de diâmetro igual a 5,08 cm \pm 0,01 cm, massa de 4,536 kg \pm 0,01 kg, e com a altura de queda igual a 45,72 cm \pm 0,15 cm, conforme Figura 3 em anexo. A camisa cilíndrica do soquete deve possuir pelo menos 4 (quatro) orifícios de 1 cm de diâmetro, em cada extremidade, separados entre si de 90 ° e aproximadamente a 20 cm das extremidades. Instrumental mecanizado para desempenho das mesmas funções pode ser usado, devendo para esse fim ser sempre ajustada a altura de queda do soquete, por meio de dispositivo regulador próprio, para aplicação dos golpes;
- d) extrator de amostra do molde cilíndrico, para funcionamento por meio de macaco hidráulico, com movimento alternativo de uma alavanca;
- e) balança com capacidade de 20 kg, com sensibilidade de 1 g;
- f) balança com capacidade de 1 kg, com sensibilidade de 0,1 g;
- g) estufa capaz de manter a temperatura a 110 °C \pm 5 °C;
- h) almofariz e mão de gral recoberta de borracha, com capacidade para 5 kg de solo;

- i) régua de aço biselada, rija, de cerca de 30 cm de comprimento;
- j) repartidor de amostras de 5,0 cm de abertura;
- l) cápsulas de alumínio com tampa, ou de outro material adequado, capaz de impedir a perda de umidade durante a pesagem;
- m) peneiras de 50 mm, 19 mm e 4,8 mm, conforme ABNT EB-22, de 1988, registrada no SINMETRO como NBR-5734, designada Peneiras para ensaio;
- n) proveta graduada, com capacidade para 1 000 ml;
- o) papel de filtro circular com 15 cm de diâmetro;
- p) acessórios, tais como bandeja, espátula, colher de pedreiro, etc. Dispositivo mecânico, capaz de realizar a mistura do solo para cada acréscimo de umidade, pode ser usado.

4 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

4.1 A amostra de solo como recebida é seca ao ar, destorroada no almofariz pela mão de gral, homogeneizada e reduzida com o auxílio do repartidor de amostras ou por quarteamento, até se obter uma amostra representativa de aproximadamente 6 kg para solos siltosos ou argilosos, e aproximadamente 7 kg para solos arenosos ou pedregulhosos. A secagem também pode ser realizada por aparelhagem de secagem, desde que a temperatura não exceda de 60 °C.

4.2 A amostra representativa é passada, a seguir, na peneira de 19 mm; havendo material retido nesta peneira, é procedida a substituição do mesmo por igual quantidade em peso do material passando na de 19 mm e retido na de 4,8 mm, obtida de amostra representativa conforme 4.1.

4.3 Repetem-se as operações referidas nos itens 4.1 e 4.2 tantas vezes quantos corpos-de-prova tiverem de ser moldados, geralmente cinco.

Nota: A operação descrita no item 4.2 é realizada após eliminação prévia de agregado retido na peneira de 50 mm, caso exista.

5 EXECUÇÃO DO ENSAIO

5.1 Fixar o molde à base metálica, ajustar o cilindro complementar e apoiar o conjunto em base plana, resistente e firme, tal como a de um cilindro ou cubo de concreto pesando não menos que 90 kg. Compactar o material no molde com o disco espaçador, como fundo falso, em cinco camadas iguais, de forma a se obter uma altura total do corpo-de-prova de cerca de 12,5 cm, após compactação.

5.2 Aplicar em cada camada golpes com o soquete caindo de 45,72 cm, distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada. Por ocasião da compactação deve ser assente, previamente, sobre o disco espaçador, um papel de filtro circular de 15 cm de diâmetro.

5.3 Remover o cilindro complementar, tomando-se o cuidado de destacar com a espátula o material a ele aderente. Com a régua de aço biselada rasar o excesso de material na altura exata do molde e determinar, com aproximação de 1 g, a massa do material úmido compactado mais a do molde; por dedução da massa do molde, determinar a massa do material úmido compactado, P'_h .

DNER-ME 129/94

p. 04/07

5.4 Remover, com o extrator de amostra, o corpo-de-prova do molde cilíndrico e retirar de sua parte central duas amostras representativas de cerca de 250 g cada uma para determinação da umidade. Pesquisar estas amostras e secar em estufa numa temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, até constância de massa. Fazer as pesagens com a aproximação de 0,01 g e tomar a média como a umidade representativa do corpo-de-prova compactado.

5.5 Repetem-se as operações referidas nos itens 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, para teores crescentes de umidade, utilizando amostras de solo não trabalhadas, tantas vezes quantas necessárias para caracterizar a curva de compactação do material, no mínimo, cinco vezes.

6 ENERGIAS DE COMPACTAÇÃO

6.1 Método A - Normal

Realizar todas as operações indicadas nos Capítulos 4 e 5, sendo que, para o especificado no item 5.2, referente a número de golpes, aplicar 12 golpes por camada.

6.2 Método B - Intermediária

Realizar todas as operações indicadas nos Capítulos 4 e 5, sendo que, para o especificado no item 5.2, referente a número de golpes, aplicar 26 golpes por camada.

6.3 Método C - Modificada

Realizar todas as operações indicadas nos Capítulos 4 e 5, sendo que, para o especificado no item 5.2, referente a número de golpes, aplicar 55 golpes por camada.

7 CÁLCULOS

7.1 Umidade

A partir da fase do ensaio descrito em 5.4, calcular os teores de umidade (h) referentes a cada compactação, pela fórmula:

$$h = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

onde:

h - teor de umidade em percentagem;

P_h - massa da amostra úmida, como obtida em 5.4;

P_s - massa da amostra seca em estufa na temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, até constância de peso.

7.2 Massa específica aparente do solo seco compactado

- a) calcular primeiramente a massa específica aparente do solo úmido, após cada compactação, pela fórmula:

DNER-ME 129/94

p. 05/07

$$\gamma_h = \frac{P'_h}{V}$$

onde:

γ_h - massa específica aparente do solo úmido, em g/cm^3 ;

P'_h - massa do solo úmido compactado, obtida como indicado em 5.3, em g;

V - volume do solo compactado, em cm^3 (capacidade do molde).

b) determinar, a seguir, a massa específica aparente do solo seco, após cada compactação, pela fórmula:

$$\gamma_s = \gamma_h \times \frac{100}{100 + h}$$

onde:

γ_s - massa específica aparente do solo seco, em g/cm^3 ;

γ_h - massa específica aparente do solo úmido, em g/cm^3 ;

h - teor de umidade do solo compactado, obtido como indicado em 7.1.

8 RESULTADOS

8.1 Curva de compactação

A curva de compactação é desenhada marcando-se, em ordenadas, as massas específicas aparentes do solo seco γ_s e, em abscissas, os teores de umidade correspondentes, h .

8.2 Massa específica aparente máxima do solo seco

Este valor é determinado pela ordenada máxima da curva de compactação.

8.3 Umidade ótima

Valor da abscissa correspondente, na curva de compactação, ao ponto da massa específica aparente máxima do solo seco.

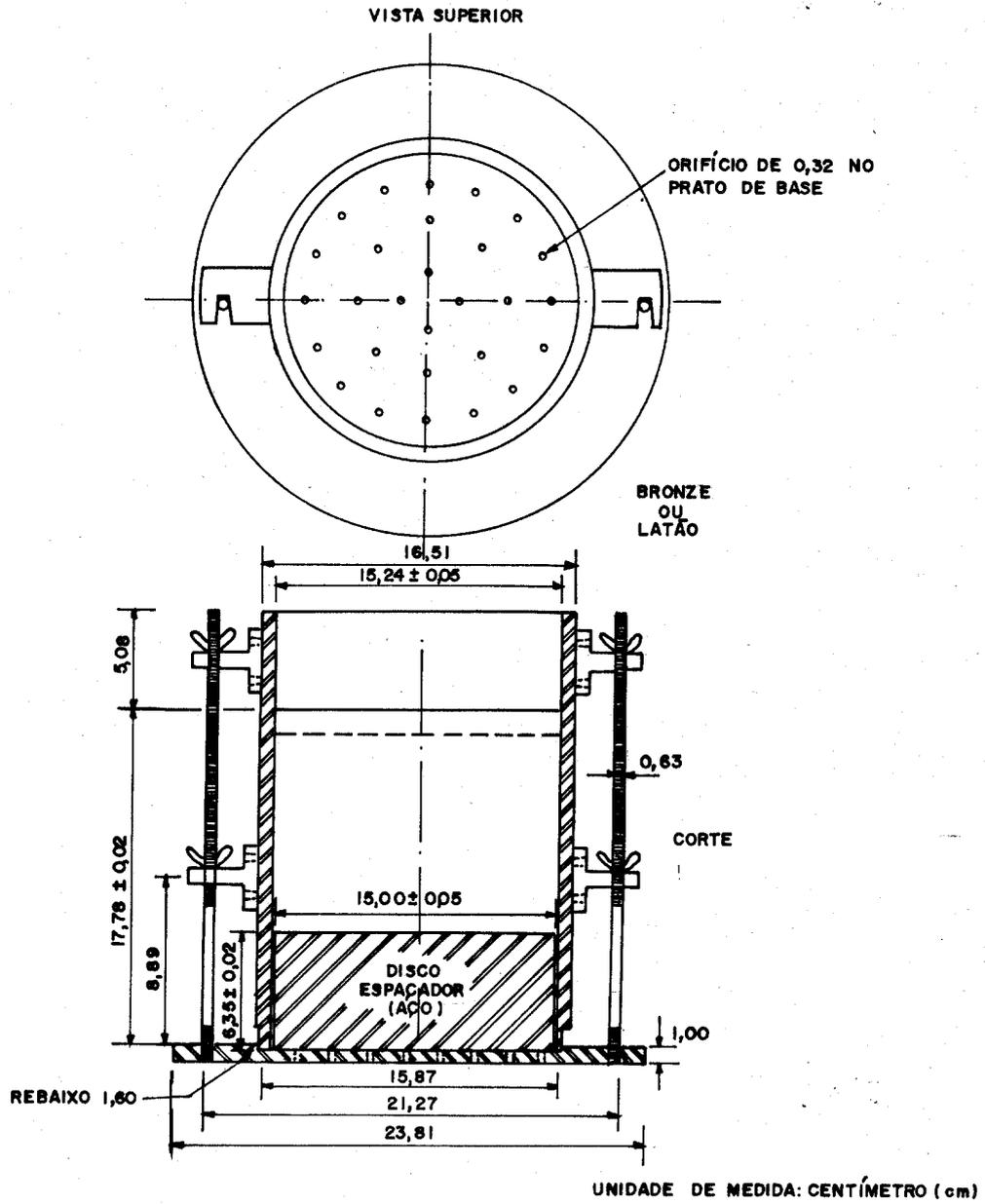


FIGURA 1 - MOLDE CILÍNDRICO, CILINDRO COMPLEMENTAR E BASE METÁLICA

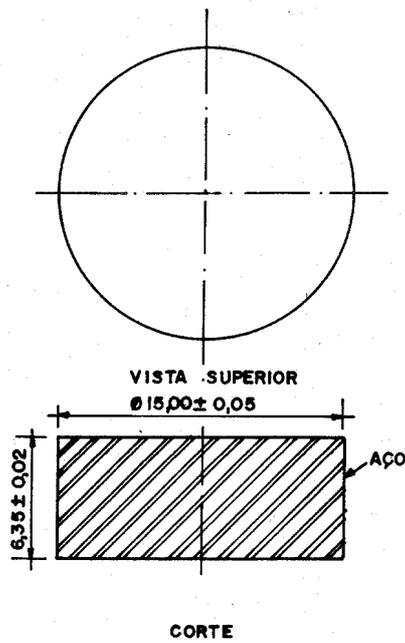


FIGURA 2 - DISCO ESPAÇADOR

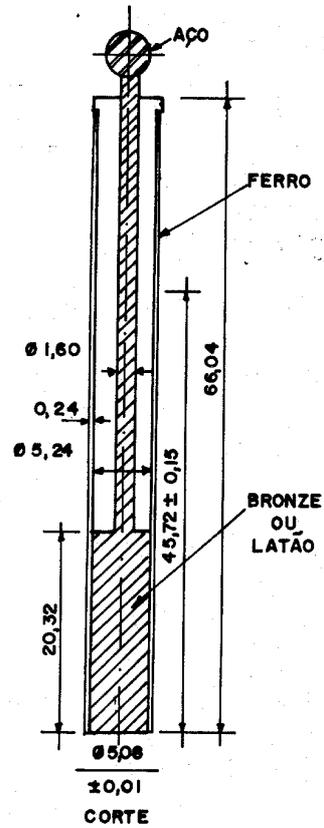


FIGURA 3 - SOQUETE

UNIDADE DE MEDIDA : CENTÍMETRO (cm)

ANEXO C

MT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM**Solos - determinação do módulo de resiliência**

Norma rodoviária

Método de Ensaio

DNER-ME 131/94
p. 01/08**RESUMO**

Este documento, que é uma norma técnica, estabelece um método para determinar os valores do módulo de resiliência de solos para várias tensões aplicadas, de utilidade para projeto de pavimentos flexíveis.

ABSTRACT

This document presents the procedure for determination of the soil resilient modulus for various tensions, applied for flexible pavement design. It prescribes the apparatus and conditions for the obtention of result.

SUMÁRIO

- 0 Apresentação
- 1 Objetivo
- 2 Referências
- 3 Definição
- 4 Aparelhagem
- 5 Amostra
- 6 Ensaio
- 7 Resultado

Anexo normativo

0 APRESENTAÇÃO

Esta Norma decorreu da necessidade de se adaptar, quanto à forma, a DNER-ME 131/86 à DNER-PRO101/93, mantendo-se inalterável o seu conteúdo técnico.

Macrodescriptores MT: ensaio, ensaio em laboratório, norma**Microdescriptores DNER:** ensaio, pavimento flexível, solo natural**Palavras-chave IRRD/IPR:** ensaio (6255), especificação (norma) (0139), normalização (9075), pavimento flexível (2944), reforço (em material) (3471), solo (4156)**Descriptores SINORTEC:** ensaio, normas, pavimentos flexíveis

Aprovada pelo Conselho de Administração em 27/10/83

Resolução nº 1637/83 Sessão nº CA/37/83

Processo nº 2010000436/83-0

Autor: DNER/DrDTc (IPR)

Adaptação da DNER-ME 131/86 à DNER-PRO 101/93,
aprovada pela DrDTc em 13/04/94.

1 OBJETIVO

Este método prescreve o modo pelo qual se determina os valores do módulo de resiliência de solos para várias tensões aplicadas, utilizando o equipamento triaxial de carga repetida.

2 REFERÊNCIAS

2.1 Referências bibliográficas

No preparo desta Norma foram consultados os seguintes documentos:

- a) DNER-ME 131/86, designada Determinação do módulo de resiliência de solos;
- b) Pinto, S. e Preussler, E.S. - Módulos resilientes de concretos asfálticos. anais do 5º encontro de asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo - 1980;
- c) Preussler, E.S. e Pinto, S. - Proposição de método para projeto de reforço de pavimentos flexíveis, considerando a resiliência. anais da 17ª reunião anual de pavimentação da ABPv-1982.

3 DEFINIÇÃO

O módulo de resiliência (MR) de solos é a relação entre a tensão-desvio (σ_d), aplicada repetidamente em uma amostra de solo e a correspondente deformação específica vertical recuperável ou resiliente (ϵ_R):

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_R}$$

4 APARELHAGEM

Está esquematizada no Anexo-Figura 1, sendo constituída:

- a) célula triaxial para ensaiar amostras de solo sob ação de cargas verticais repetidas;
- b) sistema pneumático de carregamento, composto de:
 - reguladores de pressão para aplicação da tensão-desvio (σ_d) e confinante (ϵ_3);
 - válvula de transmissão do carregamento vertical;
 - cilindro de pressão e pistão de carga;
 - dispositivo mecânico digital ("timer") para controle do tempo de abertura da válvula e frequência de aplicação do carregamento;
- c) sistema de vácuo com a finalidade de verificar a presença de furos na membrana que envolve a amostra;
- d) sistema de medição de deformação da amostra, constituído de:
 - dois transdutores mecânico - eletromagnéticos tipo LVDT ("Linear variable differential transformer");
 - par de alças para fixação dos LVDT na amostra;
 - oscilógrafo e amplificador com características apropriadas para uso com os transdutores.

O princípio de funcionamento dos transdutores LVDT consiste em transformar as deformações axiais durante o carregamento repetido em potencial elétrico, cujo valor é registrado no oscilógrafo. Uma pré-calibração é necessária, a fim de correlacionar as deformações com os valores dos registros;

- e) estrutura de suporte com acessórios.

5 AMOSTRA

O corpo-de-prova destinado ao ensaio pode ser obtido de bloco de amostra indeformada, de tubos do tipo Shelby ou de amostra compactada em laboratório em molde cilíndrico apropriado, com a energia de compactação e o teor de umidade desejados. O diâmetro do molde deve ser superior ou igual a 4 vezes o diâmetro máximo das partículas do solo.

O corpo-de-prova deve ter dimensões tais que a relação altura diâmetro seja de aproximadamente igual a 2.

6 ENSAIO

6.1 Montagem do conjunto triaxial

- a) colocar o corpo-de-prova na base da célula triaxial;
- b) colocar o cabeçote no topo do corpo-de-prova;
- c) envolver o corpo-de-prova com uma membrana de borracha;
- d) verificar a existência de furos na membrana através de aplicação de vácuo na base do corpo-de-prova. Não utilizar membranas perfuradas;
- e) fixar lateralmente o par de alças ao corpo-de-prova;
- f) fixar e ajustar os transdutores nas alças de modo a se obter registro no oscilógrafo;
- g) medir e anotar a distância entre alças (H_0). Este valor é a altura de referência do corpo-de-prova para o cálculo da deformação específica vertical recuperável ou resiliente;
- h) ajustar a célula triaxial ao pistão de carga observando o perfeito assentamento do mesmo com o cabeçote.

6.2 Solo arenoso ou pedregulhoso

No caso de solos arenosos ou pedregulhosos a técnica de ensaio é a seguinte:

- a) fase de condicionamento do corpo-de-prova:
 - aplicar uma tensão confinante (σ_3) de 70 kPa (0,70 kgf / cm²);
 - aplicar 200 vezes a tensão desvio (σ_d) de 70 kPa (0,70 kgf / cm²), com uma frequência de 20 ciclos por minuto, duração de 0,10 segundo;
 - aplicar 200 vezes a tensão desvio (σ_d) ou 210 kPa (2,10 kgf / cm²), com uma frequência de 20 ciclos por minuto, duração de 0,10 segundo;
 - aplicar uma tensão confinante (σ_3) de 105 kPa (1,05 kgf / cm²),
 - aplicar 200 vezes a tensão desvio (σ_d) ou 315 kPa (3,15 kgf / cm²), com uma frequência de 20 ciclos por minuto, duração de 0,10 segundo.
- b) registro das deformações no oscilógrafo:
 - aplicar uma tensão confinante (σ_3) de 21 kPa (0,21 kgf / cm²) e 200 vezes a tensão desvio (σ_d) de 21 kPa, com uma frequência de 20 ciclos por minuto, duração de 0,10 segundo e registrar no oscilógrafo a deformação resiliente após as 200 aplicações do carregamento vertical;
 - repetir o procedimento anterior para tensões desvio (σ_d) de 42 kPa e 63 kPa;
 - aplicar uma tensão confinante (σ_3) de 35 kPa e 200 vezes a tensão desvio (σ_d) de 35 kPa, com uma frequência de 20 ciclos por minuto, duração de 0,10 segundo e registrar no oscilógrafo a deformação resiliente após as 200 aplicações do carregamento vertical;

- repetir o procedimento anterior para tensões desvio (σ_d) de 70 kPa e 105 kPa;
- manter a sequência de aplicação de tensões confinantes e desvio para os seguintes valores:

$$\sigma_3 = 52,5 \text{ kPa} \quad \left\langle \begin{array}{l} \sigma_d \\ \sigma_d \\ \sigma_d \\ \sigma_d \\ \sigma_d \end{array} \right. \begin{array}{l} = 52,5 \text{ kPa} \\ = 105 \text{ kPa} \\ = 57,5 \text{ kPa} \end{array}$$

$$\sigma_3 = 70 \text{ kPa} \quad \left\langle \begin{array}{l} \sigma_d \\ \sigma_d \\ \sigma_d \\ \sigma_d \\ \sigma_d \end{array} \right. \begin{array}{l} = 70 \text{ kPa} \\ = 140 \text{ kPa} \\ = 210 \text{ kPa} \end{array}$$

$$\sigma_3 = 105 \text{ kPa} \quad \left\langle \begin{array}{l} \sigma_d \\ \sigma_d \\ \sigma_d \\ \sigma_d \\ \sigma_d \end{array} \right. \begin{array}{l} = 105 \text{ kPa} \\ = 210 \text{ kPa} \\ = 315 \text{ kPa} \end{array}$$

$$\sigma_3 = 140 \text{ kPa} \quad \left\langle \begin{array}{l} \sigma_d \\ \sigma_d \\ \sigma_d \\ \sigma_d \\ \sigma_d \end{array} \right. \begin{array}{l} = 140 \text{ kPa} \\ = 280 \text{ kPa} \\ = 420 \text{ kPa} \end{array}$$

- registrar no oscilógrafo a deformação resiliente, para o par de valores $\sigma_3 \times \sigma_d$, após cada 200 aplicações do carregamento vertical (σ_d).

6.3 Solo argiloso ou siltoso

No caso de solos argilosos ou siltosos a técnica de ensaio é a seguinte:

- fase de condicionamento do corpo-de-prova.
 - aplicar uma tensão confinante (σ_3) de 21 kPa;
 - aplicar 200 vezes a tensão desvio (σ_d) de 70 kPa, com uma frequência de 20 ciclos por minuto, duração de 0,10 segundo;
- registro das deformações no oscilógrafo.
 - manter a tensão confinante (σ_3) de 21 kPa;
 - aplicar 200 vezes a tensão desvio (σ_d) de 21 kPa, com uma frequência de 20 ciclos por minuto, duração de 0,10 segundo e registrar no oscilógrafo a deformação resiliente após as 200 aplicações do carregamento vertical;
 - repetir o procedimento anterior para tensões desvio de 35; 52,5; 70; 105; 140 e 210 kPa.

7 RESULTADO

Com os valores obtidos são calculados os módulos de resiliência, através da expressão:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_R}$$

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta h}{H_o}$$

onde:

MR = módulo de resiliência, kPa;

σ_d = tensão desvio aplicada repetidamente, kPa;

ε_R = deformação específica resiliente;

Δh = deformação resiliente registrada no oscilógrafo, cm;

H_o = distância entre alças, cm.

7.1 Solo arenoso ou pedregulhoso

Os resultados são apresentados em gráfico cujas ordenadas, em escala logarítmica, são os valores dos módulos de resiliência (MR) e as abscissas, em escala logarítmica, são os valores das tensões confinantes (σ_3). A análise de regressão fornece uma equação da forma:

$$MR = k_1 - \sigma_3^{k_2} \quad (\text{Anexo-Figura 2})$$

onde:

k_1 e k_2 - parâmetros de resiliência do solo ensaiado.

7.2 Solo argiloso ou siltoso

Os resultados podem ser apresentados em gráfico cujas ordenadas, em escala aritmética, são os valores dos módulos de resiliência (MR) e as abscissas, em escala aritmética, são os valores das tensões desvio (σ_d). A análise de regressão fornece um modelo bilinear, representado pelas equações:

$$MR = k_2 + k_3 (k_1 - \sigma_d) \quad k_1 > \sigma_d$$

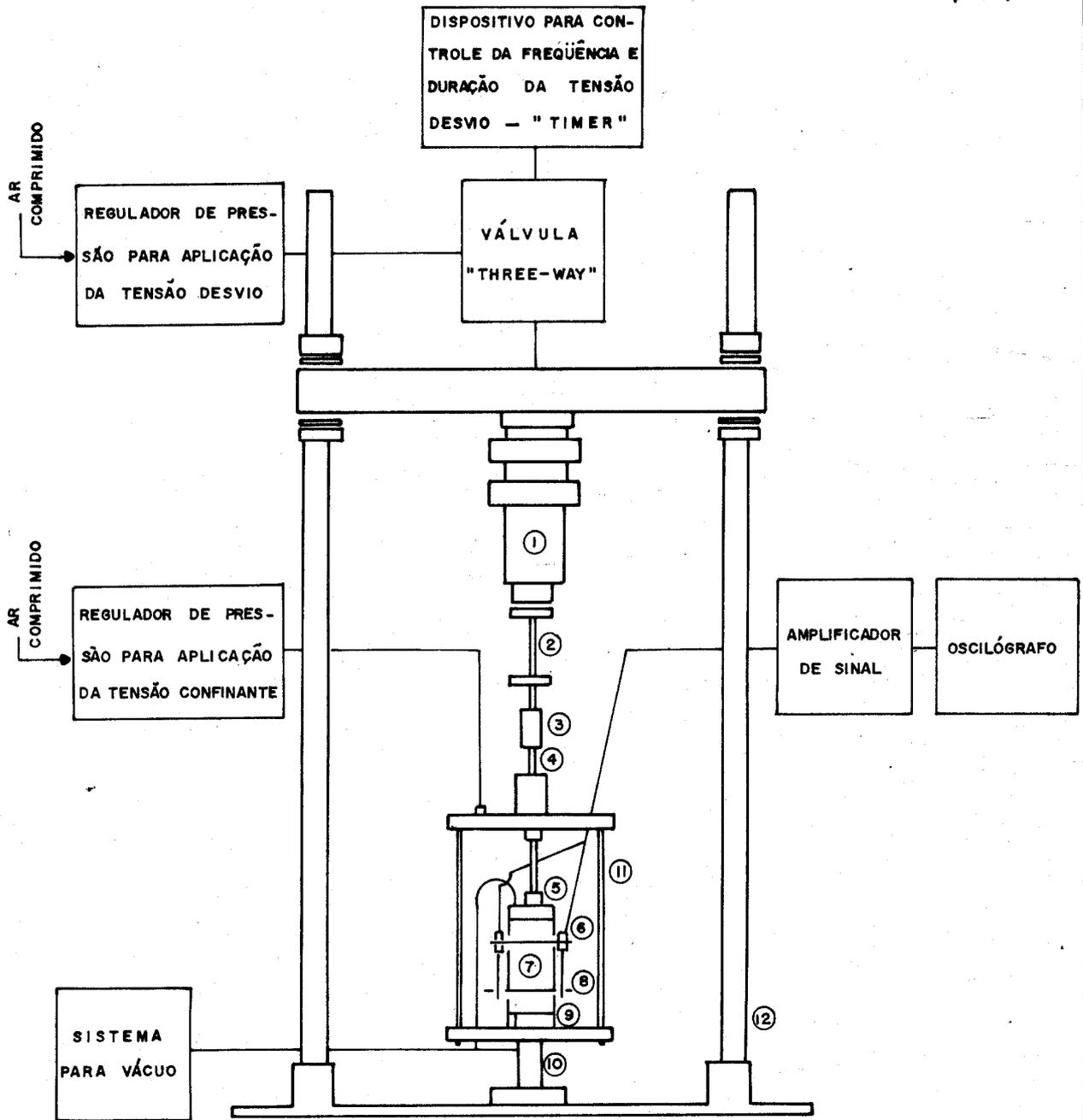
$$MR = k_2 + k_4 (\sigma_d - k_1) \quad k_1 < \sigma_d \quad (\text{Anexo - Figura 3})$$

onde:

k_1, k_2, k_3 e k_4 - parâmetros de resiliência do solo ensaiado.

Notas: 1) Alternativamente, os resultados podem ser apresentados através da equação $MR = c_1 - \sigma_d^{c_2}$, onde c_1 e c_2 são parâmetros de resiliência do solo estudado e σ_d é a tensão-desvio.

2) No caso de solos siltosos, em que a percentagem de silte na fração que passa na peneira n° 200 (0,074mm), for superior ou igual a 65%, verificar a influência da tensão confinante (σ_3), através da metodologia de ensaio descrita para solo arenoso ou pedregulhoso.



- 1 - CILINDRO DE PRESSÃO
- 2 - PISTÃO DE CARGA
- 3 - CONEXÃO
- 4 - HASTE
- 5 - CABEÇOTE
- 6 - LVDT

- 7 - CORPO-DE-PROVA
- 8 - ALÇAS PARA FIXAÇÃO DOS LVDT
- 9 - BASE
- 10 - SUPORTE CENTRAL
- 11 - CÉLULA TRIAXIAL
- 12 - ESTRUTURA DE SUPORTE

FIGURA 1 - ESQUEMA DO EQUIPAMENTO TRIAXIAL DE CARGA REPETIDA

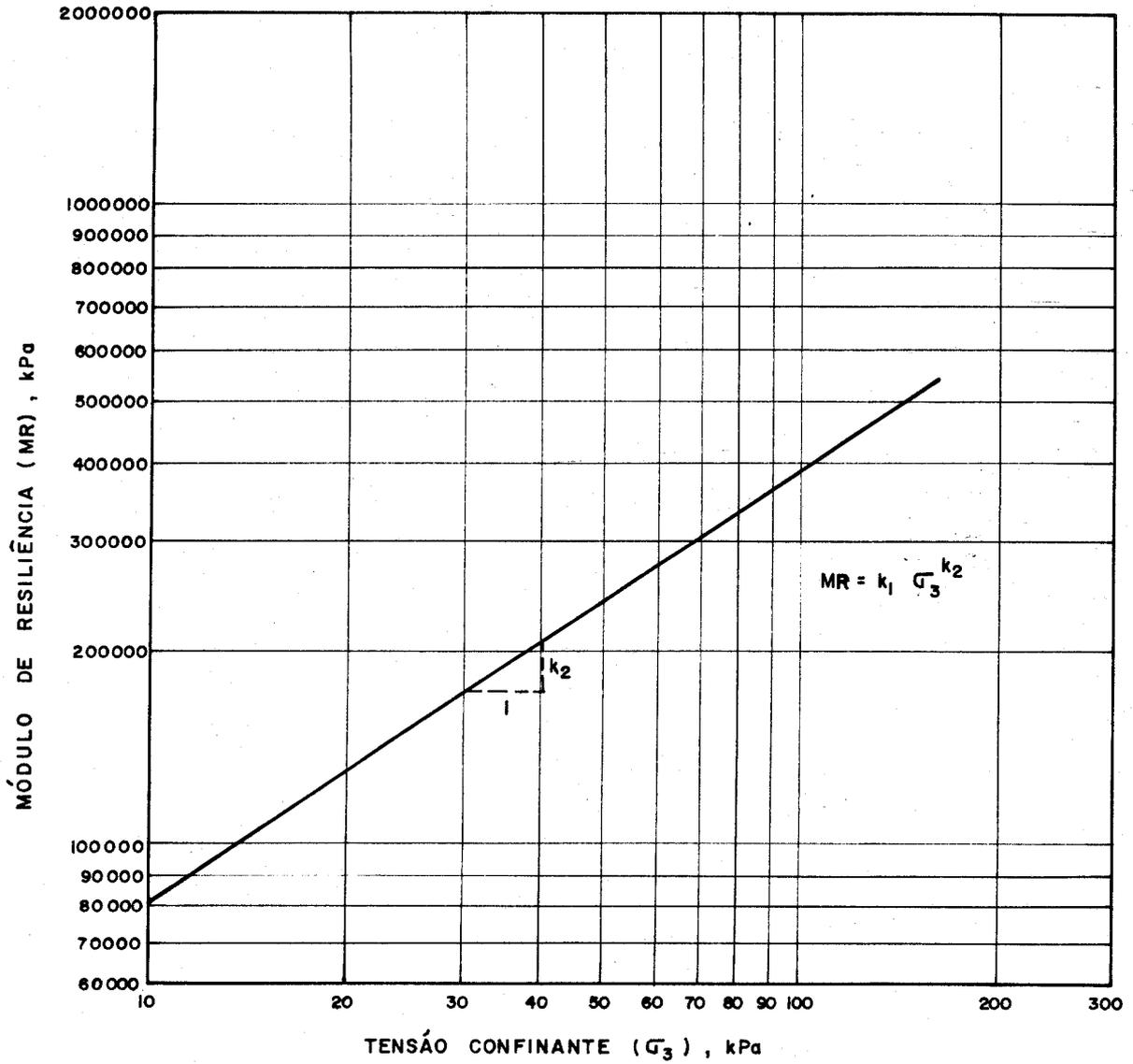


FIGURA 2 - MÓDULO DE RESILIÊNCIA VERSUS TENSÃO CONFINANTE

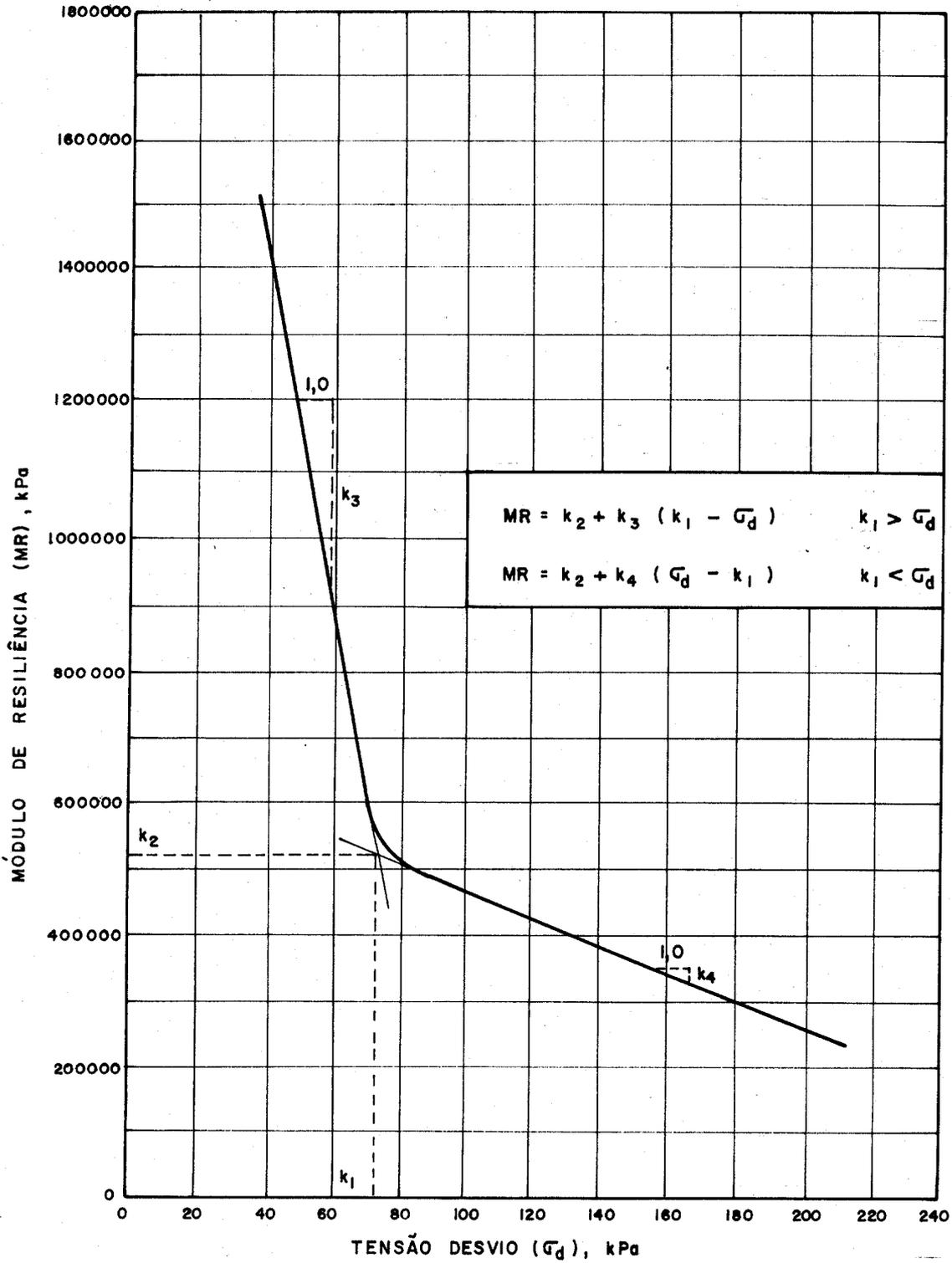


FIGURA 3 - MODULO DE RESILIÊNCIA VERSUS TENSÃO DESVIO

ANEXO D

MT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM**Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários****Norma rodoviária****Procedimento****DNER-PRO 263/94****p. 01/03****RESUMO**

Este documento, que é uma norma técnica, fixa as condições para emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários.

ABSTRACT

This document is a standard and contains requirements concerning the use of steel mill slags in the construction of road pavements.

SUMÁRIO

- 0 Apresentação
- 1 Objetivo
- 2 Referências
- 3 Definições
- 4 Condições gerais
- 5 Condições específicas

0 APRESENTAÇÃO

Esta Norma decorreu da necessidade de se adaptar, quanto à forma, a DNER-PRO 263/90 à DNER-PRO 101/93, mantendo-se inalterável o seu conteúdo técnico.

1 OBJETIVO

Esta Norma fixa o procedimento para escolha do tipo escórias de aciaria a serem utilizadas na construção de pavimentos rodoviários, definidos em normas específicas.

Macrodescriptores MT: DNER, especificação, pavimento**Microdescriptores DNER:** documentação, escória britada, pavimento**Palavras-chave IRRD/IPR:** norma (0139), escória (4521), escória granulada (4560), pavimento (2955)**Descriptores SINORTEC:** normas, escórias, pavimentos de estradas

Aprovada pelo Conselho de Administração em 13/03/90

Resolução nº -/- Sessão nº CA/ 9/90

Processo nº 51100013232/93-6

Autor: DNER/DrDTc (IPR)

Adaptação da DNER-PRO 263/90 à DNER-PRO 101/93, aprovada pela DrDTc em 13/04/94.

DNER-PRO 263/94

p. 02/03

2 REFERÊNCIAS

2.1 Normas complementares

Na aplicação desta Norma é necessário consultar:

- a) DNER-EM 262/94, designada Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários;
- b) ABNT EB-2103, de 1991, designada Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente.

2.2 Referências bibliográficas

No preparo desta Norma foram consultados os seguintes documentos:

- a) DNER-PRO 263/90, designada Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários;
- b) Silva, Genésio Almeida da; Schlosser, Richard; Macedo, Pedro Henrique Santos; Sanna, Henrique A.E.; Costa, Aloysio Campos; Carneiro, Francisco A. Vargas; Burnier, Henrique. Escórias siderúrgicas. Material de múltiplas aplicações, 1988;
- c) Vorläufige Technische Lieferbedingungen für LD-Schlacke in Tragschichten ohne Bindemittel, Forschungsgemeinschaft Eishütten Schlacken, 1988;
- d) Technische Lieferbedingungen für LD-Schlacke in Bituminösen Strassenbau, Forschungsgemeinschaft Eishütten Schlacken, 1986;
- e) DIN 4301 - Eishütten Schlacke und Metallhütten Schlacke in Bauwesen, 1981.

3 DEFINIÇÕES

Para os fins desta Norma são adotadas as seguintes definições:

3.1 Escórias siderúrgicas (ferrous metallurgical slags, Eishütten Schlacken). Escórias de alto forno e/ou de aciaria.

3.2 Escória de Aciaria

Resíduo silicioso que se forma quando da fabricação do aço.

3.3 Lote de estocagem

Lote de escória pronto para entrega formado em pátio de estocagem não excedendo a 2 000 toneladas.

3.4 Partida

Parte de um fornecimento de escória entregue de uma só vez ao comprador do produto.

3.5 Plano de qualidade

Documento em que se registram os procedimentos (funções), recursos e seqüência das atividades vinculadas à qualidade de escória.

3.6 Controle de qualidade

Técnicas e atividades operacionais utilizadas para satisfação de requisitos de qualidade da escória.

3.7 Declaração de conformidade

Forma de certificação de conformidade da escória com norma, pela qual um fabricante é responsável pela mesma, sem supervisão de qualquer entidade de certificação.

3.8 Nota de entrega (delivery note, Lieferschein)

Documento emitido pelo fornecedor, discriminando o volume, o tipo e a granulometria do material.

3.9 Rastreabilidade

Capacidade de se levantar o histórico da escória dentro de limites previamente estabelecidos por meio de sua identificação e registros.

4 CONDIÇÕES GERAIS

As escórias de aciaria devem satisfazer as condições gerais estabelecidas na Norma DNER-EM 262/94 (ver item 2.1.a).

5 CONDIÇÕES ESPECÍFICAS

5.1 As escórias de aciaria especificadas na Norma DNER-EM 262/94 (ver item 2.1.a) podem ser empregadas em construção de sub-base, base e em misturas betuminosas, em conformidade com as exigências aprovadas constantes de projetos a que elas se destinarem.

Nota: Deve haver rigoroso controle da escória de aciaria, quando da sua aceitação, relativamente à expansão, não devendo ser superior a 3%, ou o valor determinado pela especificação particular de projeto, conforme o Método PTM 130 (Pennsylvania Testing Method, USA), adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais.

ANEXO E

MT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM**Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários**

Norma rodoviária

Especificação de Material

DNER-EM 262/94
p. 01/04**RESUMO**

Este documento, que é uma norma técnica, apresenta requisitos gerais e específicos concernentes a escórias de aciaria, a serem aplicadas em camadas de pavimento. Apresenta definições, requisitos para amostragem, e para aceitação ou rejeição do produto.

ABSTRACT

This document presents specific and general requirements for steel mill slags suitable for highway pavement layers constructions. It presents definitions, requirements for sampling and for acceptance or rejection.

SUMÁRIO

- 0 Apresentação
- 1 Objetivo
- 2 Referências
- 3 Definições
- 4 Condições gerais
- 5 Condições específicas
- 6 Amostragem
- 7 Aceitação e rejeição

0 APRESENTAÇÃO

Esta Norma decorreu da necessidade de se adaptar, quanto à forma, a DNER-EM 262/90 à DNER-PRO 101/93, mantendo-se inalterável o seu conteúdo técnico.

Macrodescriptores MT: DNER, especificação, camada do pavimento

Microdescriptores DNER: escória britada, pavimento

Palavras-chave IRRD/IPR: norma (0139), escória (4561), escória granulada (4560), pavimento (2955)

Descritores SINORTEC: normas, escórias, pavimentos flexíveis

Aprovada pelo Conselho de Administração em 13/03/90

Resolução nº -/- Sessão nº CA/ 9/90

Processo nº 51100002605/94-9

Autor: DNER/DrDTc (IPR)

Adaptação da DNER-EM 262/90 à DNER-PRO 101/93,
aprovada pela DrDTc em 13/04/94.

1 OBJETIVO

1.1 Esta Norma fixa as condições exigíveis relativas a escórias de aciaria a serem utilizadas na construção de pavimentos rodoviários, segundo procedimentos definidos em normas específicas.

Nota: Esta Norma não fixa as condições exigíveis relativas a escórias de alto forno, matéria objeto de norma específica.

2 REFERÊNCIAS

2.1 Normas complementares

Na aplicação desta Norma é necessário consultar:

- a) ABNT EB-2103, de 1991 - Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente;
- b) ASTM C 88-76 - Soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate;
- c) ABNT MB-170, de 1983, registrada no SINMETRO como NBR-6465 - Agregados - determinação da abrasão "Los Angeles";
- d) ABNT MB-6, de 1987, registrada no SINMETRO como NBR-7216 - Amostragem de agregados;
- e) ABNT NB-1099, de 1987, registrada no SINMETRO como NBR-9941- Redução de amostras de campo de agregados para ensaio de laboratório;
- f) ABNT MB-2698, de 1987, registrada no SINMETRO como NBR-9937 - Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo;
- g) ABNT MB-1665, de 1982, registrada no SINMETRO como NBR-7251- Agregados em estado solto - determinação da massa unitária.

2.2 Referências bibliográficas

No preparo desta Norma foram consultados os seguintes documentos:

- a) DNER-EM 262/90 - Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários;
- b) Silva, Genésio Almeida da; Schlosser, Richard; Macedo, Pedro Henrique Santos; Sanna, Henrique A.E.; Costa, Aloysio Campos; Carneiro, Francisco A. Vargas; Burnier, Henrique. Escórias Siderúrgicas. Material de múltiplas aplicações. 1988;
- c) DIN 4301, Eisenhüttenschlacke und Metallhüttenschlacke im Bauwesen, 1981;
- d) Vorläufige Technische Lieferbedingungen für LD-Schlacke in Tragschichten ohne Bindemittel, Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken, 1988;
- e) Technische Lieferbedingungen für Ld-Schlacke im Bituminösen Strassenbau, Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken, 1986.

3 DEFINIÇÕES

Para os efeitos desta Norma, são adotadas as definições de (3.1) a (3.10):

3.1 Escórias de aciaria (ferrous metallurgical slags, Eisenhüttenschlaken).

Resíduo silicoso que se forma quando da fabricação do aço.

3.2 Escória britada

Escória que foi submetida a britagem.

3.3 Escória britada graduada

Escória britada que corresponde a uma das classes definidas em norma da ABNT em função dos resultados de peneiração.

3.4 Lote de estocagem

Lote de escória pronto para entrega formado em pátio de estocagem, não excedendo a 2 000 toneladas.

3.5 Partida

Parte de um fornecimento de escória entregue de uma só vez ao comprador do produto.

3.6 Plano de qualidade

Documento em que se registram os procedimentos, recursos e sequência das atividades vinculadas à qualidade da escória.

3.7 Controle de qualidade

Técnicas de atividades operacionais utilizadas para satisfação de requisitos de qualidade da escória.

3.8 Declaração de conformidade

Forma de certificação de conformidade da escória com norma, pela qual um fabricante é responsável pelo material, sem supervisão de qualquer entidade de certificação.

3.9 Nota de entrega (delivery note, Lieferschein)

Documento emitido pelo fornecedor, discriminando o volume, o tipo e a granulometria do material.

Nota: O fornecedor deve ainda emitir o certificado de garantia de qualidade do material, sempre que solicitado.

3.10 Rastreabilidade

Capacidade de se levantar o histórico da escória dentro de limites previamente estabelecidos por meio de sua identificação e registros.

4 CONDIÇÕES GERAIS

As escórias de aciaria deve atender aos requisitos de (4.1) a (4.3):

4.1 Avaliação do potencial de expansão

Determinada pelo Método PTM 130 (Pensylvania Testing Material), adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais, máximo de 3% de expansão ou o valor determinado pela especificação particular de projeto.

4.2 Teor de impurezas

As escórias de aciaria devem estar isentas de impurezas orgânicas, de contaminação com escórias de alto forno, solos e outros materiais que possam prejudicar os valores especificados em projeto;

4.3 Granulometria

A composição granulométrica da escoria de aciaria deve-se manter na proporção de 40% na faixa de até 1,27 cm (1/2") e 60% na faixa de 1,27 cm a 5,08 cm (2") de abertura nominal e deve atender à granulometria de projeto.

Nota: A granulometria da escória de aciaria destinada a revestimento deverá ser função de estudo em laboratório para atendimento das características exigidas em projeto.

5 CONDIÇÕES ESPECÍFICAS

5.1 A escória de aciaria deve obedecer aos seguintes limites:

- a) absorção de água (por cento em peso) 1% a 2%, determinada pela ABNT MB-2698, de 1987 (ver 2.1.f);
- b) massa específica de 3 g/cm³ a 3,5 g/cm³, determinada pela ABNT MB-2698, de 1987 (ver item 2.1.f);
- c) massa unitária de 1,5 kg/dm³ a 1,7 kg/dm³ determinada pela ABNT MB-1665, de 1982 (ver 2.1.g);
- d) o desgaste por abrasão Los Angeles da escoria de aciaria deve ser no máximo igual a 25 % para sub-base e revestimento, determinado pela ABNT MB-170, de 1983 (ver 2.1.c);
- e) a durabilidade ao sulfato de sódio, cinco ciclos, deverá ser de 0 a 5%, determinada pela ASTM C 88-76 (ver 2.1.b).

6 AMOSTRAGEM E FORMAÇÃO DE AMOSTRAS

6.1 A amostragem e a formação de amostra de escória devem ser realizadas em conformidade com as Normas ABNT MB-6, de 1987 e ABNT NB-1099, de 1987 ver (2.1.d) e (2.1.e), com ressalva de que o volume do lote de amostragem não deve ultrapassar 2 000 toneladas.

7 ACEITAÇÃO E REJEIÇÃO

7.1 O material será aceito se atender ao prescrito nesta Norma e nas especificações particulares definidas no projeto de engenharia em causa e obedecendo ao Manual de Qualidade de Laboratório do DNER.

7.2 Caso contrário, rejeitar.