



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DA CINZA PESADA  
EM ADIÇÃO AO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR)  
DESTINADO A CAMADA DE BASE DE PAVIMENTOS HÍBRIDOS**

**Dissertação de Mestrado  
apresentada ao Programa de  
Pós-graduação em Engenharia  
Civil da Universidade Federal  
de Santa Catarina como parte  
dos requisitos necessários para  
obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Civil**

**ALEXANDRE JOSE DA SILVA**

**Florianópolis – SC, Setembro de 2006.**

# **ESTUDO DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DA CINZA PESADA EM ADIÇÃO AO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR) DESTINADO A CAMADA DE BASE DE PAVIMENTOS HÍBRIDOS**

**ALEXANDRE JOSE DA SILVA**

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, especialidade ENGENHARIA CIVIL, área de concentração INFRA-ESTRUTURA E GERÊNCIA VIÁRIA, e aprovada na sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

---

**Profº Drº Glicério Trichês – UFSC**  
**(Coordenador do PPGEC)**

---

**Profº Drº Glicério Trichês – UFSC**  
**(Orientador)**

Comissão Examinadora:

---

**Profº Drº José Tadeu Balbo – USP**

---

**Profº Drº Janaíde Cavalcante Rocha – UFSC**

---

**Profº Drº Roberto Pinto – UFSC**

*Dedico este trabalho a toda a minha  
família e em especial a minha mãe  
que nunca deixou de me apoiar durante  
o desenvolvimento do mesmo e a qual  
eu amo tanto.*

*Não temas, porque eu sou contigo;  
não te assombres, porque eu sou teu Deus;  
eu te fortaleço, e te ajudo, e te sustento  
com minha destra fiel.  
(Isaías 41:40)*

## AGRADECIMENTOS

Quando se traça objetivos para se conquistar algo, não se imagina que sozinho nem sempre é possível alcançar tais objetivos. Mas, felizmente, para torná-lo realidade foi possível contar com a participação de algumas pessoas que, todas juntas, ajudaram a tornar este trabalho realidade fazendo-o adquirir o devido reconhecimento e sucesso. Portanto, assim gostaria de agradecer a algumas pessoas que de uma maneira ou outra me ajudaram a tornar este sonho realidade.

Primeiramente, agradeço a Deus por ter dado força, e não ter permitido que o desânimo tirasse a minha vontade de vencer.

Fico muito agradecido ao professor Dr<sup>o</sup> Glicério Trichês pela paciência, compreensão e orientação dada durante a realização deste trabalho. Também agradeço ao professor Dr<sup>o</sup> Roberto Pinto por ter contribuído no desenvolvimento, entendimento e esclarecimento de dúvidas durante a realização do ensaio com ultra-som, bem como na elaboração dos artigos publicados.

Agradeço a minha família, por ter entendido, compreendido e me apoiado durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Sou grato aos engenheiros Luciano Quadros (Odebrecht Engenharia e Construção) e Marcos Vallado Bogaert (Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A), pela amizade construída durante estes últimos quatro anos e também pelo apoio dado na hora mais importante que foi a ajuda na definição do tema de pesquisa.

Devido esta pesquisa ter demandado certa quantidade material, fico muito agradecido ao Sr<sup>o</sup> Pedro (Macoter Materiais de Construção Ltda) da cidade de Tubarão, no estado de Santa Catarina, por ter disponibilizado a areia natural, a Tractebel Energia por ter doado a cinza pesada e também a Saibrita Mineradora S.A que nunca reprimiu e sempre colaborou no fornecimento do agregado graúdo durante o decorrer da pesquisa.

Agradeço ao engenheiro civil Éderson Rogério Antonini e a psicóloga Dinara Signori, os quais tenho um carinho todo especial, pois por mais que a distância foi

grande não deixaram de se preocupar durante estes últimos três anos e provaram que amigo não é aquele que diz vá em frente, mas sim aquele que diz vou contigo.

Quero citar também meus tios Jandir e Bremair Batistti, Adefonso e Helena Schneider pelo apoio e por nunca terem deixado de me atender quando precisei e, ao tio e muito amigo Walter Gallina pelo apoio dado numa das horas mais difíceis da realização deste trabalho.

Pela amizade e apoio nunca recusado, agradeço aos amigos Armando, Claudia, Éderson Civiero, Fabio, Julio Scussel, Marcelo Sarmiento, Marcos Quadros, Marinéia, Marcio Fritzen, Maurício, Rosemeri e em especial ao Marilan e ao Breno, pois foram pessoas que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado.

Devido ao grande esforço desencadeado durante a realização dos ensaios de laboratório, sou grato ao professor Drº Marciano Macarini, pela paciência e devido ser o coordenador do laboratório de mecânica dos solos da UFSC, ter liberado o uso dos equipamentos e do espaço físico para a realização dos ensaios com o CCR, aos técnicos do laboratório de construção civil da UFSC, aos laboratoristas Vinícius, Tiago, Juliano e Tiago Machado por não terem recusado ajuda e auxílio quando solicitado durante a realização dos ensaios práticos.

Entre tantos, agradeço a todos aqueles de uma maneira ou outra participaram e apoiaram durante a realização desta pesquisa.

## SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XV
LISTA DE ABREVEATURAS, NOTAÇÕES E SIGLAS.....	XIX
RESUMO.....	XXI
ABSTRACT.....	XXII

### CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Introdução.....	1
1.2 – Objetivos.....	4
1.2.1 – Objetivo Geral.....	4
1.2.2 – Objetivo Específico.....	4
1.3 – Justificativa.....	5
1.3.1 – Apresentação do Trabalho.....	6

### CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Concreto Compactado com Rolo.....	8
2.1.1 – Definição.....	8
2.1.2 – Emprego do CCR no mundo.....	9
2.1.3 – Emprego do CCR no Brasil.....	11
2.2 – Vantagens e Benefícios do uso do CCR como Camada de Pavimento Rodoviário.....	15
2.3 – Limitações do CCR.....	16
2.4 – Materiais.....	16
2.4.1 – Agregados.....	16
2.4.1.1 – Agregado Miúdo: Propriedades.....	17
2.4.1.2 – Agregado Graúdo: Propriedades.....	19
2.4.1.3 – Composição Granulométrica.....	20
2.4.1.4 – Umidade dos Agregados.....	22
2.4.2 – Materiais Cimentícios.....	24
2.4.3 – Água.....	24
2.5 – Metodologia de Dosagem do CCR.....	25
2.6 – Definição da Umidade Ótima de Compactação.....	28
2.7 – Obtenção da Curva de Trabalhabilidade.....	29
2.8 – Definição da Energia de Compactação.....	33
2.9 – Moldagem de Amostra e Ensaio de Qualidade.....	35
2.10 – Propriedades do CCR no Estado Endurecido.....	36
2.10.1 – Determinação da Resistência à Compressão.....	37
2.10.2 – Determinação do Módulo de Elasticidade.....	38
2.10.3 – Determinação da Resistência à Tração na Flexão.....	39

2.10.4 – Ensaios Não-Destrutivos Através do Uso do Ultra-som .....	40
2.10.4.1 – Características Gerais do Ultra-som .....	41
2.11 – Comportamento a Fadiga do Concreto Compactado com Rolo .....	44
2.12 – Cinzas Úmidas ou Pesadas .....	45
2.12.1 – Uso da Cinza Pesada no Brasil.....	46
2.12.2 – Uso da Cinza Pesada no Mundo.....	48
2.12.3 – Características da Cinza Pesada Usada no Brasil (Complexo Termelétrico Jorge Lacerda) .....	50
2.12.4 – Características Mineralógicas das Cinzas Pesadas.....	51
2.12.5 – Características Físicas da Cinza Pesada.....	51
2.12.6 – Características Químicas da Cinza Pesada.....	54

### **CAPITULO 3 – METODOLOGIA**

3.1 – Considerações Iniciais .....	56
3.2 – Etapas da Pesquisa .....	59
3.2.1 – Etapa 1: Caracterização dos Materiais.....	59
3.2.2 – Etapa 2: Concreto de Referência – Determinação da Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca.....	60
3.2.3 – Etapa 3: Concreto com Adição de Cinza Pesada – Determinação da Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca.....	61
3.2.4 – Etapa 4: Concreto de Referência – Determinação das Propriedades Mecânicas.....	62
3.2.5 – Etapa 5: Concreto com Adição de Cinza Pesada – Determinação das Propriedades Mecânicas da Pesquisa.....	63
3.2.6 – Etapa 6: Análise dos Resultados .....	64
3.2.7 – Etapa 7: Dimensionamento do Pavimento.....	64

### **CAPITULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

4.1 – Caracterização dos Materiais .....	66
4.1.1 – Areia Natural.....	67
4.1.2 – Cinza Pesada .....	70
4.1.3 – Agregado Graúdo .....	74
4.1.3.1 – Composição Granulométrica.....	77
4.1.4 – Cimento.....	83
4.1.5 – Água.....	84
4.2 – Dosagem do CCR.....	85
4.3 – Curvas de Compactação .....	86
4.4 – Resistência à Compressão Simples .....	93
4.5 – Módulo de Elasticidade .....	97
4.6 – Resistência à Tração na Flexão.....	105
4.7 – Propagação da Velocidade de Pulso do Ultra-som .....	111



## **CAPITULO 5 – APLICAÇÃO DOS RESULTADOS AO DIMENSIONAMENTO DE UMA ESTRUTURA DE PAVIMENTO**

5.1 – Dimensionamento de Pavimento Híbrido .....	123
5.2 – Dimensionamento do Pavimento Flexível.....	125
5.2.1 – Dados para o Dimensionamento .....	125
5.2.2 – Espessura Total do Pavimento .....	125
5.2.3 – Deflexão Admissível de Projeto.....	126
5.2.4 – Espessura Mínima do Revestimento Betuminoso ( $H_{CB}$ ) .....	126
5.2.5 – Valor Estrutural da Camada Betuminosa de Revestimento.....	126
5.2.6 – Espessura da Camada Granular ( $H_{CG}$ ).....	126
5.2.7 – Análise Tensão-Deformação da Estrutura Flexível.....	127

## **CAPITULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

6.1 – Conclusões .....	130
6.2 – Recomendações para Trabalhos Futuros .....	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	132
ANEXOS .....	147

## **LISTA DE FIGURAS**

### **CAPITULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

<i>Figura 2.1 – Composições granulométricas do CCR empregado em alguns países .....</i>	22
<i>Figura 2.2 – Composições granulométricas empregadas no Brasil .....</i>	22
<i>Figura 2.3 – Curva de compactação (MARCHAND et al, 1998) .....</i>	28
<i>Figura 2.4 – Aparelho Vebe modificado para ensaios de CCR (HOLANDA et al, 1993) .....</i>	31
<i>Figura 2.5 – Curva de trabalhabilidade (HOLANDA et al, 1993) .....</i>	32
<i>Figura 2.6 – Esquema de funcionamento de ultra-som pelo modo de transmissão direta medido em CP's cilíndricos .....</i>	42
<i>Figura 2.7 – Esquema de funcionamento de ultra-som pelo modo de transmissão indireta medido em CP's prismáticos .....</i>	43
<i>Figura 2.8 – Cinza pesada usada nos Estados Unidos, Dinamarca, Alemanha e Países Baixos (EDWARDS, 2003) .....</i>	49
<i>Figura 2.9 – Cinza pesada usada no Brasil .....</i>	49
<i>Figura 2.10 – Difração de raio-X da cinza pesada: Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CHERIAF et al, 1999) .....</i>	54
<i>Figura 2.11 – Morfologia da cinza pesada: Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CHERIAF et al, 1999) .....</i>	54

### **CAPITULO 4 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

<i>Figura 4.1 – Materiais usado na pesquisa .....</i>	66
<i>Figura 4.2 – Curva granulométrica da areia natural .....</i>	68
<i>Figura 4.3 – Curva de inchamento da areia natural .....</i>	69
<i>Figura 4.4 – Cinza pesada após secagem em estufa durante 24 horas .....</i>	71
<i>Figura 4.5 – Curva granulométrica da cinza pesada .....</i>	72

<i>Figura 4.6 – Curva de inchamento da cinza pesada .....</i>	72
<i>Figura 4.7 – Curva granulométrica dos agregados graúdos .....</i>	76
<i>Figura 4.8 – Composição granulométrica inicial do CCR.....</i>	78
<i>Figura 4.9 – Composição granulométrica do CCR após a incorporação da areia natural .....</i>	79
<i>Figura 4.10 – Composição granulométrica para o CCR com agregado peneirado.....</i>	81
<i>Figura 4.11 – Comportamento da curva granulométrica com a substituição da areia natural pela cinza pesada .....</i>	82
<i>Figura 4.12 – Situação da curva granulométrica após a substituição da areia natural por 100% de cinza pesada .....</i>	83
<i>Figura 4.13 – Colocação e mistura dos materiais na betoneira de 320 litros .....</i>	86
<i>Figura 4.14 – Colocação da água e decorrência do tempo de mistura para produção do CCR 87</i>	
<i>Figura 4.15 – Equipamentos e procedimentos adotados para produção dos CP's de CCR 87</i>	
<i>Figura 4.16 – Curva de compactação da mistura sem cimento.....</i>	89
<i>Figura 4.17 – Curva de compactação do CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento.....</i>	89
<i>Figura 4.18 – Curva de compactação do CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento.....</i>	90
<i>Figura 4.19 – Curva de compactação do CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento.....</i>	90
<i>Figura 4.20 – Massa específica aparente seca máxima do CCR para os teores de cinza pesada adotados .....</i>	92
<i>Figura 4.21 – Procedimento adotado para a realização do capeamento e ensaio de resistência à compressão simples dos CP's de CCR.....</i>	94
<i>Figura 4.22 – Resistência à compressão do CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento.....</i>	95
<i>Figura 4.23 – Resistência à compressão do CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento.....</i>	95
<i>Figura 4.24 – Resistência à compressão do CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento.....</i>	96
<i>Figura 4.25 – Resistência à compressão do CCR aos 28 dias em função do consumo de cimento e teor de cinza pesada usado.....</i>	97
<i>Figura 4.26 – Seqüência adotada na execução do ensaio de módulo de deformação... 98</i>	

<i>Figura 4.27 – Módulo de deformação em função do consumo de cimento para o CCR de referência.....</i>	101
<i>Figura 4.28 – Módulo de deformação em função do consumo de cimento para o CCR com 25% de cinza pesada .....</i>	101
<i>Figura 4.29 – Módulo de deformação em função do consumo de cimento para o CCR com 50% de cinza pesada .....</i>	102
<i>Figura 4.30 – Módulo de deformação em função do consumo de cimento para o CCR com 100% de cinza pesada.....</i>	102
<i>Figura 4.31 – Relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão para a mistura de referência .....</i>	103
<i>Figura 4.32 – Relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão para a mistura com substituição de 25% da areia natural por cinza pesada.....</i>	103
<i>Figura 4.33 – Relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão para a mistura com substituição de 50% da areia natural por cinza pesada .....</i>	104
<i>Figura 4.34 – Relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão para a mistura com substituição de 100% da areia natural por cinza pesada .....</i>	104
<i>Figura 4.35 – Ensaio de resistência à tração na flexão com prensa hidráulica .....</i>	106
<i>Figura 4.36 – Resistência á tração na flexão do CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento.....</i>	107
<i>Figura 4.37 – Resistência á tração na flexão do CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento.....</i>	107
<i>Figura 4.38 – Resistência á tração na flexão do CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento.....</i>	108
<i>Figura 4.39 – Resistência à tração na flexão do CCR aos 90 dias em função do consumo de cimento e uso da cinza pesada .....</i>	109
<i>Figura 4.40 – Relação Resistência à tração na flexão e resistência à compressão para a idade de 28 dias .....</i>	110
<i>Figura 4.41 – Relação Resistência à tração na flexão e resistência à compressão para a idade de 90 dias .....</i>	110
<i>Figura 4.42 – Ensaio de pulso do ultra-som em CP's prismáticos 15 x 15 x 50 cm ...</i>	112
<i>Figura 4.43 – Variação da velocidade de pulso do ultra-som com o tempo para o CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento (CP's cilíndricos).....</i>	113
<i>Figura 4.44 – Variação da velocidade de pulso do ultra-som com o tempo para o CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento (CP's cilíndricos).....</i>	114

<i>Figura 4.45 – Variação da velocidade de pulso do ultra-som com o tempo para o CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento (CP's cilíndricos).....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 4.46 – Variação da velocidade de pulso do ultra-som com o tempo para o CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento (CP's prismáticos).....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 4.47 – Variação da velocidade de pulso do ultra-som com o tempo para o CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento (CP's prismáticos).....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 4.48 – Variação da velocidade de pulso do ultra-som com o tempo para o CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento (CP's prismáticos).....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 4.49 – Relação entre a velocidade de pulso do ultra-som e a resistência à compressão para o CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 4.50 – Relação entre a velocidade de pulso do ultra-som e a resistência à compressão para o CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 4.51 – Relação entre a velocidade de pulso do ultra-som e a resistência à compressão para o CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 4.52 – Correlação entre a resistência à tração na flexão e a velocidade de pulso do ultra-som para o CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 4.53 – Correlação entre a resistência à tração na flexão e a velocidade de pulso do ultra-som para o CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 4.54 – Correlação entre a resistência à tração na flexão e a velocidade de pulso do ultra-som para o CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento.....</i>	<i>121</i>

## **LISTA DE TABELAS**

### **CAPITULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

<i>Tabela 2.1 – Fatores que afetam as propriedades do CCR (PITTA &amp; HURTADO DIAZ, 1991).....</i>	<i>13</i>
<i>Tabela 2.2 – Recomendações de espessuras de base de concreto rolado em função da intensidade de tráfego (FUJIMURA et al, 1999).....</i>	<i>14</i>
<i>Tabela 2.3 – Tempos correspondentes para o ensaio de consistência (PROCEDIMENTOS DE FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS, 2002) .....</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 2.4 – Número de golpes para cada camada para a moldagem de CP's cilíndricos de 15 x 30 cm e respectivas energias de compactação (HURTADO DIAZ, 1993) .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 2.5 – Número de golpes para cada camada para a moldagem de CP's prismáticos de 15 x 15 x 50 cm e respectivas energias de compactação (HURTADO DIAZ, 1993).....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 2.6 – Propriedades mecânicas típicas do CCR como base (BALBO, 2004).....</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 2.7 – Condições do concreto em relação à propagação de ondas ultra-sonicas (PETRUCCI,1998).....</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 2.8 – Características gerais da cinza pesada (ABREU, 1999).....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 2.9 – Composição química da cinza pesada (CHERIAF et al, 1999).....</i>	<i>55</i>

### **CAPITULO 3 – METODOLOGIA**

<i>Tabela 3.1 – Nomenclatura das misturas de CCR .....</i>	<i>62</i>
--	-----------

### **CAPITULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

<i>Tabela 4.1 – Composição granulométrica da areia natural.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 4.2 – Análise do inchamento da areia natural .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 4.3 – Massa específica e massa unitária da areia natural.....</i>	<i>70</i>

<i>Tabela 4.4 – Análise granulométrica da cinza pesada</i> .....	71
<i>Tabela 4.5 – Análise do inchamento da cinza pesada</i> .....	72
<i>Tabela 4.6 – Massa específica e massa unitária da cinza pesada</i> .....	73
<i>Tabela 4.7 – Análise granulométrica da brita 1” (25 mm)</i> .....	74
<i>Tabela 4.8 – Análise granulométrica da brita ¾” (19 mm)</i> .....	75
<i>Tabela 4.9 – Análise granulométrica do pedrisco</i> .....	75
<i>Tabela 4.10 – Análise granulométrica do pó de pedra</i> .....	76
<i>Tabela 4.11 – Ensaio físicos dos agregados graúdos</i> .....	77
<i>Tabela 4.12 – Porcentagem de material usado na composição granulométrica do CCR</i> 78	78
<i>Tabela 4.13 – Porcentagem de material usado na composição granulométrica do CCR</i> <i>após o incremento da areia natural</i> .....	79
<i>Tabela 4.14 – Porcentagem de material usado para a composição do agregado</i> <i>peneirado (&lt;2,38mm)</i> .....	80
<i>Tabela 4.15 – Porcentagem de material usado na composição granulométrica do CCR</i> <i>após o incremento do agregado peneirado</i> .....	81
<i>Tabela 4.16 – Caracterização do cimento (Cimentos Votorantin, 2005)</i> .....	84
<i>Tabela 4.17 – Índices físico-químicos da água (Companhia Catarinense de Água e</i> <i>Saneamento – CASAN (2005)</i> .....	84
<i>Tabela 4.18 – Úmida ótima e massa específica aparente seca máxima do CCR</i> .....	91
<i>Tabela 4.19 – Traço adotado para as misturas do CCR</i> .....	93
<i>Tabela 4.20 – Resistência à compressão das diferentes misturas de CCR com o</i> <i>decorrer do tempo</i> .....	94
<i>Tabela 4.21 – Resistência à compressão e módulo de deformação aos 28 e 90 dias</i> <i>obtida nos CP’s usados no ensaio de módulo de deformação</i> .....	100
<i>Tabela 4.22 – Resistência à tração na flexão das misturas de CCR com o decorrer do</i> <i>tempo</i> .....	106
<i>Tabela 4.23 – Porcentagem da resistência à tração na flexão estimada em função da</i> <i>resistência à compressão</i> .....	109
<i>Tabela 4.24 – Velocidade de pulso do ultra-som medida nos CP’s cilíndricos</i> .....	112

*Tabela 4.25 – Velocidade de pulso do ultra-som medida nos CP's prismáticos ..... 113*

*Tabela 4.26 – Dados da resistência à tração na flexão obtidos a partir da modelagem entre a relação  $R_t/R_c$  e velocidade de pulso do ultra-som ..... 119*

## **CAPITULO 5 – APLICAÇÃO DOS RESULTADOS AO DIMENSIONAMENTO DE UMA ESTRUTURA DE PAVIMENTO**

*Tabela 5.1 – Parâmetros mecânicos dos materiais usados no dimensionamento ..... 124*

*Tabela 5.2 – Configuração adotada para o pavimento composto ..... 125*

*Tabela 5.3 – Configuração adotada para o pavimento flexível ..... 128*

## **ANEXOS - DADOS EXPERIMENTAIS**

*Tabela A1 – Faixas granulométricas usadas no Brasil para o CCR ..... 148*

*Tabela A2 – Faixas granulométricas usadas no mundo para o CCR ..... 148*

*Tabela A3 – Massa específica do CCR ..... 149*

*Tabela A4 – Influencia da cinza pesada na massa específica aparente seca máxima do CCR ..... 149*

*Tabela A5 – Dados experimentais obtidos no ensaio de compactação das misturas sem cimento ..... 150*

*Tabela A6 – Dados experimentais obtidos no ensaio de compactação das misturas com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento ..... 151*

*Tabela A7 – Dados experimentais obtidos no ensaio de compactação das misturas com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento ..... 152*

*Tabela A8 – Dados experimentais obtidos no ensaio de compactação das misturas com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento ..... 153*

*Tabela A9 – Massa específica aparente seca máxima do CCR usado nos CP's cilíndricos de 15 x 30 cm com o decorrer do tempo ..... 154*

*Tabela A10 – Massa específica aparente seca máxima do CCR usado nos CP's prismáticos 15 x 15 x 50 cm com o decorrer do tempo ..... 155*

*Tabela A11 – Resistência à compressão do CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento ..... 156*

*Tabela A12 – Resistência à compressão do CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento ..... 156*



<i>Tabela A13 – Resistência à compressão do CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento .....</i>	<i>156</i>
<i>Tabela A14 – Módulo de deformação do CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento .....</i>	<i>157</i>
<i>Tabela A15 – Módulo de deformação do CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento .....</i>	<i>157</i>
<i>Tabela A16 – Módulo de deformação do CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento .....</i>	<i>157</i>
<i>Tabela A17 – Resistência à tração na flexão do CCR após 3 dias de cura em câmara úmida.....</i>	<i>158</i>
<i>Tabela A18 – Resistência à tração na flexão do CCR após 7 dias de cura em câmara úmida.....</i>	<i>158</i>
<i>Tabela A19 – Resistência à tração na flexão do CCR após 28 dias de cura em câmara úmida.....</i>	<i>159</i>
<i>Tabela A20 – Resistência à tração na flexão do CCR após 90 dias de cura em câmara úmida.....</i>	<i>159</i>
<i>Tabela A21 – Dados experimentais obtidos no ensaio de velocidade de pulso do ultrassom para o CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento.....</i>	<i>160</i>
<i>Tabela A22 – Dados experimentais obtidos no ensaio de velocidade de pulso do ultrassom para o CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento.....</i>	<i>161</i>
<i>Tabela A23 – Dados experimentais obtidos no ensaio de velocidade de pulso do ultrassom para o CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento.....</i>	<i>162</i>

## **LISTA DE ABREVEATURAS, NOTAÇÕES E SIGLAS**

DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transporte
CNT	Confederação Nacional de Transporte
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
CCR	Concreto Compactado com Rolo
MEAS	Massa Específica Aparente Seca
MEAS <sub>máx.</sub>	Massa Específica Aparente Seca Máxima
EUA	Estados Unidos da América
SP	São Paulo
SC	Santa Catarina
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
DER	Departamento Estadual de Estradas de Rodagem
MTB	Master Builders Technologies
ARTBA	American Road & Transportation Builders Association
ASTM	American Society for Testing and Materials
D <sub>máx.</sub>	Dimensão Máxima Característica do Agregado
PCA	Portland Cement Association
CP's	Corpos-de-prova
TRMCA	Tennessee Concrete Plants Association
USACE	United States Army Corps of Engineers
FLY – ASH	Cinza Leve ou Volante
BOTTOM – ASH	Cinza Úmida ou Pesada
FATMA	Fundação do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
AASHTO	American Association of States Highway and Transportation Officials
SiO <sub>2</sub>	Óxido de Silício
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Alumínio
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Ferro
MgO	Óxido de Magnésio
CaO	Óxido de Cálcio
Na <sub>2</sub> O	Óxido de Sódio

$K_2O$	Óxido de Potássio
$TiO_2$	Dióxido de Titânio
S	Enxofre
LOI	Lost to the fire (perda ao fogo)
CASAN	Companhia Catarinense de Água e Saneamento
SSS	Saturado Superfície Seca
CP	Corpo-de-prova
M 0/0	Mistura sem Cimento e sem Cinza Pesada
M 0/25	Mistura sem Cimento e com 25% Cinza Pesada
M 0/50	Mistura sem Cimento e com 50% Cinza Pesada
M 0/100	Mistura sem Cimento e com 100% Cinza Pesada
M 80/0	Mistura com 80 kg/m <sup>3</sup> de Cimento e 0% de Cinza Pesada
M 80/25	Mistura com 80 kg/m <sup>3</sup> de Cimento e 25% de Cinza Pesada
M 80/50	Mistura com 80 kg/m <sup>3</sup> de Cimento e 50% de Cinza Pesada
M 80/100	Mistura com 80 kg/m <sup>3</sup> de Cimento e 100% de Cinza Pesada
M 120/0	Mistura com 120 kg/m <sup>3</sup> de Cimento e 0% de Cinza Pesada
M 120/25	Mistura com 120 kg/m <sup>3</sup> de Cimento e 25% de Cinza Pesada
M 120/50	Mistura com 120 kg/m <sup>3</sup> de Cimento e 50% de Cinza Pesada
M 120/100	Mistura com 120 kg/m <sup>3</sup> de Cimento e 100% de Cinza Pesada
M 160/0	Mistura com 160 kg/m <sup>3</sup> de Cimento e 0% de Cinza Pesada
M 160/25	Mistura com 160 kg/m <sup>3</sup> de Cimento e 25% de Cinza Pesada
M 160/50	Mistura com 160 kg/m <sup>3</sup> de Cimento e 50% de Cinza Pesada
M 160/100	Mistura com 160 kg/m <sup>3</sup> de Cimento e 100% de Cinza Pesada
$h_{ótimo}$	Umidade Ótima
Rt/Rc	Relação entre Resistência à Tração na Flexão e Resistência à Compressão
$R_{28}$	Resistência aos 28 dias
$R_{90}$	Resistência aos 90 dias

## **RESUMO**

O crescente carregamento imposto pelo tráfego aos pavimentos brasileiros tem levado ao aparecimento excessivo de trincas e afundamento da estrutura. Uma das formas de combater estas patologias seria a execução de estruturas com camadas cimentadas. Paralelamente, é observada uma crescente preocupação com a preservação do meio ambiente e, no setor rodoviário, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas para aproveitar os subprodutos originados na indústria. Esta pesquisa apresenta os resultados da incorporação de diferentes teores de cinza pesada, proveniente da Termelétrica Jorge Lacerda localizada na cidade de Capivari de Baixo no Estado de Santa Catarina (SC), ao Concreto Compactado com Rolo (CCR), em substituição à areia natural que é empregada na sua composição granulométrica. De modo a poder comparar os valores foram utilizados consumos de cimento da ordem de 80, 120 e 160 kg/m<sup>3</sup>. Após definida a composição granulométrica, adotou-se 22% da área natural, e esta seria substituída por 25, 50 e 100% de cinza pesada na dosagem do CCR. Dentre os objetivos traçados do estudo experimental com o CCR foram realizados ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração na flexão. Como ensaio não destrutivo mediu-se a velocidade de propagação dos pulsos do ultra-som no CCR com o objetivo de poder contribuir para a estimativa das propriedades mecânicas. Após a determinação das propriedades mecânicas, adotaram-se os melhores resultados encontrados para a mistura com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento para a elaboração do dimensionamento da estrutura do pavimento híbrido. Com os resultados obtidos no dimensionamento é possível verificar que para um mesmo nível de tráfego, o pavimento híbrido resulta em espessuras bem menores para a camada de revestimento e sub-base se comparado ao pavimento flexível. É muito provável então que este tipo de pavimento apresente um custo inicial de implantação inferior ao do pavimento flexível. É possível concluir que a adição da cinza pesada faz com que ocorra uma melhor interação da interface argamassa/agregado diminuindo os espaços vazios existentes e resultando uma melhor estabilidade das misturas. Os valores da resistência à compressão aos 90 dias para as misturas com 80, 120 e 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento resultaram num aumento de 146, 46 e 29,50%, respectivamente. Para a resistência à tração na flexão observou-se nas misturas com 80 e 120, 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento um acréscimo de 33%, 16% e 48%, respectivamente. Para valores de resistência de tração na flexão da ordem de 2,0 MPa, a substituição da areia natural por cinza pesada resultou uma economia de 11% no consumo de cimento. Nas misturas com 120 e 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento a adição da cinza pesada reduz a rigidez se comparado aos valores da mistura de referência. Foi possível obter relações significativas entre a velocidade de pulso de ultra-som e a resistência à compressão e a tração na flexão bem como para o módulo de deformação, o que indica que é viável o controle da resistência da camada durante o processo construtivo, “in loco”. Devido ao comportamento positivo que a cinza pesada apresentou, torna-se possível dar um destino nobre a este resíduo que atualmente é apenas usado em aterros nos arredores do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, colaborando com a gestão ambiental do resíduo.

## **ABSTRACT**

The growing load imposed for the traffic to the pavement in Brazil, cause an excessive cracking and sinking in the structure. One in the ways of combating these pathologies would be the execution of structures with cemented layers. Parallel, a growing concern is observed with the preservation of the environment and, in the section road, several researches have been developed to take advantage of the by-products originated in the industry. This research presents the results of the incorporation of different tenors of bottom ash, originating from Jorge Lacerda Thermoelectric located in the city of Capivari of Baixo in the state of Santa Catarina (SC), to the Roller Compacted Concrete (RCC) in substitution to the natural sand that it is used in yours grain sized composition. By mode to compare the values consumptions of cement of the order of 80, 120 and 160 kg/m<sup>3</sup>. After defined the composition grain sized reference it was adopted 22% of the natural size and this would be substituted by 25, 50 and 100% of bottom ash in the dosage of RCC. Among the objectives plans of the experimental study with the RCC they were accomplished analysis of the compressive strength, modulus of elasticity and tensile strength in the flexing. How analysis no destructive testing was measured the speed of propagation of the pulses of the ultrasound in the RCC with the objective of the to contribute to the estimate of the mechanical properties. After the determination to the mechanical properties the best results were adopted found for the mixture with 120 cement kg/m<sup>3</sup> for the elaboration of the dimensioning of the structure of the hybrid pavement. With the results obtained in the dimensioning it is possible to verify that for a same level of traffic the hybrid pavement it results in thicknesses very smaller for the covering layer and sub-base if compared with the flexible pavement. It is very probable then that this pavement type presents an initial cost of inferior implantation to the of the flexible pavement. It is possible to conclude that the addition of the bottom ash it does with that it happens a better interaction of the interface mortar/aggregate reducing the existent empty spaces and resulting a better stability of the mixtures. The values of the compressive strength to the 90 days for the mixtures with 80, 120 e 160 kg/m<sup>3</sup> of cement had resulted in an increase of 146, 46 and 29.50%, respectively. For the tensile strength in the flexion it was observed in the mixtures with 80 and 120, 160 kg/m<sup>3</sup> of cement an addition of 33%, 16% and 48%, respectively. For values of resistance of tension in the flexion of the order of 2,0 MPa, the substitution of the natural sand bottom ash it resulted an economy of 11% in the cement consumption. In the mixtures with 120 and 160 kg/m<sup>3</sup> of cement the addition of the bottom ash it reduces the rigidity if compared to the values of the reference mixture. It was possible to obtain significant relationships between the speed of ultrasound pulse and the compressive strength and traction in flexion as well as for the modulus of the elasticity what indicates that it is viable the control of the resistance of the layer during the constructive process, "in loco". Due to the positive behavior that the bottom ash presented, it possible to give a noble destiny to this residue that now is just used in embankments in the surroundings of the power plant Jorge Lacerda Thermoelectric collaborating with the environmental administration of the residue.

# CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

## 1.1 – INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem-se observado uma falta de investimentos tanto para a construção como para a manutenção da malha viária brasileira, resultando numa queda acentuada na serventia das rodovias.

Na pesquisa realizada pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (2001), atual Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes – DNIT, o percentual da malha pavimentada no país é de 9,52%, ou seja, de um total de 1.724.924 km de malha viária no país, somente 164.247 km tem algum tipo de estrutura de pavimento.

Em pesquisa realizada em 2005 pela Confederação Nacional de Transporte (CNT), dos 81.944 km de rodovias avaliadas, 72% encontravam-se em situação regular, ruim ou péssima, o que corresponde a 60.000 km de rodovias pesquisadas. Dentre as deficiências encontradas se destacam a situação precária do pavimento, a sinalização e a geometria viária. Quanto às patologias encontradas no pavimento, os principais problemas encontrados foram: desgastes, ondulações, buracos, trincas da malha e remendos ou ainda segmentos onde o pavimento estava completamente destruído.

Por ocasião do milagre brasileiro, em particular a região Sul, a grande demanda por cimento gerada pela construção civil associada à necessidade de pavimentar grandes extensões em pouco tempo, fez com que se consolidasse entre nós a execução de estruturas de pavimento do tipo flexível nas quais as camadas de base e/ou sub-base são em materiais granulares britados.

Sabe-se hoje que tal arranjo de camadas, notadamente quando assentes em subleitos resilientes, conduz a uma estrutura muito deformável fazendo com que o revestimento asfáltico trabalhe a elevados níveis de deformação de tração.

Frente ao crescente carregamento que está sendo imposto aos pavimentos dos principais troncos rodoviários brasileiros, tal concepção estrutural não tem conseguido atender ao padrão que se deseja para a estrutura do pavimento, sendo frequentemente constatado que a vida útil do pavimento é menor do que aquela projetada.

Devido a este quadro, torna-se muito importante pesquisar novas tecnologias que resultem estruturas de maior rigidez com o objetivo de se conseguir minimizar o excesso de trincas e afundamento da estrutura dos pavimentos que vêm ocorrendo precocemente nas rodovias brasileiras.

Uma das alternativas com potencial para minimizar a ocorrência precoce destas patologias seria o desenvolvimento de pavimentos híbridos ou compostos, onde a sua estrutura seria formada por camadas rígidas e flexíveis. Nesta concepção de estrutura, o revestimento “trabalha” a baixos níveis de deformação de tração ou até mesmo em compressão, minimizando a probabilidade de fadiga da mistura asfáltica.

Como camada rígida, o Concreto Compactado com Rolo (CCR) é uma tecnologia muito favorável a ser pesquisada, pois combina custo atrativo e facilidade de execução com maior durabilidade, resistência e baixa deformação e, por ser um material rígido absorve e distribui melhor o carregamento imposto pelo tráfego, minimizando assim os efeitos negativos causados pelas cargas nos pavimentos.

Entretanto, há que se tomar cuidado com a propagação das trincas de retração desta camada para a de revestimento necessitando-se de pesquisar mecanismos que inibam o desenvolvimento deste fenômeno.

Em relação ao uso do CCR, no Brasil o seu emprego na construção rodoviária começou timidamente partir da década de 1980. Nestes últimos 25 anos, não houve tanta evolução no seu emprego, sendo que na maioria das aplicações ele tem sido usado como sub-base de pavimentos rígidos ou em camadas de base de pavimentos com peças pré-moldadas.

Um aspecto interessante que pode ser destacado na dosagem do CCR é que se consegue adequar o uso de materiais não convencionais, de características cimentícias, dentre os quais podem ser destacados como, por exemplo, a cinza volante (Fly-ash), a sílica ativa e os materiais pozolânicos que são empregados como adições ao concreto.

Assim, a busca por materiais alternativos na dosagem do CCR representa um caminho importante de pesquisa. A disponibilidade e obtenção da matéria-prima, como os agregados naturais, além de muitas vezes precisarem ser transportados de locais distantes da obra, aumentando o valor final de construção e/ou manutenção do pavimento, estão sendo cada vez mais controlados quanto a sua exploração pelos órgãos e leis ambientais.

Por outro lado, tem havido no Brasil uma progressiva conscientização da necessidade de minimizar os impactos ambientais decorrentes da construção de uma rodovia, notadamente após a resolução do CONAMA de 1996 quanto à exploração dos recursos naturais.

Particularmente na região sul do estado de Santa Catarina – SC, as atividades relacionadas com a exploração do carvão mineral têm deixado um passivo ambiental cujo enfrentamento para a sua mitigação tem sido pouco eficiente.

Somente no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizada no município de Capivari de Baixo – SC e junto a BR 101 (Atualmente em duplicação), são geradas anualmente 286,3 mil toneladas de cinza pesada (FUGARO, 2004). Esta é armazenada em bacias de sedimentação junto ao complexo termelétrico, gerando um grande passivo ambiental.

Este subproduto tem sido aplicado como material de aterro na região, porém com um duvidoso controle sobre a lixiviação de produtos contaminantes contidos na sua composição química (FARIAS, 2005).

O presente trabalho de pesquisa trata de aliar a busca de alternativas para contribuir com a gestão da cinza pesada produzida no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda com a necessidade de pesquisar e desenvolver novos tipos de materiais e de



estruturas de pavimentos para fazer frente ao pesado tráfego que atua nos principais troncos da malha rodoviária brasileira.

Nesta busca, a incorporação da cinza pesada na dosagem do CCR em substituição a areia natural foi o caminho percorrido. Paralelamente, também se buscou no trabalho avaliar o potencial da aplicação do ensaio de ultra-som para caracterizar as propriedades mecânicas das misturas com o objetivo de estabelecer um procedimento de controle tecnológico que poderá ser empregado no campo durante o processo construtivo de camadas com este material.

## **1.2 – OBJETIVOS**

### **1.2.1 – Objetivo Geral**

O objetivo geral desta pesquisa é estudar a influência da substituição da areia natural pela cinza pesada gerada no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda no comportamento mecânico do Concreto Compactado com Rolo (CCR) com a perspectiva de seu emprego em camadas de base de pavimentos híbridos ou compostos.

### **1.2.2 – Objetivos Específicos**

- Avaliar a influência da adição da cinza pesada nos parâmetros de compactação do CCR;
- Avaliar a variação da resistência à compressão, módulo de elasticidade e a resistência à tração na flexão do CCR com a substituição parcial e/ou total do areia natural pela cinza pesada;
- Avaliar o potencial de emprego do ensaio de ultra-som no controle de execução em campo através da técnica de propagação de ondas.
- Implementar os resultados obtidos para a mistura com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento no dimensionamento de uma estrutura de pavimento híbrido contendo camada de CCR com a cinza pesada incorporada na dosagem deste concreto; e,

### 1.3 – JUSTIFICATIVA

Com o crescente carregamento imposto pelo tráfego aos pavimentos brasileiros, se faz necessário o desenvolvimento de estudos no sentido de buscar materiais que resultem em estruturas de pavimento mais rígidas, aliviando o nível de deformação nos revestimentos asfálticos.

Estruturas com camadas cimentadas tipo concreto compactado com rolo (CCR) é um caminho a ser pesquisado por proporcionar baixo custo de execução e maior durabilidade à estrutura do pavimento. Por outro lado, o desenvolvimento de pesquisas que envolvam o uso de materiais alternativos e o emprego de resíduos é de grande importância para o país.

Dentre os materiais alternativos produzidos pela indústria brasileira, em particular a cinza pesada, o desenvolvimento de pesquisas com este resíduo é de grande interesse, pois atualmente a produção de cinza de carvão mineral no Brasil está ao redor de  $4 \times 10^6$  toneladas/ano (FUGARO, 2004 e SANTOS, 2005). A maior parte deste carvão é consumida pelas termelétricas existentes nos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Em particular, o Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo, no Estado de Santa Catarina, é responsável pela produção de 818 mil toneladas de cinzas por ano, sendo produzidas de 70% a 85% de cinzas leves e 15% a 30% de cinzas pesadas (ROCHA et al, 1999 apud SANTOS et al, 2004). Destaca-se que a cinza leve ou volante, é toda consumida pelas indústrias de cimento enquanto que a cinza pesada é depositada em bacias de sedimentação localizadas nos arredores da termelétrica.

Por outro lado, é importante que se busquem no País novos materiais e concepções de estruturas de pavimentos para fazer frente ao pesado tráfego que atualmente, está atuando nos principais troncos rodoviários brasileiros.

Neste sentido, esta pesquisa vai enfocar a potencialidade do emprego da cinza pesada produzida no complexo Termelétrico Jorge Lacerda na produção do CCR que

será destinado a execução de camadas de base de pavimentos híbridos ou compostos, procurando associar o desenvolvimento de uma política de melhor reaproveitamento deste resíduo com a prospecção de estruturas de pavimentos de maior capacidade estrutural e menor deformabilidade.

É interessante salientar que o uso da cinza pesada na dosagem do CCR é de grande importância para a região de Tubarão – SC, pois quanto à disponibilidade e obtenção de matéria-prima, como os agregados naturais, além de muitas vezes precisar ser transportado de locais distantes, sua exploração é controlada e fiscalizada de forma rigorosa pelos órgãos ambientais.

Portanto, este projeto de pesquisa procurará contribuir para a incorporação da cinza pesada em substituição parcial e/ou total do agregado miúdo (areia natural) na dosagem do CCR podendo, com os resultados encontrados, disseminar o uso desta tecnologia em projetos de construção rodoviária nas regiões onde este tipo de resíduo é produzido, pois além de possibilitar uma possível diminuição no custo de implantação dos pavimentos, também propicia uma alternativa de emprego de grandes quantidades deste subproduto, colaborando para a gestão ambiental deste resíduo.

### **1.3.1 - Apresentação do Trabalho**

Para atingir os objetivos propostos, o trabalho está dividido nos seguintes capítulos:

**Capítulo 1** – Contextualiza a pesquisa dando uma ênfase a atual situação das rodovias no país, apresenta os principais objetivos e posteriormente procura justificar da necessidade e relevância do tema estudado;

**Capítulo 2** – Apresenta uma revisão bibliográfica sobre o concreto compactado com rolo (CCR) e a cinza pesada. Conceitua as principais propriedades e ensaios especificados para os materiais que compõem este concreto. Define o que é a cinza pesada, e, suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas. Apresenta a metodologia de dosagem, e procura dar ênfase os ensaios tecnológicos do controle de qualidade;

**Capítulo 3** – Descreve o programa experimental realizado quanto à caracterização dos materiais, os procedimentos para a determinação da curva de compactação das mistura sem e com cinza pesada, a determinação das propriedades mecânicas, o desenvolvimento de análise e seleção dos melhores resultados;

**Capítulo 4** – Apresenta os resultados obtidos, conforme metodologia descrita no capítulo 3 acompanhados de suas respectivas análises;

**Capítulo 5** – Expõe os critérios adotados para o desenvolvimento do dimensionamento do pavimento; e,

**Capítulo 6** – Contém as conclusões e as recomendações para futuros trabalhos pertinentes a este tema.

No final constam as referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento do trabalho.

## **CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 – CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR)**

#### ***2.1.1 – Definição***

Segundo ANDRADE (1997), o Concreto Compactado com Rolo (CCR) é um concreto de consistência seca, não mensurável pelo ensaio de abatimento do troco de cone, e se diferencia do concreto convencional principalmente no que diz respeito à trabalhabilidade e consistência.

O CCR é uma mistura seca composta por agregados, água e materiais cimentícios compactada por rolos vibratórios ou por outro equipamento tipo placas vibratórias (ACI Committee 325, 1995).

Para sua consolidação efetiva, o CCR deve ser suficientemente “seco” para suportar o peso do equipamento de adensamento (rolo liso vibratório) e, convenientemente úmido para permitir a adequada distribuição da pasta ligante na massa de concreto durante as operações de mistura, espalhamento e compactação, apresentando no final, depois de endurecido, as características comumente obtidas no concreto convencional.

GALLO e PADILHA (1991) destacam que o desenvolvimento tecnológico do CCR está calçado, em diferentes países, nas experiências com solo-cimento e brita graduada tratada com cimento (BGTC).

De acordo com ANDRIOLO (1989), o CCR adequado para compactação com rolos vibratórios também difere significativamente no aspecto, em seu estado ainda não adensado, em relação ao concreto convencional que possui um valor mensurável de trabalhabilidade, pois a evidência da pasta na mistura do CCR não adensado é pequena, sendo que o teor de pasta só é notado na mistura compactada.

GAGNÉ (1999) comenta que os métodos de proporcionamento do CCR podem ser baseados em testes de consistência de concretos, em testes de compactação de solos, ou em algum modelo teórico contínuo de suspensão de sólidos diferente dos métodos de proporcionamento usualmente adotados para o concreto convencional, sendo este modelo chamado de *solid suspensium model*. O método apresentado pelo autor relata uma metodologia de proporcionamento diferente dos tradicionais no que diz respeito a: i) testes de consistência para selecionar o proporcionamento para uma trabalhabilidade desejada a um nível de resistência; e, ii) testes de compactação de CP's para selecionar a mistura para uma máxima massa específica.

Portanto, qualquer mistura granular desse tipo, pode ser compactada até a máxima massa específica aparente seca ( $MEAS_{máx.}$ ) sob determinada vibração, onde a  $MEAS_{máx.}$  da mistura irá depender do teor de vazios e do teor de argamassa usado.

### **2.1.2. – Emprego do CCR no Mundo**

A idéia de se empregar o CCR na construção de pavimentos não é recente. A primeira aplicação de CCR que se tem notícia foi realizada na Escócia em 1865. Entretanto, segundo PASKO (1998), por iniciativa de George Bartholomew, em 1893 em Bellefontaine, o Estado de Ohio nos Estados Unidos da América (EUA) construiu o que se pode definir como o primeiro pavimento de CCR, por apresentar consistência seca e ter sido aplicado pelo processo de compactação.

Posteriormente, por volta de 1910, em Grand Forks, Dakota do Norte (EUA), empregou-se o CCR também em pavimento urbano e em 1935 em estradas rurais na Bélgica (PITTA & HURTADO DIAZ, 1991).

Porém, conforme o ACI Committee 325 (1995), a primeira aplicação do CCR na pavimentação se deu em 1930 na Suécia, onde ele teve uma aplicação muito bem sucedida em portos, áreas de estacionamento, ruas municipais e interseções viárias.

Entretanto, FUJIMURA et al (1995) explicam que o CCR em obras de pavimentação teve aplicação sistemática e fundamentada em dados experimentais a

partir de 1944 na Inglaterra, sendo dignos de notas as rodovias Crawley, com 70 km, e a de Londres – Birmingham, com 100 km.

PITTA & HURTADO DIAZ (1991) ainda comentam sobre o uso do CCR em um trecho experimental da rodovia 441 nos EUA em 1950 e, entre 1950 e 1960 a execução de várias rodovias de vários estados norte-americanos onde se destacam os Estado do Texas e Carolina do sul.

Conforme PITTMAN (1985 e 1989), GOMEZ (1987) e JOFRÉ (1991), embora a origem do CCR seja anterior a 1970, há uma concordância quase que unânime entre os pesquisadores, que uma nova era para o CCR começa a partir da década de 70 do século passado, impulsionado, principalmente, pela crise do petróleo, que encareceu o custo da construção rodoviária com concreto asfáltico.

De acordo com PITTMAN (1985), naquela época países como EUA, Espanha, Inglaterra e Canadá, já possuíam uma grande quantidade de obras de pavimentação realizadas com esta nova tecnologia. Nestes países, a economia alcançada variava de 15 a 30%, dependendo do tipo de obra.

SANCHES et al (2001) comenta que a aplicação do CCR tem sido muito difundida no uso de pavimentos de áreas para uso de terminais intermodais de carga, pátio de estocagem de contêineres, pátio de estacionamento de veículos e veículos especiais e pátio de estacionamento de veículos militares. Todos estes empregos possuem como características a baixa velocidade de trafego. Estudos foram realizados para o emprego deste material em rodovias expressas, onde a exigência de pequenas deformações superficiais deve ser garantida, obtendo-se resultados compatíveis para este tipo de uso.

A partir da metade da década de 1980, outros países começaram a fazer experiências com o CCR, procurando adaptar essa tecnologia às suas condições regionais. Dentre eles citam-se o Japão, a Austrália, a África do Sul, a Noruega, a Suécia, o Chile e a Argentina.

### 2.1.3 – Emprego do CCR no Brasil

Segundo ANDRIOLO (1998), existem alguns registros históricos da utilização do CCR no Brasil, como a pavimentação do Vale do Anhangabaú (SP) em 1946. Em 1950 houve a pavimentação do aeroporto de Congonhas, também chamado de São Paulo, e alguns pavimentos no Rio de Janeiro no ano de 1954. Ocorreram também obras executadas pela Prefeitura Municipal de Porto Alegre, em 1972, aplicando o CCR como base de pavimento asfáltico em vias urbanas (CARVALHO – 1995).

Conforme FUJIMURA et al (1995), no Brasil a utilização do CCR empregado em pavimentos de áreas urbanas em várias cidades, em rodovias, e ainda em sistemas viários de pátios industriais, data do início da década de 70. Infelizmente a sua pequena utilização na execução de camadas de pavimentos se devia principalmente por ele ser empregado em grande escala na construção de barragens.

De acordo com a ABCP (1990), no Brasil, até por volta de 1986, o CCR foi empregado em um número reduzido de obras de pavimentação, embora elas fossem importantes, como por exemplo, na Serra do Rio do Rastro, em Santa Catarina: SC – 438 (1984), e postos de pesagem do DNER em Minas Gerais, São Paulo, Santa Catarina, entre outros (1984). Nestas obras, o CCR foi empregado como camada inferior do pavimento (base e sub-base).

A partir de 1986, o CCR começou a ser empregado também como camada de desgaste em pátios e pisos industriais e em vias urbanas da Grande São Paulo. Nestas últimas, segundo dados da prefeitura de São Paulo, a economia chegou a 40%, quando comparado com soluções tradicionais de pavimentação.

A partir de 1988, a ABCP começou a divulgar em Prefeituras de várias regiões do País as qualidades do CCR, apresentando-o como uma alternativa economicamente viável para a pavimentação de ruas urbanas e municipais.

Em 1989, iniciou-se na ABCP, uma grande pesquisa com o CCR, tendo como um dos principais objetivos o desenvolvimento de uma tecnologia para o uso deste



material como camada de desgaste, ou seja, funcionando como camada de base e revestimento, adaptada para as condições brasileiras.

Frente aos inúmeros problemas ocorridos nas experiências realizadas nas cidades Criciúma e Itajaí, no Estado de Santa Catarina, o desenvolvimento desta tecnologia não avançou muito em que pese certo sucesso obtido em um experimento realizado em Recife, no Estado de Pernambuco.

Através de uma parceria entre a prefeitura de Votorantin, o grupo Votorantin e o Departamento Estadual de Estradas de Rodagem – DER/SP foi possível, no final do ano de 2001 concluir a recuperação de um trecho de 4,5 km na rodovia SP – 79, onde foi utilizado na sub-base um total de 43 mil metros cúbicos de concreto compactado com rolo.

Segundo a Master Builders Technologies – MTB, no ano de 2002 foi iniciado na rodovia BR 232, trecho Recife – Caruaru, a mais extensa obra de pavimentação em concreto do país sendo que o CCR está sendo utilizado na camada de sub-base com uma espessura de 10 cm e até a completa finalização da obra será consumido um total de 106.700 m<sup>3</sup> de CCR.

Em junho de 2005, foi concluída a recuperação de um total 15 km de ruas de acesso ao Porto de Paranaguá em pavimento rígido e com a sub-base sendo executada em CCR, com uma espessura de 10 cm e resistência à tração de 1,50 MPa.

Segundo a ABCP (2004), outra importante obra que está sendo executada no Brasil é o Rodo anel em São Paulo, o qual tem previsão de conclusão para dezembro de 2008. Nesta obra será utilizado 125.000 m<sup>3</sup> de CCR na execução da camada de sub-base a qual terá uma espessura de 10 cm para um trecho de 31,66 Km.

Quanto às propriedades do CCR destinado à pavimentação, PITTA & HURTADO DIAZ (1991) comentam que elas variam fundamentalmente de acordo com o consumo de cimento, quantidade de água utilizada, características dos materiais, métodos e energia de compactação adotada, uso de aditivos, idade de cura, etc. Na Tabela 2.1 são apresentados os principais fatores que afetam as propriedades do CCR.

**Tabela 2.1** – Fatores que afetam as propriedades do CCR

PROPRIEDADES	FATORES QUE AFETAM AS PROPRIEDADES DO CCR									
	C	TC	U	E	G	TA	A	Cur	Id	TS
Resistência à compressão	•	•	•	•	•		•	•	•	
Resistência à tração na flexão	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
Módulo de elasticidade	•	•	•	•		•			•	
Retração por Secagem	•	•	•	•		•	•		•	
Durabilidade	•	•	•	•			•	•		•
Permeabilidade	•		•				•	•	•	•

FONTE: PITTA & HURTADO DIAZ (1991)

**C** = Consumo de cimento

**TC** = Tipo de cimento

**U** = Umidade

**E** = Energia de compactação

**G** = Granulometria

**TA** = Tipo de agregado

**A** = Aditivo

**Cur** = Cura

**Id** = Idade

**TS** = Textura superficial.

Porém, em relação aos dados apresentados na Tabela 2.1 há de se discordar dos autores, pois fatores como o tipo de agregado influencia diretamente na resistência à compressão devido a condições geológicas de cada agregado que poder ser usado no CCR ser diferente uma da outra. A granulometria também é outro fator que afeta diretamente propriedade tais como módulo de elasticidade, retração por secagem e permeabilidade devido influenciar diretamente nos espaços vazios contidos na mistura.

A retração por secagem ainda pode ser afetada pelo método de cura adotado, principalmente, nas idades iniciais, onde ocorre uma perda de umidade muito considerável devido aos fatores externos que agem sobre a peça de CCR.

A permeabilidade, também, ainda é afetada pelo tipo de cimento utilizado, pois a finura resulta um início de pega mais rápido, influencia sobre a velocidade de hidratação e conseqüentemente sobre o desenvolvimento do calor de hidratação, retração e resistência. A energia de compactação também afeta a permeabilidade, pois uma mistura mal compactada resulta em espaços vazios facilitam o caminho de percolação da água a qual acaba carreando materiais contidos na mistura diminuindo a resistência e durabilidade da mistura.

FUJIMURA et al (1995) apresentam na Tabela 2.2 as espessuras recomendadas de base de pavimentos construídos com esta tecnologia.

**Tabela 2.2** – Recomendações de espessura de base de concreto rolado em função da intensidade de tráfego

<b>Intensidade de Tráfego Comercial (Veículos/dia)</b>	<b>Espessura da Base de CCR (cm)</b>
4500 ou mais	20
1500 até 4500	18 a 20
450 até 1500	15 a 18

Fonte: FUJIMURA et al (1995)

ANDRIOLO (1989), OLIVEIRA et al (1995) e RIBEIRO & ALMEIDA (1997) explicam que, desde que se proceda a uma dosagem criteriosa e utilize materiais de boa qualidade, o CCR pode apresentar características semelhantes e em muitos casos até superiores aos concretos convencionais devido à elevada energia de compactação utilizada na sua execução.

No caso do uso de materiais alternativos com função pozolânica, ANDRIOLO & SGARBOZA (1993), destacam que o uso desses materiais em concretos “pobres” como o CCR, a resistência muitas vezes aumenta, enquanto em concretos ricos geralmente diminui.

## 2.2 – VANTAGENS E BENEFÍCIOS DO USO DO CCR COMO CAMADA DE PAVIMENTO RODOVIÁRIO

Para ANDRIOLO (1989), ANDRADE (1997), PITTA (2002) e CARVALHO (2002), o uso de CCR em camadas como base e sub-base de pavimentos apresentam algumas vantagens, a nível global, tais como:

- Custo inicial mais baixo que a alternativa em flexível;
- Vida útil de mais de 20 anos, com pequena manutenção;
- Construção com equipamento comum e mão-de-obra já disponível nas construtoras;
- O emprego desta tecnologia pode propiciar uma economia de 15% a 30%, se comparado com estruturas convencionais equivalentes (PITTMAN – 1986 e WHITE – 1989).

A ASSOCIAÇÃO DE CIMENTO DO CANADÁ (2004) relata que o CCR quando usado na pavimentação pode apresentar benefícios tais como:

- i) Alta resistência à tração na flexão quando solicitado por carregamentos pesados e repetitivos reduzindo a manutenção;
- ii) Alta resistência à compressão, resistindo a altas cargas concentradas e impactos de equipamentos industriais pesados, equipamentos militares, etc.
- iii) Possui alta resistência ao cisalhamento, reduzindo a ocorrência de fissuras e manutenção precoce;
- iv) Possui alta densidade e baixa absorção, ocasionando maior durabilidade, melhor suporte quanto às condições adversas das intempéries e não permite a passagem de umidade para as camadas subseqüentes do pavimento;
- v) Quanto ao agregado usado, desenvolve alta resistência ao cisalhamento devido ao aparecimento de juntas e fissuras não controladas, prevenindo o deslocamento vertical e horizontal do pavimento;
- vi) Disponibiliza altas velocidades de execução sem necessitar equipamentos especializados ou de alta tecnologia, reduzindo custo; e,
- vii) Ocasiona uma superfície mais durável por resistir à abrasão.

### **2.3 – LIMITAÇÕES DO CCR**

Segundo PIGGOTT (1986) PITTMAN (1985) & JOSA et al. (1990) como limitação principal, o CCR tem contra si as irregularidades superficiais formadas durante o processo de compactação, notadamente nas juntas de final de dia.

A ASSOCIAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DE CONCRETO DO MISSISSIPI (2003) destaca que, embora a forma deste concreto não preveja todas as características e benefícios de um concreto convencional, as suas limitações se referem quanto aos locais de aplicação. Possui limitação estética, pois a textura da superfície é mais áspera e é limitado o seu uso para pavimentos de baixo tráfego, devido este concreto ser requerido em função da resistência e durabilidade em vez de velocidade.

Porém, para rodovias de alto volume de tráfego o CCR pode ser usado perfeitamente como camada de base e/ou mistura de sub-base para uma superfície mais uniforme.

### **2.4 – MATERIAIS**

Quanto à produção do CCR, os principais materiais utilizados são os mesmos empregados no concreto convencional, ou seja, agregados graúdos, agregados miúdos, cimento Portland, água e aditivos, quando houver necessidade de seu emprego.

#### ***2.4.1 – Agregados***

De acordo com PETRUCCI (1981) entende-se como agregado o material granular, sem forma e volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia.

ABREU (2002) ressalta que, em princípio, não há restrições quanto ao uso deste material na produção do CCR, desde que atendam as condições especificadas por norma como, por exemplo, a granulometria, ausência de matéria orgânica e contaminação de torrões de argila nos agregados miúdos.

Para a AMERICAN ROAD & TRANSPORTATION BUILDERS ASSOCIATION – ARTBA (2003), os agregados podem ser convencionais, como pedra britada ou areia, e ainda outros materiais não convencionais como escória de alto forno, materiais reciclados de pavimentos e cinza pesada.

ANDRIOLO & SGARBOZA (1993) comentam que os agregados utilizados no concreto devem possuir três funções principais:

- i) Servir como um enchimento relativamente barato para o material aglomerante;
- ii) Formar uma estrutura de partículas que seja adequada para resistir a ação das cargas aplicadas, à abrasão, à percolação da água e a ação do tempo; e,
- iii) Reduzir as variações de volume resultantes do processo de pega e endurecimento e da variação de umidade na pasta de água e cimento.

No que concerne sobre as propriedades dos agregados para o concreto, as mesmas são influenciadas pelo tipo particular de agregado usado, garantindo assim a resistência, elasticidade, durabilidade e fazendo com que as características térmicas dependam das características minerais das partículas de agregado.

A norma NBR 9935, que define os termos relativos a agregados em concreto de cimento Portland, adota como agregado graúdo todo material granular com pelo menos 95% em massa, dos grãos retido na peneira de # 4,8 mm (nº. 4) e agregado miúdo aquele com pelo menos 95 % em massa que passa pela peneira de # 4,8 mm (nº. 4).

#### ***2.4.1.1 – Agregado Miúdo: Propriedades***

Segundo a norma DNER – EM 038/1997 são considerados agregados miúdos aqueles cujas partículas ficam retidos entre as peneiras # 2,0mm (nº. 10) e # 0,075mm (nº. 200). As principais propriedades dos agregados miúdos são:

**a) Inchamento**

Segundo a norma NBR 6467, o inchamento do agregado miúdo é o fenômeno do aumento do volume aparente, provocado pela absorção de água livre pelos grãos e que incide sobre a sua massa unitária, sendo muito usado durante os procedimentos de dosagem de concreto de cimento Portland, onde a sua determinação para o agregado miúdo é de extrema importância devido fornecer uma precisa quantificação volumétrica do traço.

PETRUCCI (1981) relata que o conhecimento do teor de umidade é de extraordinária importância no estudo dos agregados miúdos sendo necessária a determinação periódica de seu teor de umidade, para corrigir a quantidade de água a ser adicionada à mistura.

**b) Massa Específica**

Como o agregado geralmente contém poros, tanto permeáveis como impermeáveis, o sentido do termo massa específica deve ser cuidadosamente definido. A massa específica é a massa de uma unidade de volume do agregado seco, excluindo deste os poros permeáveis, sendo uma propriedade muito utilizada nos cálculos de dosagem (FURNAS, 2002; NEVILLE, 1997).

Geralmente os métodos utilizados para a determinação da massa específica do agregado miúdo são as seguintes:

- Processo do frasco graduado, sendo usado preferencialmente o frasco de Chapman conforme a NBR 9775 (1987);
- Processo do picnômetro, medido através da NBR 9776 (1987); e,
- Processo da balança hidrostática, conforme a NBR 9937 (1987).

Entre os três processos o mais recomendado é o processo do picnômetro por apresentar resultados com grande precisão e, portanto, ser o mais indicado para ensaios em laboratório.

### c) Massa Unitária

Como a massa específica se refere ao volume de cada partícula e não é possível arrumá-las de tal forma que não existam vazios entre elas, METHA & MONTEIRO (1994) comentam que a massa unitária é conhecida quando o agregado deve ser quantificado de tal forma que os vazios existentes entre os grãos também são considerado. O ensaio é executado com o preenchimento de um recipiente metálico com dimensões padronizadas e com capacidade igual à unidade de volume adotada para transformar quantidades de materiais medidos em massa para quantidades em volume e vice-versa.

Evidentemente, a massa unitária depende de como o agregado tenha sido adensado e segue-se que, para um material como uma dada massa específica, a massa unitária depende da granulometria e da forma das partículas, ou seja, partículas de um tamanho único podem ser adensadas até certo limite, porém podem ser adicionadas partículas menores nos vazios entre as maiores, aumentando assim o valor da massa unitária do material adensado.

#### **2.4.1.2 – Agregado Graúdo: propriedades**

A ASTM C 294 define agregado graúdo como as partículas retidas na peneira nº 4 (4,8mm) e para a norma DNER – EM 037/1997 é considerado agregado graúdo aquele cujas partículas ficam retidas na peneira de 2,0mm (nº. 10). As principais propriedades de interesse são as seguintes:

#### **a) Massa Unitária e Massa Específica**

PETRUCCI (1981) comenta que a importância da massa unitária decorre da necessidade, na dosagem de concretos, de transformação de traços em peso para volume e vice versa, bem como para cálculos de consumo de materiais empregados por m<sup>3</sup> de concreto.

A massa unitária dos agregados graúdos não é sensivelmente afetada por seu grau de umidade e depende muito menos do adensamento que o dos agregados miúdos.



PRUDÊNCIO JR (1999) comenta que os agregados, quanto ao peso específico, podem ser assim classificados:

- **Leves:** aqueles que possuem a massa específica aparente menor que  $2,0 \text{ kg/m}^3$ ;
- **Normais:** aqueles cuja massa específica está na faixa de  $2,0$  a  $3,0 \text{ Kg/m}^3$ ; e,
- **Pesados:** aqueles com massa específica acima de  $3,0 \text{ Kg/m}^3$ .

A determinação da massa específica dos agregados graúdos, normalmente, é realizada através do seguinte processo da balança hidrostática, conforme a NBR 9937 (1987). Em paralelo, a massa unitária deste agregado é determinada no estado solto segundo os procedimentos descritos na norma NBR 7251 (1982).

#### **b) Desgaste por Abrasão**

Segundo a ARTBA (2003), a resistência à abrasão de partículas de agregados para uso em base ou mistura de sub-base de pavimentos têm que possuir resistência o suficiente para resistir à degradação durante a construção e ao carregamento do tráfego repetido.

Conforme as especificações da norma DNER – ME 035/98, o desgaste por abrasão Los Angeles é uma medida preliminar da resistência do agregado graúdo à degradação por abrasão e impacto, referindo-se ao uso de agregados na execução de camadas de base e revestimento e, normalmente, indicam limitações para o valor da Abrasão Los Angeles contido entre 40% e 55%.

#### **2.4.1.3 – Composição Granulométrica**

PETRUCCI (1981) relata que, geralmente, se denomina composição granulométrica de um agregado a proporção relativa expressa em % dos diferentes tamanhos de grãos que se encontra constituindo o todo e pode ser expressa pelo material que passa ou pelo material retido, por peneira ou acumulado.

GENTILE (1964) e FORBES (1988) recomendam que a granulometria normalmente adotada para o CCR, obedeça uma curva do tipo:

$$P = 100\% * (d/\varnothing)^{1/3} \pm 5\% \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde:

**P** = Porcentagem de material passante;

**d** = tamanho da abertura da peneira (mm); e,

**∅** = tamanho máximo do agregado (mm).

Para ANDRIOLO (1989), a escolha e controle granulométrico dos agregados são fatores importantes que influenciam na qualidade e nas propriedades do CCR. Portanto, quanto à distribuição granulométrica para o CCR, três pontos merecem atenção: a escolha do diâmetro máximo, o teor aceitável de material pulverulento no agregado e a adição de finos.

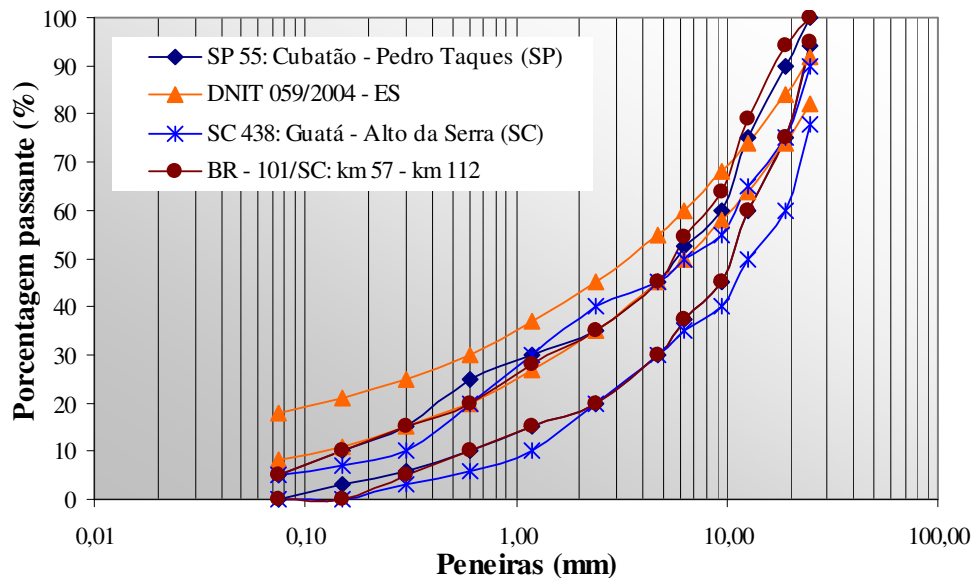
Quanto a Dimensão máxima característica do agregado (D<sub>máx.</sub>), JOFRE et al (1989) comentam que na Espanha é recomendada a utilização de agregados com D<sub>máx.</sub> de 19 mm e na França, é preconizado D<sub>máx.</sub> de 14 mm ou 16 mm, conforme o tipo de rodovia, sendo que lá este parâmetro é estabelecido para diminuir a probabilidade de segregação do CCR e permitir um bom acabamento superficial (HURTADO DIAZ, 1993).

Para NANNI et al (1996), o D<sub>máx.</sub> deve ser igual ou inferior a 22 mm, sendo que geralmente o valor mais utilizado é 19 mm. Os autores recomendam que a porcentagem de agregados passando pela peneira de malha 0,075 mm (#200), deve estar compreendido entre 10% e 14%, acrescentando que a granulometria do CCR deve ser mais fina do que a do concreto simples para pavimentação.

ANDRADE (1997) comenta que no caso do uso de agregados originados de materiais pulverizados é permitido para o CCR teores de finos entre 17% a 20% de material passando na peneira de malha n°. 100 sendo que destes, aproximadamente 10% de material fino deverá passar na peneira de malha n°. 200.

MARQUES (2001) comenta que a graduação é, talvez, a propriedade mais importante de um agregado. Ela afeta quase todas as propriedades importantes de uma mistura incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência por atrito e resistência à fadiga e resistência ao dano por umidade. Nas Figuras 2.1 e 2.2 são apresentadas, respectivamente, algumas composições granulométricas usualmente empregadas no mundo e no Brasil.

**Figura 2.1** – Composições granulométricas do CCR empregadas em alguns países



**Figura 2.2** – Composições granulométricas do CCR empregadas no Brasil

#### 2.4.1.4 – Umidade dos Agregados

A umidade e absorção dos agregados são definidas como a relação entre a massa de água necessária para preencher os poros permeáveis do agregado e a massa seca do material, sendo utilizada como parâmetro para o controle de água do concreto. O procedimento de ensaio é realizado conforme a NBR 9777/87 e o resultado é normalmente expresso em porcentagem (FURNAS, 2002).

NEVILLE (1997) comenta que como absorção representa a água contida no agregado na condição SSS (saturado superfície seca), e o teor de umidade é a água que excede essa condição, o teor total de água de um agregado úmido é igual à soma da umidade e da absorção.

De acordo com o teor de umidade, PRUDÊNCIO JR (1999) relata que se pode considerar o agregado nas seguintes condições:

- **Seco em estufa:** toda a umidade, externa ou interna, foi eliminada por um aquecimento a 100 °C;
- **Seco ao ar:** quando não apresenta umidade superficial tendo, porém, umidade interna sem, todavia, estar saturado;
- **Saturado superfície seca (SSS):** quando a superfície não apresenta água livre estando, porém, preenchidos de água os vazios permeáveis dos agregados; e,
- **Saturado:** quando apresenta água livre na superfície.

NEVILLE (1997) comenta que devido o teor de umidade do agregado variar com o clima e também de uma parte para outra do monte, o valor do teor de umidade deve ser determinado freqüentemente. Entre os métodos utilizados, podem-se citar os seguintes:

- Secagem em estufa;
- Secagem por aquecimento ao fogo (método da frigideira);
- Frasco de Chapman;
- Picnômetros; e,
- Aparelhos especiais (Ex: speedy moisture tester, mais indicado para agregados miúdos).

#### **2.4.2 – Materiais Cimentícios**

Segundo PITTA (2002) o CCR pode ser dosado com qualquer tipo de cimento, sendo que o seu consumo, no caso de uso em camada base ou sub-base de pavimentos, varia entre 80 kg/m<sup>3</sup> e 200 kg/m<sup>3</sup>, valores estes associados principalmente às propriedades mecânicas requeridas, sendo que o cimento adotado deve atender os requisitos para uso no concreto convencional.

Conforme ANDRIOLO (1989), a principal diferença na escolha e proporcionamento de cimento e material pozolânico usado no CCR, em comparação com os concretos convencionais, é referente à possibilidade de usar altos teores de

material pozolânico e a reduzida ênfase sobre o efeito desse material na trabalhabilidade.

Conforme o ARTBA (2003), os materiais cimentícios usados em bases de CCR devem ser capazes de reagir para aglutinar as partículas de agregado junto em uma massa estável que pode apoiar carregamentos impostos pelo tráfego e resistir aos efeitos causados pelo clima e pela água.

### **2.4.3 – Água**

NANNI et al (1996), comentam que o teor de água no CCR é muito baixo se comparado com os concretos normais, pois através de técnicas comuns de compactação dada pelo uso de rolos vibratórios pode-se chegar à máxima consolidação do CCR.

A porcentagem ótima de água no CCR varia de 4% a 7% da massa dos materiais secos, sendo necessária, na maioria dos casos, quantidades de água variando entre 110 litros e 130 litros por m<sup>3</sup> de concreto (DNER – 1992; KOKUBO et al – 1996 e PITTA & HURTADO DIAZ – 1991), o que corresponde aproximadamente a 70% do volume de água necessário à produção de um concreto plástico tradicional (190 l/m<sup>3</sup>).

PITTA & HURTADO DIAZ (1991) ressaltam que o CCR é muito mais sensível às variações do conteúdo de água do que outros concretos de cimento Portland. A falta de água aumenta a probabilidade de segregação, dificultando a compactação e o acabamento superficial, enquanto que o excesso de água provoca a exsudação da mistura durante a compactação. Tanto a falta como os excessos de água, com relação à quantidade ótima, produzem a diminuição da resistência mecânica do material.

Devem-se ressaltar aqui os pontos mais comuns dos procedimentos de dosagem do CCR:

- A Lei de Abrams não é aplicável;
- A resistência está sempre associada à compactação do material;
- O proporcionamento dos agregados é feito procurando-se o proporcionamento que confira o menor consumo de cimento;

- A compactação é sempre facilitada com o aumento da umidade até certo ponto onde a água em excesso produz um aumento na porosidade como no caso dos concretos plásticos;
- A pasta deve preencher o volume de vazios dos agregados totais; e,
- O equipamento é parte fundamental na dosagem, pois vai conferir a energia de compactação.

## 2.5 – METODOLOGIA DE DOSAGEM DO CCR

Uma metodologia de dosagem do concreto, independente se ele for seco, plástico ou auto adensável, visa obter a composição mais econômica que compatibilize os materiais constituintes deste concreto com os equipamentos destinados a sua produção e compactação ou adensamento e a resistência requerida.

ABREU (2002) comenta que tanto nos concretos secos como nos concretos plásticos, a dosagem nada mais é do que a busca da melhor composição dos materiais constituintes, de forma que, no estado fresco, o concreto seja trabalhável, permitindo adequada moldagem das peças e, que após o endurecimento, elas tenham qualidade e resistência asseguradas.

Nos concretos plásticos, praticamente a pasta (cimento mais água) ocupa todos os espaços vazios existentes entre os agregados, tornando o volume de ar muito pequeno; por outro lado nos concretos secos, existe a presença de ar em volume significativo na mistura. Deste modo, o concreto seco não segue o princípio consagrado para concretos plásticos que é a necessidade de uma menor quantidade de água para elevação da resistência mecânica (TANGO – 1994).

Conseqüentemente, a dosagem do CCR é geralmente executada pelo método do menor volume de vazios, ou seja, consiste em encontrar a melhor proporção entre os agregados de maneira a propiciar o menor volume de vazios possíveis entre os agregados componentes do concreto.

BUCHER (1985) explica que dificilmente uma metodologia de dosagem atingirá um refinamento tamanho que permita desenvolver um traço de concreto sem um

eventual ajuste experimental deste traço, de maneira que até 1985 não existiam procedimentos que permitiam fixar a composição do CCR para pavimentação baseando-se apenas nas características físicas, mecânicas e geométricas obtidas experimentalmente em laboratório.

Conforme TRICHÊS (1993), a água contida no CCR é geralmente estabelecida com base na relação umidade/massa específica aparente seca máxima. Desta forma, praticamente não há água livre na mistura.

COUTINHO (1997) sugere a adoção da curva granulométrica teórica de Faury de maneira a atender este parâmetro. As composições granulométricas dos agregados, consumos de cimento e processos construtivos têm caracterizado as misturas e diferenciado às diversas aplicações dos concretos secos (OLIVEIRA *et. al.*,1995).

Para TRICHÊS (1993), a dosagem do CCR pode ser elaborada com o seguinte procedimento:

- a) Definição da composição granulométrica dos agregados para que a mistura se enquadre na curva escolhida;
- b) Fixa-se o consumo de cimento –  $C_c$ , e calcula-se, para diferentes umidades, a proporção  $C_c$ : m, através da seguinte expressão:

$$C_c = \frac{1000 - V}{\frac{1}{ME_c} + \frac{1}{ME_{ag}} + \frac{h(1 + m)}{100}}$$

Onde:

$C_c$  – Consumo de cimento da mistura em kg/m<sup>3</sup>;

$V$  – Volume de vazios na mistura, em litros;

$m$  – Quantidade de agregado total por quantidade de cimento, em um metro cúbico de CCR;

$h$  – Teor de umidade da mistura em %;

$Me_{cimento}$  – Massa específica do cimento, em kg/m<sup>3</sup>; e,

$Me_{agregado}$  – Massa específica do agregado total, em kg/m<sup>3</sup>.

- c) Para um mesmo consumo de cimento, variando-se o teor de umidade, têm-se diferentes quantidades “m” de agregado total. É possível então, através de um ensaio de compactação se determinar o teor de umidade que fornece a máxima específica aparente seca da mistura –  $MEAS_{máx}$ .

Para a utilização da equação 2.2, adota-se, por tentativa, um volume de vazios  $V$ , por exemplo, igual a 5%, o que representa 50 litros em  $1m^3$  de CCR.

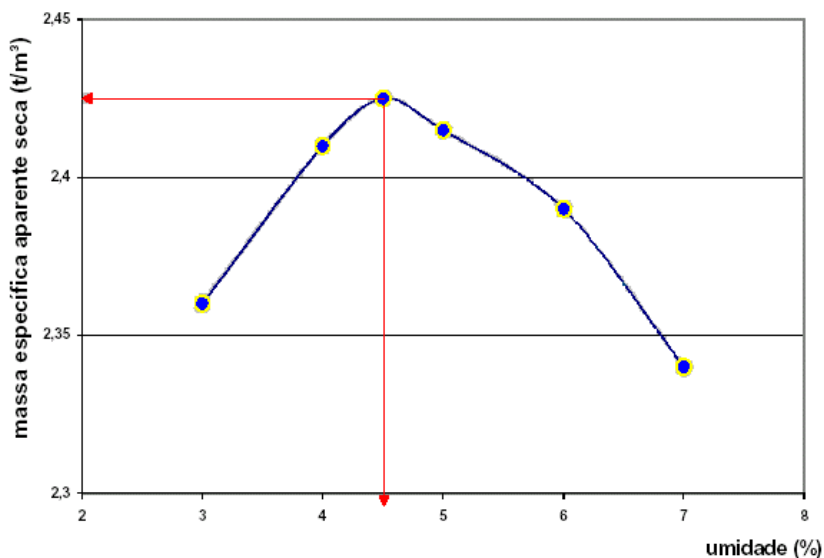
Quanto ao volume de vazios, ABREU (2002) comenta que este é um parâmetro para a avaliação da compacidade de um material, sendo muito utilizado na mecânica dos solos. Em agregados para concreto pode ajudar a definir a qualidade de uma areia principalmente no que diz respeito à sua distribuição granulométrica. Portanto, quanto menor for este índice melhor é o arranjo entre os grãos, menor será o consumo de cimento da argamassa e do concreto, resultando em adequada coesão e compacidade da mistura.

CANNON (1993), afirma que o volume de ar requerido antecipadamente para uma dosagem experimental de CCR é de 5%, posto que MARCHAND *et. al.* (1998), confirmaram que apesar de grandes variações nas compactações, todas as misturas experimentais estudadas apresentaram um volume de vazios igual a 5%, ou um pouco abaixo deste valor, acreditando que este valor deveria ser considerado convencional em uma variação entre 4% e 5%.

## 2.6 – DEFINIÇÃO DA UMIDADE ÓTIMA DE COMPACTAÇÃO

O conceito fundamental associado à dosagem do CCR é a determinação da umidade ótima da mistura. No caso do CCR, a umidade ótima é determinada no ensaio de compactação, (TRICHÊS – 1993; HURTADO DÍAZ – 1993), e corresponde a massa específica aparente seca máxima obtida através do ensaio de compactação obtido com o soquete de Proctor, de forma análoga ao processo de compactação de solos. O gráfico da Figura 2.3 ilustra o aumento significativo do valor da massa específica aparente seca do CCR em função do aumento gradual do teor de umidade, passando por um ponto de máxima densificação.





**Figura 2.3 – Curva de Compactação**

FONTE: MARCHAND et al 1998

TRICHÊS (1993) comenta que o teor ótimo de umidade no CCR está situado na faixa de 4 a 7%, dependendo das características da granulometria e agregados da mistura.

## 2.7 – OBTENÇÃO DA CURVA DE TRABALHABILIDADE

ABREU (2002) explica que se entende por trabalhabilidade do concreto seco, como “a facilidade de se produzir, transportar e aplicar o concreto com o auxílio do equipamento apropriado, com a mínima perda de homogeneidade e mantendo-se intactas as características de aspecto visual, forma e coesão do produto recém adensado, além de aceitáveis níveis de produtividade”. Vale ressaltar que esta propriedade não é facilmente parametrizada como, no concreto plástico, pela medida de consistência pelo abatimento do tronco de cone (slump test).

ANDRIOLO & SGARBOZA (1993), explicam que a trabalhabilidade do CCR, não pode ser medida através do método usual de abatimento do tronco de cone, pois o mesmo não possui trabalhabilidade, e o adensamento através de vibradores de imersão não é adequado para concreto com slump zero quanto ao controle e quanto à determinação do teor de ar incorporado.

Para determinação da consistência do CCR é utilizado o aparelho Vebe modificado com mesa vibratória, sendo o adensamento auxiliado por um contrapeso adicional colocado sobre a mistura.

Para HOLANDA et al. (1993), a curva de trabalhabilidade é de fundamental importância uma vez que correlaciona o índice de trabalhabilidade Vebe modificado ou de consistência com o teor de água da mistura (em  $\text{kg/m}^3$ ), ou de outra forma, com o teor de umidade da mistura de CCR, expressa em porcentagem.

A equipe de FURNAS (2002) explica que a determinação da consistência pelo Vebe modificado consiste em preencher com concreto fresco o recipiente cilíndrico do consistômetro Vebe, de volume igual a 9,2 litros e diâmetro de 24,2 cm, e rasá-lo sem qualquer adensamento.

Nos procedimentos ainda é explicado que se deve colocar sobre o concreto um disco metálico com massa de 23 kg, e, em seguida, acionar a mesa vibratória e assim mantê-la até que se forme uma película de argamassa na superfície, sendo o período decorrido entre o acionamento da mesa vibratória e a formação da película de argamassa definido como Grau “Vebe” ou tempo de “*Cannon Time*”.

PAULON et al (2004) comentam que o tempo de “*Cannon Time*” é diretamente influenciado pela água da mistura e pela quantidade de finos adequada ao preenchimento dos vazios. Em laboratório procura-se, para cada mistura, desenvolver uma correlação entre os resultados dos ensaios e a trabalhabilidade necessária à compactação adotada no campo. Neste caso, a trabalhabilidade é representada pela possibilidade de espalhamento e de passagem do rolo, bem como pela capacidade de se obter a compactação que minimize os vazios.

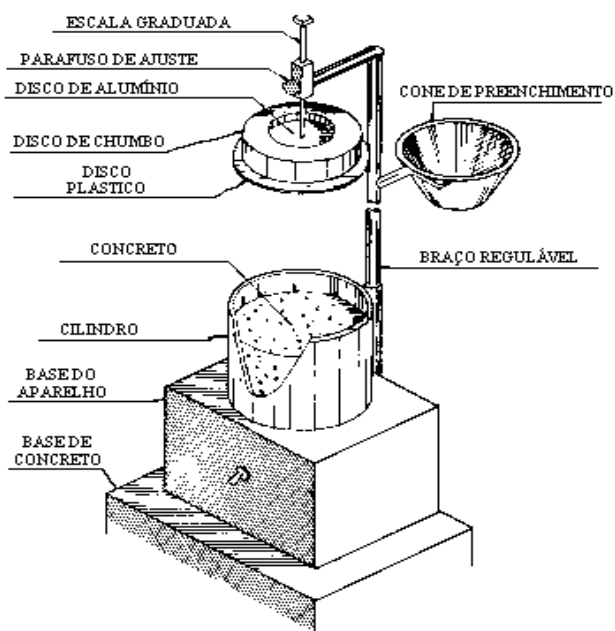
Conforme os autores, os tempos correspondentes para ensaios de consistência, adotados como referência nos estudos de dosagens de CCR para pavimentação é mostrada na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3** – Tempos correspondentes para ensaio de consistência

Ensaio	Em Laboratório	Na Obra
Tempo de vibração (seg.)	$19 \pm 2$	$16 \pm 2$

FONTE: Procedimentos de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS (2002)

Por fim, eles comentam que o tempo de vibração é reduzido em obra para aumentar a plasticidade nos períodos críticos, com a finalidade de garantir a trabalhabilidade do concreto nas operações de transporte, espalhamento e adensamento. A Figura 2.4 mostra um esquema ilustrativo do aparelho Vebe modificado.



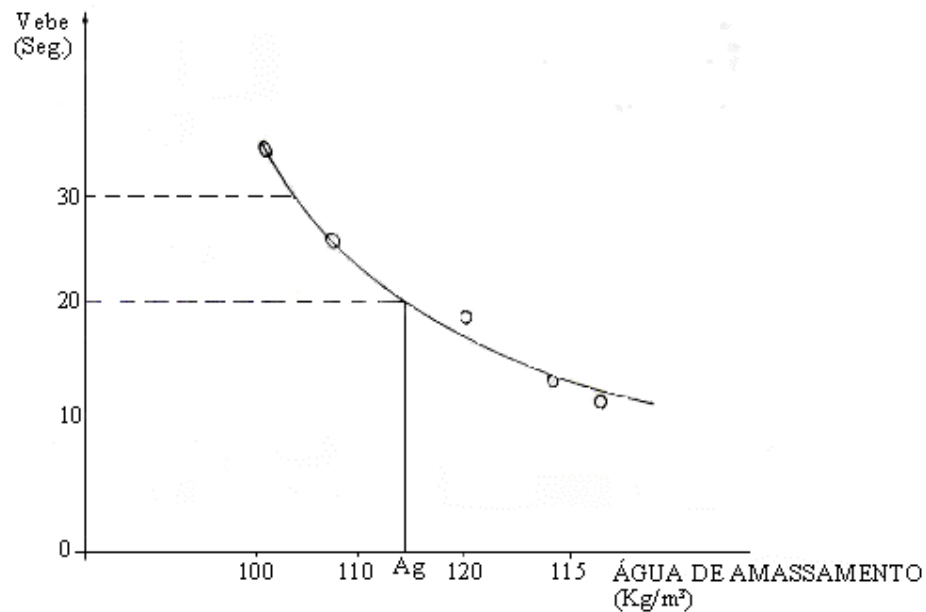
**Figura 2.4** – Aparelho Vebe modificado para ensaios de CCR

Fonte: HOLANDA et al (1993)

De acordo com NEVILLE (1997), neste ensaio o adensamento é feito numa mesa vibratória com uma massa excêntrica girando a 50 Hz e uma aceleração máxima de 3g ou 4g. O ensaio Vebe modificado tem a vantagem de que o tratamento no ensaio está muito relacionado com o método de aplicação do concreto na prática.

Para tanto, é recomendado que sejam estudados pelo menos 05 (cinco) traços de mesmo consumo de cimento e fator de argamassa, fazendo-se para cada um variar o teor de água de amassamento de modo a detectar o tempo de “*Cannon time*” compreendidos

na faixa de 25 a 35 segundos conforme a norma DNIT 064/2004 – ME. Desta forma, o gráfico da Figura 2.5 deve ser traçado.



**Figura 2.5** – Curva de trabalhabilidade

Fonte: HOLANDA et al (1993)

O tempo de “*Cannon time*” = 20 segundos, corresponde no gráfico à água de amassamento (Ag) em kg/m³, que deve ser usada em todas as mesclas para definição do traço de CCR, que na prática é ajustada em cada traço, para que o tempo de “*Cannon time*” ocorra na faixa de 25 a 35 segundos.

Uma vez determinada à água de amassamento (Ag), devem ser estudadas misturas de CCR para diferentes teores de cimento, tomando como referência à manutenção do fator de argamassa (K) e a relação água/materiais secos (H) conforme as equações abaixo:

$$K = \frac{a + 1}{m + 1}$$

$$H = \frac{Ag / C}{m + 1} \times 100$$

Onde:

**K** = Fator de argamassa;

- H** = Relação água/materiais secos;  
**a** = Relação agregados miúdos / cimento em peso;  
**m** = Relação agregados totais / cimento em peso;  
**Ag** = Água otimizada no traço piloto em kg/m<sup>3</sup>; e,  
**C** = Consumo de cimento em kg/m<sup>3</sup>.

Sobre o uso do aparelho Vebe modificado que é usado para medir a trabalhabilidade através da determinação da consistência e massa unitária do CCR no estado fresco, KOKUBU et al (1995) explicam que o contrapeso colocado sobre a amostra de concreto no recipiente cilíndrico do aparelho Vebe apresenta padrões diferentes no que tange o seu uso no mundo. Por exemplo, segundo os padrões japoneses, é especificado um contrapeso de massa igual a 20 kg; já de acordo com os padrões da ASTM C1170, é especificado um contrapeso de massa igual a 22,7 kg, e conforme os padrões do AMERICAN CORPS OF ENGINEERING é utilizado um contrapeso de 12,5 kg. Baseado nestas normas e na aceleração adotada na mesa de vibração do aparelho Vebe, os autores concluíram que quanto mais pesado for o contrapeso colocado sobre a amostra de concreto, a máxima compactação será alcançada vibrando o concreto sob baixa aceleração.

## **2.8 – DEFINIÇÃO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO**

Para HURTADO DIAZ (1993), este parâmetro é definido em função do equipamento de construção utilizado na compactação do CCR em campo (rolo compressor) e das características exigidas no projeto estrutural.

As principais variáveis que influenciam a compactação do CCR são a composição da mistura, a distribuição adequada da granulometria, a forma das partículas dos agregados e o conteúdo de água livre na mistura.

Conforme a ASSOCIAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND (PCA) a compactação é a fase mais importante da construção da camada de CCR, pois através dela é possível prever alguns parâmetros como a densidade, a resistência, o nível de acabamento e a textura da superfície.

PITTA & HURTADO DIAZ (1991) e TRICHÊS (1993), salientam que as energias tradicionalmente empregadas na compactação do CCR para pavimentação são as mesmas empregadas na compactação solos, onde se destaca as energias do Proctor (1933) a qual se divide em Normal (N), Intermediária (I) e a Modificada (M) que correspondem a 5,8 kgcm/cm<sup>3</sup>, 12,3 kgcm/cm<sup>3</sup> e 26 kg cm/cm<sup>3</sup>, ou 0,59 J/cm<sup>3</sup>, 1,27 J/cm<sup>3</sup> e 2,70 J/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

A Tabela 2.4 mostra a quantidade de golpes por camadas com o soquete de 4,5 kg com altura de queda de 45 cm, quando a compactação do CCR é realizada em moldes cilíndricos de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura para verificação da resistência à compressão normalmente determinada aos 7 e 28 dias, sendo que esses corpos-de-prova (Cp's) são moldados em 05 camadas.

**Tabela 2.4** – Número de golpes para cada camada para moldagem de CP's cilíndricos de 15 x 30 cm e respectivas energias de compactação

<b>Energia de compactação</b>	<b>Número de golpes/camadas</b>
Normal (N)	30
Intermediária (I)	65
Modificada (M)	138

FONTE: HURTADO DIAZ (1993)

A Tabela 2.5 apresenta a quantidade de golpes por camada necessária para a moldagem dos Cp's prismáticos de 15 x 15 x 50 cm, destinados à determinação da resistência à tração na flexão, sendo que esses Cp's são moldados em 2 camadas.

**Tabela 2.5** – Número de golpes para cada camada para moldagem de Cp's prismáticos de 15 cm x 15 cm x 50 cm e respectivas energias de compactação

<b>Energia de compactação</b>	<b>Número de golpes/camadas</b>
Normal (N)	160
Intermediária (I)	345
Modificada (M)	733

FONTE: HURTADO DIAZ (1993)

TRICHÊS (1993) e HURTADO DIAZ (1993) comentam que a energia de compactação influencia, para um mesmo traço, a massa específica aparente seca do CCR. Para consumos de cimento menores que  $200 \text{ kg/m}^3$  a resistência média à compressão aos 28 dias de idade aumenta em aproximadamente 22% ao mudar da energia normal para intermediária e 40% da normal para modificada. Para os consumos de cimento acima de  $200 \text{ kg/m}^3$ , o acréscimo observado ao se passar da energia normal para a intermediária ou modificada é de apenas 10%.

Segundo PAULON (2004), a utilização de material muito seco dificulta a compactação dos corpos-de-prova com os meios convencionais de obra, os quais não simulam adequadamente as condições de campo. Portanto, a solução utilizada para obter melhores resultados e praticado atualmente nas obras de CCR é a compactação do corpo-de-prova em bancadas vibratórias, com frequência e amplitude similares aquelas dos ensaios de consistência durante o tempo de Vebe determinado na dosagem. Em paralelo, ocorreu também que vários laboratórios e obras utilizaram a compactação com martelotes vibratórios com algum sucesso, porém com a probabilidade de haver não conformidade no processo.

## **2.9 – MOLDAGEM DE AMOSTRAS E ENSAIOS DE QUALIDADE**

A qualidade da mistura de CCR é geralmente avaliada através dos seguintes ensaios:

- Resistência à compressão simples, em corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 15 cm x 30 cm;
- Resistência à tração na flexão, em corpos-de-prova prismáticos com dimensões de 15 cm x 15 cm x 50 cm;
- Ensaios de retração por secagem;
- Ensaios de módulo de elasticidade;
- Ensaios de desgaste; e,
- Resistência aos ciclos de gelo e degelo, em países sujeitos aos invernos rigorosos.

Segundo o procedimento PR – 2 da ABCP, para a moldagem de amostras para determinação do ensaio de resistência à compressão axial utilizam-se moldes cilíndricos de 15 cm x 30 cm, sendo a amostra preparada em 05 camadas, cada uma delas recebendo 65 golpes de um soquete com massa de 4,5 kg, com altura de queda de 45 cm, (o que corresponde à energia intermediária de compactação segundo normas DNER 40 e NBR 7182).

Quando exigido o controle da resistência à tração na flexão, caso do CCR para base e revestimento ou base revestida, a moldagem pode ser feita em moldes prismáticos de 15 cm x 15 cm x 50 cm, em 02 camadas, cada uma delas recebendo 345 golpes do mesmo soquete pré-citado, também utilizando a energia intermediária de compactação.

TRICHÊS (1993) ressalta que, embora a relação umidade/massa específica aparente seca máxima seja definida no ensaio de Proctor, a tendência é empregarem-se equipamentos que combinem vibração com sobrecarga na moldagem de CP's para a avaliação destas resistências.

AMER et al. (2002), destacam que em seus estudos foi utilizado um dispositivo de compactação giratória para moldagem das amostras usadas na determinação da densidade e das propriedades mecânicas de CCR para pavimentação, o qual pode substituir métodos tradicionais tais como o aparelho Vebe modificado, a mesa vibratória e o martelo vibrador. Segundo o autor, o uso deste método pode superar algumas limitações existentes nos outros métodos tais como a determinação da consistência e a compatibilidade entre os resultados obtidos em laboratório e em campo. Mas, infelizmente, este é um procedimento que não está sendo utilizado no mundo devido à complexidade do ensaio, falta de uma norma que especifique o seu uso e, também, falta de estímulo.

## **2.10 – PROPRIEDADES DO CCR NO ESTADO ENDURECIDO**

MEHTA & MONTEIRO (1994) comentam que a resposta do concreto às tensões aplicadas não depende somente do tipo de solicitação, mas também de como a combinação de vários fatores afeta a porosidade dos diferentes componentes estruturais



do concreto. Tais fatores incluem propriedades e proporções dos materiais que compõem o traço do concreto, grau de adensamento e condições de cura.

NEVILLE (1997) relata que os ensaios com concreto endurecido podem ser de um modo geral, classificados em determinações destrutivas e não destrutivas que permitem ensaios repetidos do mesmo corpo-de-prova e, portanto, um estudo da variação das propriedades com o tempo caracteriza os dois principais objetivos que são o controle tecnológico e o atendimento às especificações.

Tendo em vista a diversidade de condições construtivas e a importância relativa das estruturas em CCR destinado para camada de base de pavimentos rodoviários, BALBO (2004) recomenda alguns valores típicos para as propriedades do CCR no estado endurecido conforme mostrado na Tabela 2.6.

**TABELA 2.6** – Propriedades mecânicas típicas do CCR como base

<b>Consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência à Compressão Simples (MPa)</b>	<b>Resistência à Tração na Flexão (MPa)</b>	<b>Módulo de Deformação (GPa)</b>
80	5 a 7	0,6 a 1,0	7,4 a 12,6
120	10 a 15	1,2 a 2,2	17,1 a 21,9
160	16 a 23	2,0 a 2,8	20,6 a 24,0

FONTE: HURTADO DIAZ (1993)

### ***2.10.1 – Determinação da Resistência à Compressão***

Para ANDRIOLO & SGARBOZA (1993) o conceito aceito para a resistência à compressão é o da habilidade de resistir forças, sendo que a resistência do concreto é um bom indicador das demais propriedades tanto direta quanto inversamente proporcional. Em função disso, e pela maneira relativamente simples de determinar a resistência à compressão, ela é usada normalmente como índice para controle da

qualidade e da avaliação de vários fatores como proporção de materiais, equipamentos de produção e condições de cura.

Quanto à moldagem dos corpos-de-prova, a norma DNER – ES 322/97 estabelece que os mesmos devam ser moldados em cinco camadas de alturas aproximadamente iguais, compactadas com soquetes de 4,5 kg, com altura de queda de 45,0cm, recebendo cada camada o número de golpes necessários para a energia definida na dosagem.

Conforme ANDRIOLO (1989), a resistência à compressão simples do CCR é afetada principalmente pela relação entre a granulometria e o teor de cimento e ainda pela energia de compactação. Segundo o autor, as resistências obtidas para o CCR são aproximadamente 15% a 30% mais elevadas do que as do concreto convencional com mesmo teor de cimento.

### ***2.10.2 – Determinação do Módulo de Elasticidade***

De acordo com ANDRADE (1997), no caso do CCR, esta propriedade assemelha-se a do concreto convencional com maior consumo de cimento, embora o comportamento das curvas tensão/deformação seja similar ao comportamento das curvas do concreto convencional.

Segundo ANDRIOLO (1989), os principais fatores que afetam as propriedades elásticas do concreto são: a idade, o tipo de agregado e a qualidade da pasta. O módulo de elasticidade do concreto aumenta com a idade e é governado nas idades iniciais, principalmente, pelo teor de aglomerante e, após pelas características elásticas dos agregados. O módulo de elasticidade sofre variações em função dos seguintes fatores:

- Tipo e consumo de cimento;
- Idade do concreto;
- Tipo e quantidade de agregado; e,
- Porcentagem de ar incorporado.

Conforme a NBR 8522 (1984), o módulo de elasticidade é determinado utilizando-se corpos-de-prova (CP's) cilíndricos de 15 cm x 30 cm ou CP's cilindros que obedeçam à relação 2:1 e sejam submetidos a carregamentos estáticos por compressão axial simples.

Esta norma também recomenda que para estruturas submetidas a carregamentos e descarregamentos cíclicos, o módulo mais usado é o tangente inicial e, uma vez definido o plano de carga a ser usado, a velocidade adotada para a execução do ensaio é:

- Carregamentos  $\gg 0,50 \pm 0,05$  Mpa/s; e,
- Descarregamento  $\gg 5,0 \pm 0,5$  Mpa/s.

O módulo de elasticidade do CCR é menor que o módulo de elasticidade do concreto convencional, nas baixas idades quando se usa baixo teor de pasta (cimento e água). A partir da idade de, aproximadamente, 90 dias, o módulo de deformação do CCR tende a se assemelhar ao do concreto convencional.

### ***2.10.3 – Determinação da Resistência à Tração na Flexão***

ANDRIOLO & SGARBOZA (1993) comentam que, normalmente, o concreto não é projetado para resistir a esforço de tração, porém, o ensaio de resistência à tração na flexão por ser um método direto é muito utilizado para caracterizar esta propriedade e o ensaio normalizado conforme a NBR 12142/91 é realizado em CP's prismáticos de seção quadrada.

ANDRIOLO & SGARBOZA (1993) relatam que na determinação da resistência do concreto por tração através de ensaios diretos, esbarra sempre na dificuldade de se obter cargas suficientemente concêntricas de tal forma que as excentricidades eventuais, existentes, não falseiem o resultado final. Essas dificuldades são conseqüências diretas da baixa resistência à tração do concreto e das dimensões mínimas necessárias do corpo-de-prova em função do tamanho dos agregados.

Segundo TRICHÊS (1993), a resistência à tração por flexão é de grande importância para o dimensionamento de pavimentos que contenham este tipo de

material. A determinação da resistência de ruptura por flexão é obtida pelo ensaio de flexão em vigas, normalmente avaliada aos 28 dias.

MHETA & MONTEIRO (1994) comentam que no ensaio de resistência a tração na flexão, o corpo-de-prova é carregado a uma velocidade de 0,8 a 1,2 Mpa/min e o valor final da resistência pode ser influenciado pela velocidade de carregamento.

ABREU (2002) expõe que o valor de resistência à tração na flexão do CCR utilizado na pavimentação, bem como a idade de avaliação deste parâmetro, deve ser fornecido ao tecnologista encarregado da dosagem do concreto pelo projetista de pavimentação.

#### ***2.10.4 – Ensaio não destrutivo através do Uso do Ultra-Som***

PETRUCCI (1998) comenta que no geral os problemas com concreto procuram ser sanados ainda em laboratório através de ensaios com amostras retiradas na ocasião da concretagem. Porém, quando os resultados das amostras se apresentam inferiores dos especificados, são necessários ensaios posteriores na própria obra os quais podem ser classificados como não destrutivos, pois permitem a inspeção de suas condições internas ou superficiais, sem a destruição da peça que está sendo examinada. A seguir apresentamos alguns tipos de ensaios não-destrutivos existentes:

- Esclerometria;
- Extração;
- Ultra-som;
- Gamagrafia; e,
- Pacômetro.

Em particular, o ultra-som é um método que determina a velocidade de propagação de ondas ultra-sonicas no concreto para verificar sua homogeneidade e propriedades mecânicas e, por ser um teste não destrutivo, apresenta ampla possibilidade de aplicação no estudo de patologias e no controle de qualidade do concreto.

MENEGHETTI (1999) comenta que o desenvolvimento do método da propagação de ondas ultra-sônicas começou simultaneamente no Canadá e na Inglaterra

por volta da década de 1960. Dentre os métodos de ensaio não destrutivos mais populares a utilização do ultra-som para a avaliação da resistência do concreto é um método que proporciona baixo custo, rapidez na execução dos testes e a ausência de danos à estrutura do concreto.

Segundo FHWA (1994) e WHITING et al (1994) houve diversos exemplos de utilização de ensaios com ultra-som como técnica não destrutiva em pavimentos onde foi usada a metodologia de fast-track, pois em tal caso não foi necessário à moldagem de CP's para medir a resistência, mas, simplesmente, estimar através de uma relação previa do desenvolvimento da resistência com a velocidade de pulso do ultra-som, chamada também de p-wave a velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas.

#### **2.10.4.1 – Características Gerais do Ultra-som**

Para RAVINDRARAJAH (1992), apud MENEGUETTI (1999), a principal vantagem da utilização do ultra-som na estimativa da resistência “*in situ*” é que a velocidade de propagação das ondas não é afetada pela forma e tamanho dos elementos estruturais desde que a largura da peça seja maior que  $\lambda$ , o qual depende da frequência do transdutor. A Tabela 2.7 apresenta algumas situações quanto às condições do concreto em relação à velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas.

**Tabela 2.7** – Condições do concreto em relação à propagação de ondas ultra-sonicas

<b>Velocidade de propagação (m/s)</b>	<b>Condições do concreto</b>
Superior a 4500	Excelente
3500 a 4500	Bom
3000 a 3500	Regular
2000 a 3000	Geralmente ruim
Inferior a 2000	Ruim

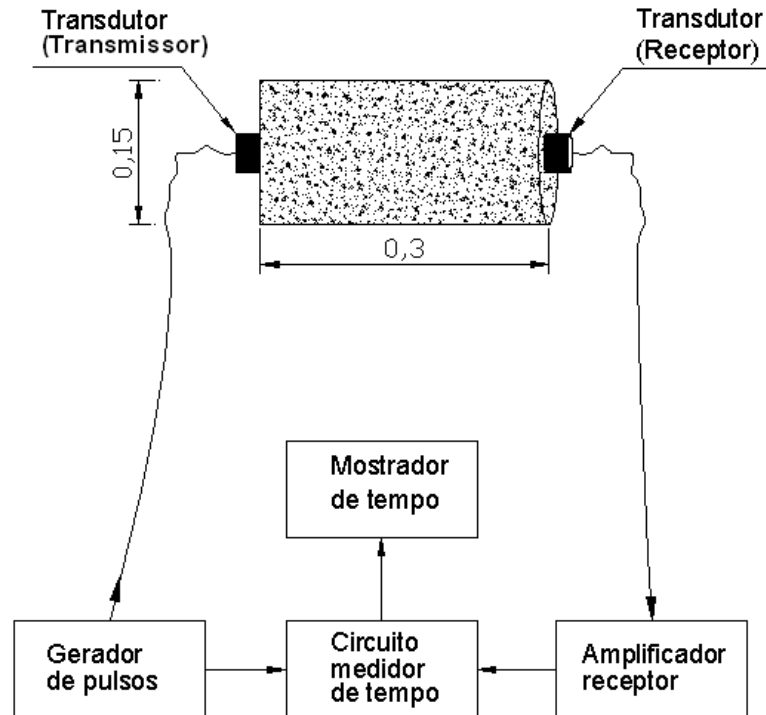
FONTE: PETRUCCI, 1998.

NEVILLE (1997) comenta que o aparelho de ultra-som compreende transdutores colocados em contato com o concreto, um gerador de pulsos com frequência entre 10 kHz e 150 kHz, um amplificador, um circuito medidor de tempo

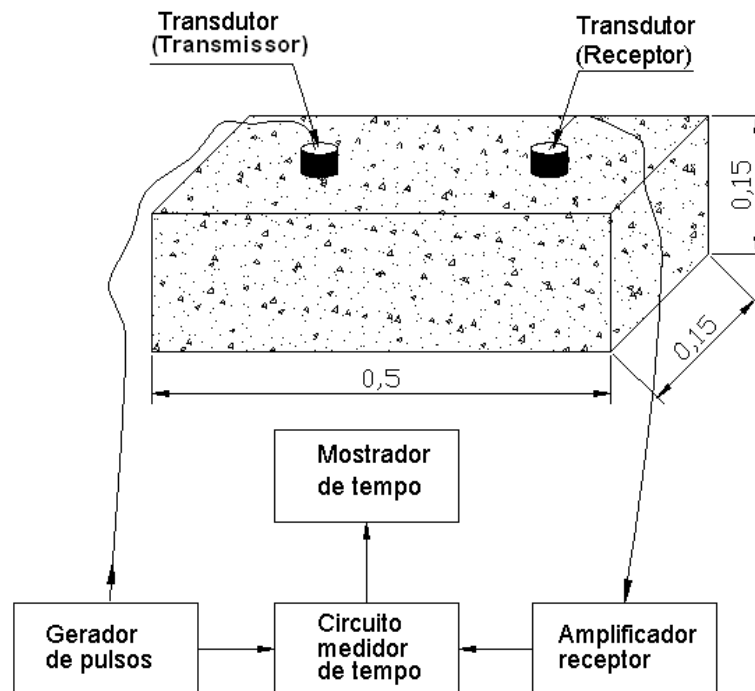
digital, que mostra o tempo do percurso entre os transdutores. De acordo com GONÇALVES (2003) a utilização do ultra-som é relativamente simples. O aparelho é composto de uma fonte, na qual estão acoplados dois transdutores. O primeiro transdutor transforma impulsos elétricos em ondas acústicas, que são refletidas no interior do corpo-de-prova analisado e o segundo capta esses sinais, convertendo-os novamente em impulsos elétricos e, desta maneira, com base na distância e no tempo de percurso das ondas sonoras é possível calcular a velocidade das mesmas.

Quando impulsos mecânicos são aplicados a materiais sólidos, três diferentes tipos de ondas são gerados, são elas: as ondas longitudinais ou de compressão, as ondas transversais ou de cisalhamento e as ondas de superfície ou “*Rayleigh*” (NAIK & MALHOTRA, 1991 apud MENEGHETTI, 1999). As ondas longitudinais ou de compressão são duas vezes mais rápidas que os outros dois tipos e têm a posição das partículas na mesma direção em que as ondas se propagam. As ondas transversais ou de cisalhamento têm as partículas movimentando-se perpendicularmente à direção de percurso da onda e as ondas de superfície ou *Rayleigh* têm percurso ao longo da superfície e têm as partículas posicionadas elipticamente (MENEGUETTI, 1999).

MENEGUETTI (1999) expõe que os modos de transmissão dos sinais são classificados de acordo com o arranjo dos transdutores. Quando os pulsos são gerados por transdutores em faces opostas, classifica-se como modo de transmissão direta, quando estão perpendiculares entre si, chama-se de transmissão semi-direta e quando os transdutores estão no mesmo plano classifica-se como transmissão indireta. As Figuras 2.6 e 2.7 mostram os esquemas destes dois modos de transmissão.



**Figura 2.6** – Esquema de funcionamento de ultra-som pelo modo de transmissão direta medido em CP's cilíndricos



**Figura 2.7** – Esquema de funcionamento de ultra-som pelo modo de transmissão indireta medido em CP's prismáticos

As velocidades de ondas ultra-sonicas obtidas em determinada região de uma estrutura de concreto ou em CP's podem ter um pouco ou nenhum significado se não houver um programa específico que considere a ação das variáveis envolvidas.

A velocidade de uma onda ultra-sônica que se propaga pela forma direta em um material sólido, homogêneo, elástico, isotrópico e semi-infinito pode ser calculada pela equação 2.5 (BUNGEY, 1989).

$$V = (K * (E/\gamma))^{1/2} \quad (\text{Equação 2.5})$$

Onde:

**V** = Velocidade de pulso do ultra-som, em m/s;

**E** = Módulo de deformação dinâmico, em GPa;

**$\gamma$**  = Massa específica do concreto, em kg/dm<sup>3</sup>;

**K** =  $(1 - \nu) / (1 + \nu) * (1 - 2\nu)$ ; e,

**$\nu$**  = Coeficiente de Poisson dinâmico adotado igual a 0,2 para E = 2,1 GPa.

Quando a velocidade de propagação da onda ultra-sônica é medida pela forma indireta também é usada à mesma equação, porém a onda se propaga pela camada superior do corpo-de-prova o que facilita a medição em campo, devido não se conhecer a com precisa o percurso da onda.

Segundo MENEGHETTI (1999), conduzir os testes de velocidade de pulso ultra-sônico é relativamente fácil. Entretanto, mais importante do que o teste ser bem conduzido é saber interpretar os resultados. As leituras devem ser reproduzíveis e os fatores que as afetam analisados. Dentre os itens que podem afetar a velocidade de propagação das ondas ultra-sonicas destacam-se os agregados, proporcionamento da mistura, tipo de cimento usado, temperatura de cura, umidade do corpo-de-prova e presença de armadura.

FERRARI et al (2003) comentam que através do método de propagação de ondas ultra-sônicas é possível ter as seguintes características:

- Estimar a resistência à compressão do concreto devido as grandes diferenças de densidade que ocorrem logo nas primeiras idades oriundas do processo de hidratação



do cimento, as quais provocam mudanças significativas na velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas;

- Determinar o módulo de elasticidade dinâmico do material;
- Avaliar a homogeneidade do concreto; e,
- Detectar a presença de fissuras ou trincas.

## **2.11 – COMPORTAMENTO A FADIGA DO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO**

Quando ocorre a passagem de apenas um veículo pesado sobre o pavimento, isto não implica, necessariamente, dano ou ruptura deste pavimento. Entretanto, quando ocorre a repetição de passagens de veículos sobre este mesmo pavimento pode ocorrer que a partir de certo número de ciclos ocorra danos ou rompimento por fadiga (SENÇO, 1997).

O trincamento por fadiga representa o fenômeno de fratura que ocorre no pavimento devido o acúmulo de tensões no decorrer do tempo. As tensões atuantes de tração e cisalhamento podem ser menores que a resistência do material, porém, o acúmulo destas tensões é que fazem o material romper de forma precoce (SILVA, 2005).

NEVILLE (1997) comenta que, no geral, só são consideradas as solicitações estáticas na resistência do concreto. No entanto, em muitas estruturas são aplicadas solicitações cíclicas tais como pontes, pavimentos rodoviários e aeroportuários.

Para SILVA (2005), em um pavimento composto, o número admissível de repetições para evitar a fadiga é função da resistência à compressão e tração na flexão da camada cimentada, da tensão de tração atuante e da resistência ao cisalhamento da camada asfáltica.

Quanto à verificação da fadiga no CCR, TRICHÊS (1993), foi um dos pioneiros neste tipo de estudo, sendo que através de ensaios com carregamentos senoidal e

freqüência de 5 hz em vigotas de 15 cm x 15 cm x 50 cm pode verificar o comportamento à fadiga deste tipo de concreto utilizado como base de pavimentos.

## 2.12 – CINZAS ÚMIDAS OU PESADAS

PIAZZA & RUI (1999) relatam que quando o carvão mineral é queimado sob a forma pulverizada em termelétricas convencionais, como é o caso do Brasil, origina-se, a partir dos minerais que o acompanham, cinza leves e cinza pesadas na proporção de 70% e 30% respectivamente.

POZZOBON (1999) ainda comenta que o uso do carvão mineral na produção de energia elétrica origina um grande volume de resíduos sólidos constituídos por: cinza leve (fly ash), cinza pesada (bottom ash) e escória (slag ou boiler slag).

Entretanto, ABREU (1999) destaca que são produzidas quantidades maiores de cinza pesada em caldeira de usinas onde o carvão britado é queimado em grelhas, como na Usina Termelétrica de São Jerônimo, no Rio Grande do Sul. Em caldeiras que utilizam o carvão pulverizado em suas câmaras de combustão como é o caso do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, a produção da cinza pesada é menor que a cinza leve, devido à pulverização e ao sistema utilizado para retirada das partículas sólidas em suspensão.

Em particular, a cinza pesada, também chamada de cinza de fundo, cinza de grelha, cinza úmida, ou, ainda, na língua inglesa, de **bottom ash**, é uma cinza mais pesada e de granulometria mais grossa que a cinza leve, caindo no fundo das fornalhas e gaseificadores, sendo freqüentemente conduzidas aos tanques de decantação através jatos de água, apresentando, por essa razão, ao contrário das cinzas leves, um elevado teor de umidade, alcançando, aproximadamente, 30% em peso.

ROCHA et al (1999) definem as cinzas pesadas como materiais cuja formação depende:

- a) Da composição do carvão;
- b) Do grau de beneficiamento e moagem do carvão;
- c) Do tipo de carvão quanto ao poder calorífico;

- d) Projeto e operação da caldeira; e,
- e) Do sistema empregado para a extração e manuseio das cinzas.

### ***2.12.1 – Uso da Cinza Pesada no Brasil***

A utilização da cinza pesada é determinada pelas suas características físicas, tais como: granulometria, efeito filler, pozolanicidade tardia e potencial de coloração. A forma grosseira e vítrea faz da cinza pesada um substituto ideal do agregado natural, conforme determinado por RAMME et al. (1998), apud CHERIAF et al. (1999).

Alguns trabalhos têm sido desenvolvidos atualmente sobre a utilização da cinza pesada como material cimentante na fabricação de blocos estruturais, blocos de vedação, briquetes de pavimentação e concretos moldados “in loco”, apresentando a mesma qualidade que os tradicionais e podendo resultar uma economia de até 40% no custo final da obra (ROCHA, 2003).

Entretanto, a legislação ambiental de Santa Catarina através da Fundação do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina – FATMA considera que o eventual uso das cinzas pesadas na construção civil em geral pode ser feito desde que satisfaça as normas técnicas e sejam tomadas as devidas medidas quanto ao transporte e armazenagem e condicionantes de emprego.

As Universidades Federais de Santa Catarina, do Rio Grande do Sul e de Santa Maria são pioneiras em desenvolver estudos para a aplicação deste resíduo, tendo sido já realizados estudos de viabilidade a partir da caracterização química do resíduo, levantamento de dados sobre a sua geração e uso atual, além de fabricação e teste de peças de concreto onde a cinza pesada foi usada como substituta do agregado miúdo.

Conforme ANDRADE (2004), outro possível uso das cinzas pesadas na construção civil no Brasil seria na dosagem do concreto com fins estruturais onde ela substituiria a areia natural com teores que podem variar de 25% a 100%.

Segundo FARIAS (2005), além das aplicações em matrizes de concreto também foram desenvolvidos no Brasil estudos analisando a utilização das cinzas resultantes da

queima do carvão mineral em estruturas semi-rígidas e flexíveis de pavimentos, sendo que já foi comprovada a viabilidade de sua utilização na pavimentação no que se refere ao desempenho mecânico. O autor concluiu que a estabilização de misturas solo/cinza pesada e cal melhoraram significativamente a capacidade de suporte das misturas, alcançando valores 60% maiores. O comportamento resiliente observado habilita a mistura com cinza pesada a ser empregada em camada de sub-base de pavimentos flexíveis.

Na prática, já se constata a utilização de cinzas pesadas em obras de infraestrutura e urbanização nas áreas periféricas dos municípios de Charqueadas e São Jerônimo no Rio Grande do Sul (UFRGS/Centro de Ecologia – 2000, p. 467).

### ***2.12.2 – Uso da Cinza Pesada no Mundo***

A produção da cinza nas usinas termelétricas dos EUA tem aumentado cada ano. Ao redor 80 milhões de toneladas da cinza de volante e de cinza pesada foram produzidos no fim de 2000 nos EUA (Ghafoori and Cai 1998; Golden 1997).

CHANDLER et al (1994) comentam que na Dinamarca, Alemanha e nos Países Baixos, mais de 50% da cinza pesada produzida é usada para aplicação em camadas de base granular de pavimentos flexíveis.

A cinza pesada é freqüentemente usada como um substituto de baixo custo para areias na produção de blocos de concreto e em muitos países ela é usada como base na construção de estradas (GHAFOORI e BUCHOLC, 1997; RANGANATH, 1998).

De acordo com a ARTBA (2003), o primeiro amplo uso conhecido de uma base de cimento estabilizada com cinza pesada nos EUA ocorreu no estado de West Virgínia, na rodovia ROTA – 2, durante os anos de 1971 – 1972. Nesta aplicação, o agregado usado era uma mistura de cinza pesada com escória de alto forno da Companhia Energética Americana de Mitchell e da Usina de Kammer, respectivamente.

Na dosagem da mistura foi usada uma proporção de 54% de escória de alto forno e 46% de cinza pesada com uma proporção de 5% de cimento Portland em relação

à massa total de agregados. A mistura realizada pelos pesquisadores era necessária para que o Departamento de West Virgínia conhecesse as especificações de graduação das bases tratadas com cimento para rodovias. Esta rodovia proveu excelente serviço por mais de 10 anos e uma redução significativa no custo de implantação se comparado com o uso de agregados convencionais.

Segundo a ARTBA (2003), em pesquisa realizada em 1992 nos EUA com algumas agências de transporte e em várias rodovias, foi indicado que cinco estados norte-americanos estavam se fazendo uso da cinza pesada para aplicações em alguns tipos de bases estabilizadas ou misturas de sub-base. Os estados que se destacaram no uso da cinza pesada incluem Arkansas, Kentucky, Mississippi, Texas e Utah.

O mesmo órgão ainda relata que em uma pesquisa desenvolvida em 2001, constatou-se que em 1996, um total de 0,7 milhões de toneladas de cinza pesada foi usado como base ou como mistura de sub-base das estradas norte-americanas sem, no entanto, saber qual a porcentagem exata utilizada para estas aplicações.

É interessante destacar que o grande uso da cinza pesada em obras de pavimentação se deve à qualidade do carvão mineral. Na Dinamarca, Alemanha, nos Países Baixos e também nos EUA, não é necessário a pulverização do carvão mineral como acontece no Brasil, para permitir uma melhor queima. As Figuras 2.8 e 2.9 mostram a diferença na graduação e aspecto entre a cinza pesada usada nos países citados e no Brasil.



**Figura 2.8** – Cinza pesada usada nos Estados Unidos, Dinamarca, Alemanha e Países Baixos.

FONTE: EDWARDS (2003)



**Figura 2.9** – Cinza pesada usada no Brasil

### 2.12.3 – Características da Cinza Pesada produzida no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda

Segundo ABREU (1999), a cinza pesada pode ser empregada como base estabilizada, em solos modificados ou estabilizados para rodovias, pistas e edificações, oferecendo após a compactação, uma base resistente. Na Tabela 2.8 são relatadas algumas características gerais da cinza pesada.

**Tabela 2.8** – Características gerais da cinza pesada

RESÍDUO	CARACTERÍSTICA	PRODUTO ELABORADO	VANTAGENS
CINZA PESADA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Subproduto da combustão do carvão;</li> <li>• Partículas com tamanho de 0,08 a 20 mm;</li> <li>• Forma angular;</li> <li>• Muito porosa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cimento;</li> <li>• Agregado leve;</li> <li>• Telha.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Economia de energia;</li> <li>• Aumento da capacidade de produção para um gasto de capital relativamente mais baixo.</li> </ul>

FONTE: ABREU (1999)

De acordo com CRIGNON et al (2001), a cinza pesada deve ser limitada à aplicações na construção de estradas ou edifícios que estejam longe do contato com a

água, pois este resíduo fica sujeito à ocorrência de reações químicas, as quais podem ocasionar a expansão do concreto resultando no aparecimento de fissuras.

A expansão de peças de concreto com cinza pesada deve-se à presença de metais não-ferrosos na composição de cinza pesada. Como a extração destes metais é muito difícil de fazer, uma solução é tratar a cinza com cimento, hidróxido de cálcio ou escória de alto forno. Segundo o autor, para ambos os tratamentos realizados foi possível obter uma grande melhora, sendo que no caso do tratamento com cimento Portland, que é mais efetivo, conseguiu-se reduzir as deformações ocasionadas pelo inchamento, em aproximadamente, 70%.

#### ***2.12.4 – Características Mineralógicas das Cinzas Pesadas***

KHIARA (1985) explica que a formação das cinzas está relacionada ao conteúdo de argilo-minerais e as condições de calcinação do carvão. A presença e a frequência dos esferolitos vítreos é um indicativo de boa qualidade pozolânica das cinzas.

NARDI (1988) explica que as cinzas “fly ash” são formadas por uma fase vítrea de natureza sílico-aluminosa, constituindo a maioria dos grãos da cinza, e, secundariamente, por mulita, quartzo, hematita e magnetita. É comum a ocorrência de carbono amorfo associado aos grãos de cinza.

De acordo com POZZOBON (1999) as cinzas se originam a partir de componentes não combustíveis de carvão e também de partículas não queimadas, a temperatura variável entre 1200 °C e 1600 °C.

A fase vítrea de natureza sílico-aluminosa é a mais importante e é constituída, principalmente, por grãos não opacos e forma arredondada. Sua formação está relacionada ao conteúdo de argilo-minerais e às condições de calcinação do carvão.

O carbono nas cinzas apresenta morfologia variada, apresentando-se na forma de massas irregulares, aglomerados reticulares e esferas. Encontra-se na fase amorfa,

semelhante ao negro de fumo. A quantidade de carbono está relacionada às condições inadequadas de combustão, finura e umidade do carvão.

### ***2.12.5 – Características Físicas da Cinza Pesada***

CHERIAF et al (1999) comentam que a utilização potencial da cinza pesada é determinada por suas características físicas, como distribuição do tamanho dos grãos, expansibilidade e cor. A textura normalmente grossa, fundida e vítrea da cinza pesada faz dela uma substituta ideal para os agregados naturais.

#### **a) Graduação**

Com base na graduação da cinza pesada a AASHTO M147-70 (1980) recomenda que a graduação deste material usado em camada de base granular deve ser no máximo de 19 mm, pois partículas grandes tendem a ser menos granulares e tipicamente podem incluir partículas cerâmicas ou metálicas.

Para KOPPELMAN (1993) & FIGHMY (1996), as partículas menores que 19 mm para a cinza pesada, se apresentam como um material bem classificado e com angularidade 40° a 45° contribuindo para uma alta capacidade de suporte.

Porém é importante esclarecer que as recomendações acima citadas não se enquadram à realidade brasileira, onde o carvão é pulverizado para depois ser queimado, resultando uma cinza pesada de graduação bem fina.

ANDRADE (2004) concluiu que, considerando unicamente a substituição total da areia natural por cinzas pesadas, a curva granulométrica não se enquadra em nenhum dos limites imposto pela NBR 7217 (1987), devido o aparecimento de uma grande quantidade de finos passante na peneira 0,15mm – 26% em massa.

#### **b) Inchamento**

Para CRIGNON et al (2001), a cinza pesada quando usada como agregado miúdo, deve ser tratada de tal forma que a qualifique para ser usada de preferência como



material de construção de estradas. Isto é recomendado, principalmente, quando a cinza pesada é usada na forma pulverizada, podendo, neste caso, reter uma quantidade de água acima dos padrões adotados para um agregado miúdo natural, o que pode ocasionar a expansão da peça de concreto, não sendo recomendada para peças estruturais usadas na construção civil.

Através de vários ensaios sob várias condições de umidade e diferentes tipos de inchamento foram encontradas três causas principais para este fenômeno: i) medidas de expansão devido à quantidade de água que pode estar presente e afastar os grãos uns dos outros; ii) tratamento de impacto com faixas de expansão e; iii) combinação de reações químicas que resultam do inchamento.

KREUZ et al (2001) observaram que a presença de água absorvida pela cinza pesada foi bastante elevada se comparada com o material substituído, no caso da areia natural. Recomendam então uma secagem prévia da cinza em virtude da dificuldade que existe quando misturas são feitas em grande escala, devido, principalmente, esta umidade natural ser inerente da cinza pesada quanto a sua extração, manuseio e estocagem.

Entretanto, segundo ANDRADE (2004), o uso da cinza pesada em seu estado natural, ou seja, no seu estado úmido, visa reduzir a migração de certa parcela da água de amassamento para a cinza pesada devido à porosidade e a presença de material incombusto. Assim, efeitos como a redução da água destinada à hidratação completa do cimento e ainda na trabalhabilidade da mistura podem ser minimizados.

### **c) Massa Específica e Massa Unitária**

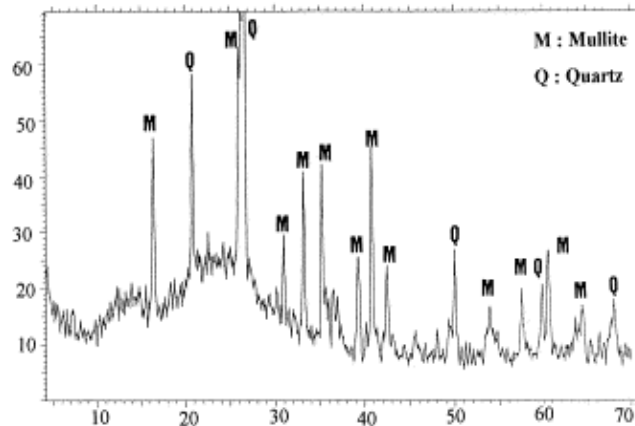
CHERIAF et al (1999) explicam que a presença significativa de partículas ocas (cenosferas e plerosferas) nas cinzas pesadas provenientes do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (Capivari de Baixo – SC), resulta em uma baixa massa específica para este agregado, sendo que através da realização do ensaio pelo método do picnômetro foi encontrado um valor em torno de 2,0 kg/m<sup>3</sup>.

A AASHTO M147-70 (1986), KOPPELMAN & TANENBAUM (1993) recomendam que a massa unitária da cinza pesada, na forma granular, deve estar entre 1,28 a 1,78 Kg/m<sup>3</sup> o que é um pouco baixo do exigido para agregados convencionais.

ANDRADE (2004) verificou que a cinza pesada na forma pulverizada como a produzida no Brasil apresenta uma massa unitária muito parecida com a cinza pesada na forma granular usada por KOPPELMAN & TANENBAUM (1993).

### 2.12.6 – Características Químicas da Cinza Pesada

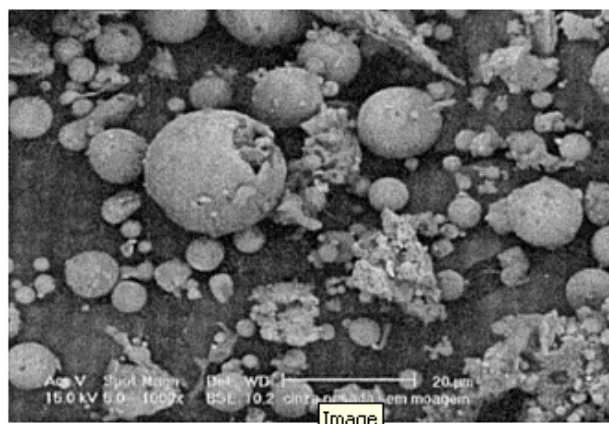
CHERIAF et al (1999), pesquisaram a cinza pesada produzida no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, e mostraram através da difração de raio-X da cinza pesada, a presença de uma fase vítrea com duas fases cristalinas principais de quartzo e mulita, conforme mostra a Figura 2.10.



**Figura 2.10** – Difração de raio-X da cinza pesada: Complexo Termelétrico Jorge Lacerda

FONTE: CHERIAF et al (1999)

A micrografia eletrônica de varredura da cinza pesada mostrou a existência de partículas esféricas e arredondadas ocasionando assim a formação de grãos irregulares. Na Figura 2.11 é mostrada a morfologia da cinza pesada.



**Figura 2.11** – Morfologia da cinza pesada: Complexo Termelétrico Jorge Lacerda

FONTE: CHERIAF et al (1999)

Os autores também mostraram que na composição química da cinza, conforme Tabela 2.9, o conteúdo de cálcio é muito baixo (<1%) e que a soma ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) alcança 88.5% possibilitando assim que esta cinza se enquadre na classe F, segundo a ASTM C-618.

**Tabela 2.9** – Composição química da cinza pesada produzida no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda

Óxidos (%)									
$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	S	LOI
56	26,7	5,8	0,6	0,8	0,2	2,6	1,3	0,1	4,6

FONTE: CHERIAF et al (1999)

## CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

### 3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Baseado nas discussões apresentadas nos capítulos anteriores, a metodologia da pesquisa terá como objetivo desenvolver um estudo laboratorial sobre a influência da adição da cinza pesada originada da queima do carvão mineral em substituição a areia natural nas propriedades mecânicas do CCR.

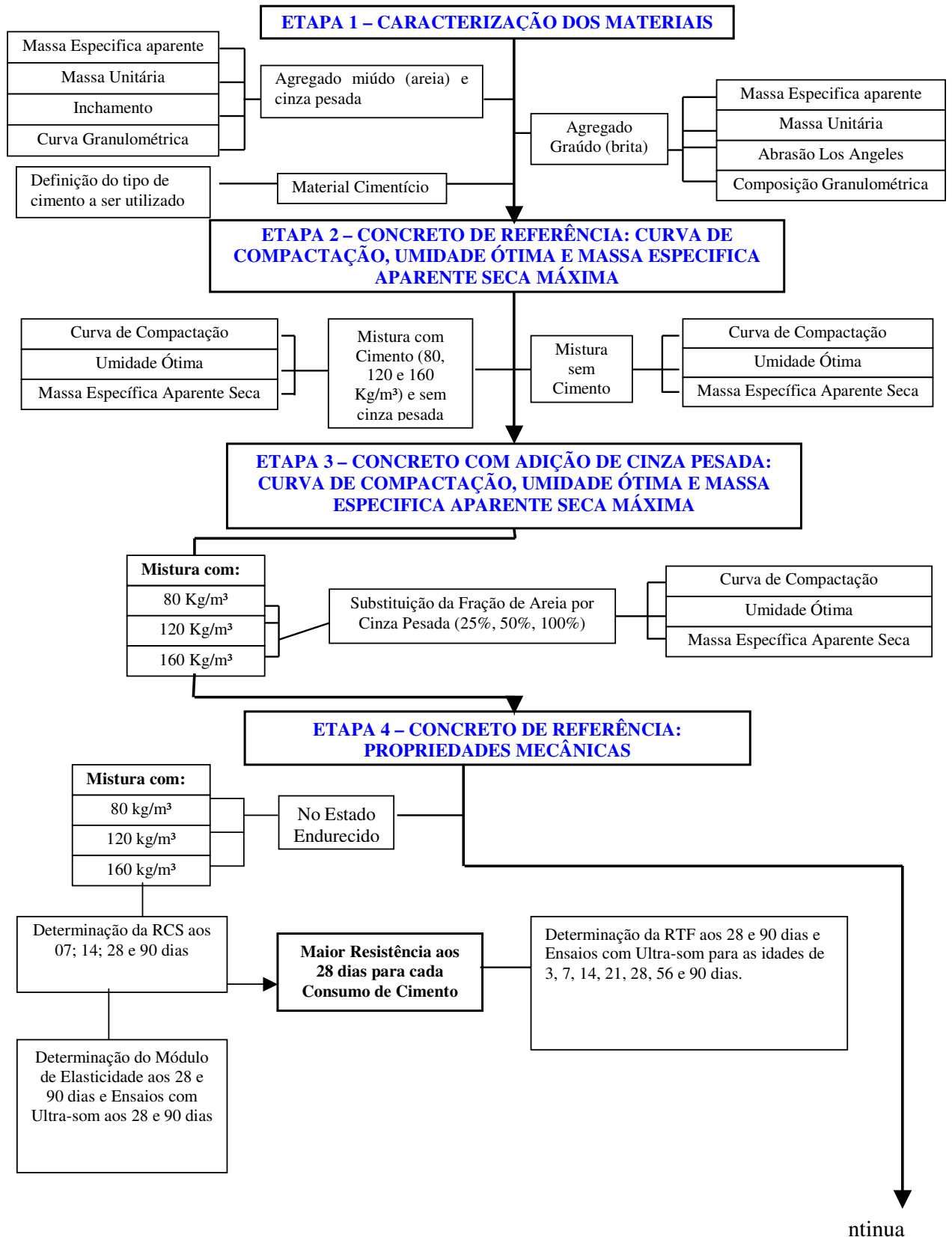
O objetivo principal desta pesquisa será de adequar o uso da cinza pesada, como substituta da areia natural na dosagem do CCR, onde se procurará agregar valor e dar um destino nobre a este resíduo que hoje é destinado exclusivamente ao uso em aterros, causando sérios danos ao meio ambiente na região de influência do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda.

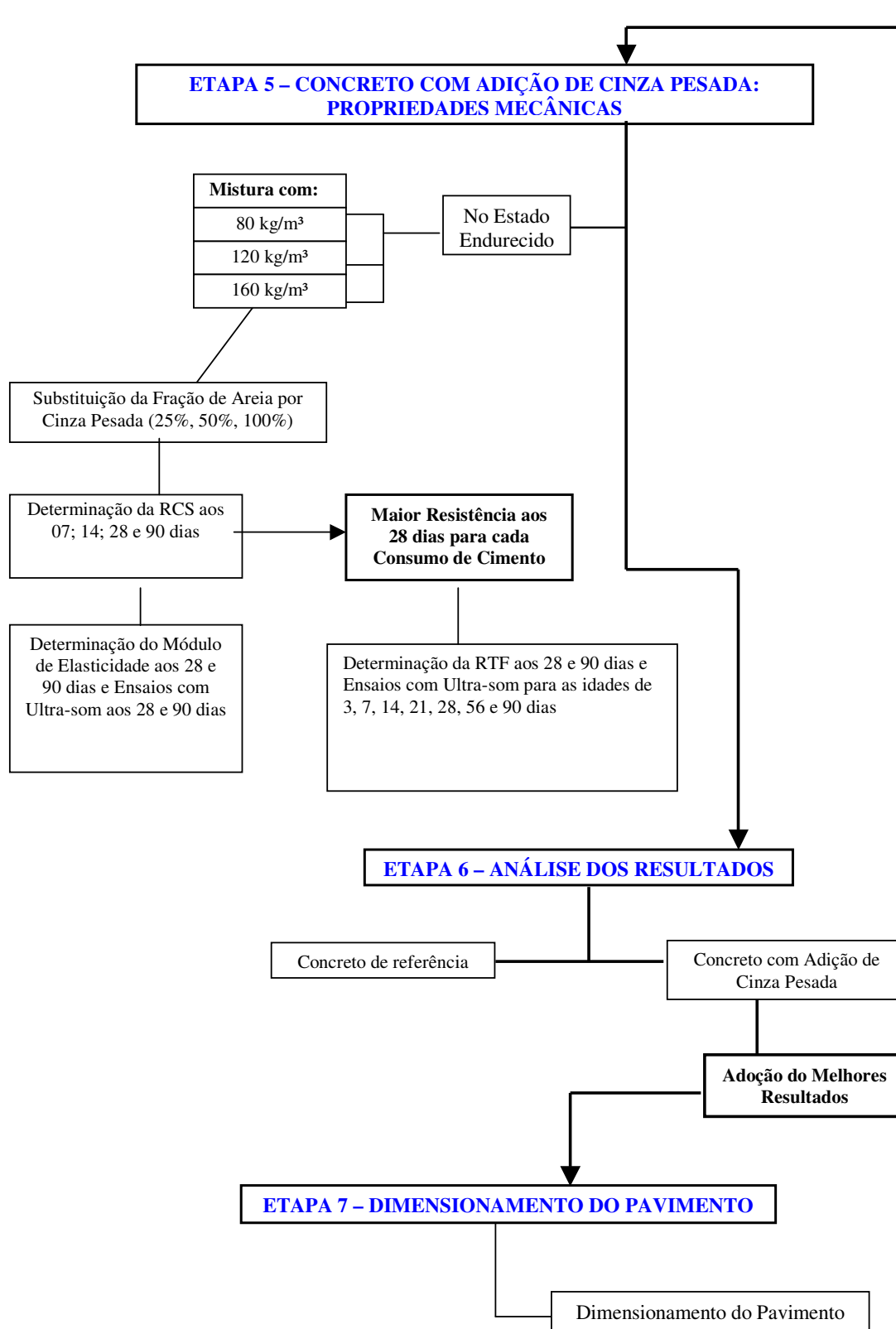
Para alcançar os objetivos propostos, esta pesquisa se desenvolverá em 07 Etapas conforme mostrado no Esquema da Metodologia da Pesquisa, descrito na seqüência.

De modo a facilitar o entendimento e tornar o entendimento do fluxograma mais simples serão adotadas as seguintes abreviações:

- i) Resistência à compressão simples = RCS;
- ii) Resistência à tração na flexão = RTF

**METODOLOGIA DA PESQUISA**





## 3.2 – ETAPAS DA PESQUISA

### 3.2.1 – *Etapa 1: Caracterização Dos Materiais*

Os locais para fornecimento dos materiais usados nesta pesquisa foram escolhidos com o intuito de poder empregar a mistura de CCR com cinza pesada em um trecho experimental da duplicação do Trecho Sul da BR – 101 a ser executado entre os quilômetros 247 – 248 (Cerca de 40 km ao sul de Florianópolis).

Devido a esta perspectiva, os agregados usados na pesquisa procederam da região de influência deste trecho experimental. O agregado graúdo provê de uma pedreira da região da Grande Florianópolis, localizada no município de São José, aproximadamente, no km 210 da BR – 101. A areia natural foi extraída do rio Tubarão, no município de Tubarão – SC com jazida localizada próxima ao km 333 da BR – 101 e distante cerca de 4 km do complexo Termelétrico Jorge Lacerda. A cinza pesada, por sua vez, foi coletada nas bacias de decantação números 7 e 8 do Termelétrica Jorge Lacerda, a qual está localizada no km 329 da BR – 101.

Nesta Etapa foram avaliadas as propriedades físicas do agregado miúdo (areia natural de rio), agregado graúdo (brita) e cinza pesada. O cimento utilizado foi o cimento Portland pozolânico (CP II – Z 32 com cerca 14% de material pozolânico) e a água foi fornecida pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento – CASAN.

Os ensaios para caracterizar o agregado miúdo (areia) foram os seguintes:

- i) Massa específica (conforme NBR 9776/1987 e DNER – ME 194/1998);
- ii) Massa unitária (de acordo com NBR 7251/1982);
- iii) Inchamento (conforme NBR 6467/1987 e DNER – ME 192/1997); e,
- iv) Granulometria (de acordo com a NBR 7211/2005 e DNER – ME 083/1998).

O agregado graúdo (rocha granítica obtida na pedreira da Mineradora Saibrita S.A.) no município de São José – SC, foi caracterizado de acordo com os seguintes ensaios:

- i) Massa específica (conforme NBR 9937/1987 e DNER – ME 195/1997);
- ii) Massa unitária (de acordo com NBR 7251/1982);
- iii) Abrasão Los Angeles (de acordo com NBR 6465/1984 e DNER – ME 035/1998); e,
- iv) Granulometria (NBR 7211/2005 e DNER – ME 083/1998).

A granulometria do CCR foi obtida através de uma mescla dos agregados com base em composições adotadas em obras brasileiras e de outros países.

A granulometria foi desenvolvida com o objetivo de contemplar a produção industrial dos agregados, isto é, procurou-se adequar a granulometria ao agregado produzido pela central de britagem de tal maneira que não houvesse a necessidade de peneirar material para assim satisfazer a composição granulométrica adotada, ressaltando que esta granulometria deverá atender a norma DNER – ES 303 (1997) que trata sobre o uso de base estabilizada granulometricamente como camada de pavimento para  $N > 5 \times 10^6$  (eixo padrão de 8,2 toneladas).

Em relação à caracterização da cinza pesada produzida no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, as propriedades físicas foram determinadas conforme as normas da ABNT e também procurando levar em consideração os estudos desenvolvidos por CHERIAF & ROCHA (1999). Foram realizados os seguintes ensaios para determinação das suas propriedades físicas:

- i) Inchamento (conforme NBR 6467/1987 e DNER – ME 192/1997);
- ii) Curva granulométrica (conforme NBR 7211/1987 e DNER – ME 083/1998);
- iii) Massa específica (conforme NBR 9776/1987 e DNER – ME 194/1998); e,
- iv) Massa unitária (de acordo com NBR 7251/1982).

### ***3.2.2 – Etapa 2: Concreto de Referência – Determinação da Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca Máxima***

Nesta Etapa foram determinadas as propriedades do CCR sem adição da cinza pesada e que passará a ser designado por concreto de “referência”, onde na sua dosagem serão utilizados somente materiais convencionais. O objetivo do desenvolvimento deste



concreto é poder comparar seus resultados com os resultados do CCR com cinza pesada.

Como a massa específica aparente seca varia com o tipo de agregado empregado na mistura e o teor de umidade, a sua determinação foi realizada conforme especificada a norma brasileira NBR 9776/1987.

Os teores de cimento utilizados nesta pesquisa foram 80, 120 e 160 kg/m<sup>3</sup>, orientado conforme especificação do DNER que estipula teores de cimento para o CCR entre 80 kg/m<sup>3</sup> e 200 kg/m<sup>3</sup> para camadas de base em CCR.

Para a determinação das curvas de compactação e definição das umidades ótimas adotou-se a energia do Proctor Intermediário. Os CP's de 15 x 30 cm foram compactados em cinco camadas, aplicando-se 65 golpes por camada com soquete de 4,5 kg de massa, e a uma altura de queda de 46 cm. Os teores de umidade variaram de 4%; 5,5%; 7%; 8,5% e 10%, sem reaproveitamento de material.

### ***3.2.3 – Etapa 3: Concreto com Adição de Cinza Pesada – Determinação da Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca Máxima***

Nesta etapa procurou-se utilizar a cinza pesada em substituição a determinadas proporções do agregado miúdo (areia) na dosagem do CCR.

Foram adotadas porcentagens em massa de 25%, 50% e 100% de cinza pesada em substituição ao agregado miúdo, sendo os teores de cimento utilizados foram os mesmos adotados na dosagem do concreto de referência, isto é, 80, 120 e 160 Kg/m<sup>3</sup> e os CP's compactados com a energia do Proctor Intermediário. Também foram obtidas as curvas de compactação com 0% de cimento para as três porcentagens de substituição de cinza pesada, sendo que no final, juntamente com as curvas do concreto de referência, trabalhou-se com um total de 16 curvas de compactação.

A massa específica aparente seca, também foi determinada seguindo o que é especificado pela norma brasileira NBR 9776/1987.

De modo a facilitar o entendimento, as misturas foram designadas, por exemplo, por “M 120/0”, onde o “M” significa mistura, o primeiro número refere-se à quantidade de cimento em kg utilizado para cada m<sup>3</sup> de CCR produzido e o segundo, a porcentagem de cinza pesada usada em substituição ao agregado miúdo. A Tabela 3.1 mostra a nomenclatura adotada para as misturas de CCR e fatorial do experimento.

**Tabela 3.1 – Nomenclatura das misturas de CCR**

Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de Cinza Pesada (%)			
	0	25	50	100
0	M 0/0	M 0/25	M 0/50	M 0/100
80	M 80/0	M 80/25	M 80/50	M 80/100
120	M 120/0	M 120/25	M 120/50	M 120/100
160	M 160/0	M 160/25	M 160/50	M 160/100

#### **3.24 – Etapa 4: Concreto de Referência – Determinação das Propriedades Mecânicas**

Nesta Etapa foram determinadas às propriedades mecânicas do CCR através dos ensaios de resistência à compressão, a resistência à tração na flexão e módulo de deformação. Também se empregou o ensaio de ultra-som (ensaio não-destrutivo) para estimar a resistência das misturas nas primeiras idades com o objetivo de avaliar a sua potencialidade para o controle tecnológico do processo executivo de campo.

O objetivo de conhecer as propriedades mecânicas deste concreto é poder compará-las com as propriedades mecânicas do concreto com cinza pesada.

A resistência à compressão simples foi avaliada nas idades de 07, 14, 28 e 90 dias (03 CP's para cada idade) para cada um dos consumos de cimento já citados. Para a determinação do módulo de deformação e ensaio de ultra-som foram moldados CP's para as idades de 28 e 90 dias (03 CP's para cada idade).

Para a determinação da resistência à tração na flexão aos 28 e 90 dias de cura foram moldados CP's prismáticos de 15 x 15 x 50 cm para cada idade. A moldagem dos

CP's foi feita nas condições de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima determinada na curva de compactação de acordo com o procedimento já apresentado. Com estes mesmos CP's prismáticos foram realizados ensaios de ultra-som para as idades de 03, 07, 14, 21, 28, 56 e 90 dias.

O objetivo da realização dos ensaios de ultra-som está relacionado com a dificuldade de controlar em campo a qualidade de execução de camadas granulares cimentadas tipo CCR. A estimativa da resistência da camada “*in situ*” nos primeiros dias de idade com o ultra-som apresenta-se com um grande potencial a ser pesquisado devido ao fato do ensaio ser não destrutivo, da facilidade de sua execução, aliado a boa precisão alcançada.

### ***3.2.5 – Etapa 5: Concretos com Adição de Cinza Pesada: Determinação das Propriedades Mecânicas***

Nesta Etapa, as propriedades mecânicas determinadas com CCR e as porcentagens de cinza pesada foram a resistência à compressão, a resistência à tração na flexão e o módulo de deformação.

Através do ensaio de ultra-som, foi estimada a resistência à compressão para as idades iniciais das misturas de CCR.

As propriedades foram determinadas para os CCR com 80, 120 e 160 kg/m<sup>3</sup> e com 0%, 25%, 50% e 100% de cinza pesada em substituição ao agregado miúdo.

A resistência à compressão simples, foi determinada nas idades de 07, 14, 28 e 90 dias (03 CP's para cada idade), sendo que todos os CP's foram confeccionados dentro da umidade ótima de compactação conforme determinado na Etapa 3. Também foram confeccionados CP's para avaliar o módulo de deformação nas idades de 28 e 90 dias e nestes CP's foram realizados ensaios de ultra-som.

Para as misturas que apresentaram os melhores resultados de resistência à compressão, foram confeccionados CP's prismáticos para a determinação da resistência à tração na flexão nas idades de 28 e 90 dias (03 CP's para cada idade), sendo que

nestes mesmos CP's foram realizados os ensaios de ultra-som para as idades de 03, 07, 14, 21, 28, 56 e 90 dias.

### ***3.2.6 – Etapa 6: Análise dos Resultados***

A partir dos resultados encontrados nas Etapas de 2 a 5, foi realizada uma discussão dos dados e valores de maior confiabilidade quanto à substituição de agregado miúdo por cinza pesada para os diferentes teores de cimento avaliados, onde procurou-se definir as potencialidades da cinza pesada no CCR.

### ***3.2.7 – Etapa 07: Dimensionamento do Pavimento***

Inicialmente foi definida uma estrutura típica de pavimento que pudesse ser executada segundo a concepção de pavimento composto, composta por:

- a. **Revestimento:** tratamento superficial duplo com 2,0 cm de espessura;
- b. **Base:** composta de CCR com cinza pesada e cerca de 120 kg/m<sup>2</sup> de cimento;
- c. **Sub-base:** formada por brita graduada com 13 cm de espessura; e,
- d. **Subleito:** formado por solo de fundação com CBR igual a 7%.

Com o emprego do programa ELSYM – 5 foram calculadas as tensões e deformações na estrutura, notadamente a tensão de tração na camada de CCR.

Com esta tensão e o modelo de fadiga para misturas com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento obtido por TRICHÊS (1993) estimou-se a vida útil desta estrutura em termos de número  $N_{8,2t}$  (USACE).

Os dados utilizados para os demais materiais da estrutura do pavimento proposto foram obtidos da literatura especializada ou a partir de resultados de ensaios com solos da região de Tubarão.

Na seqüência fez-se o dimensionamento de uma estrutura de pavimento flexível para se obter a mesma vida útil.

## CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para a execução do programa experimental foram usados os seguintes materiais:

Agregado miúdo (areia natural) >> extraída do rio Tubarão no município de Tubarão – Santa Catarina (SC);

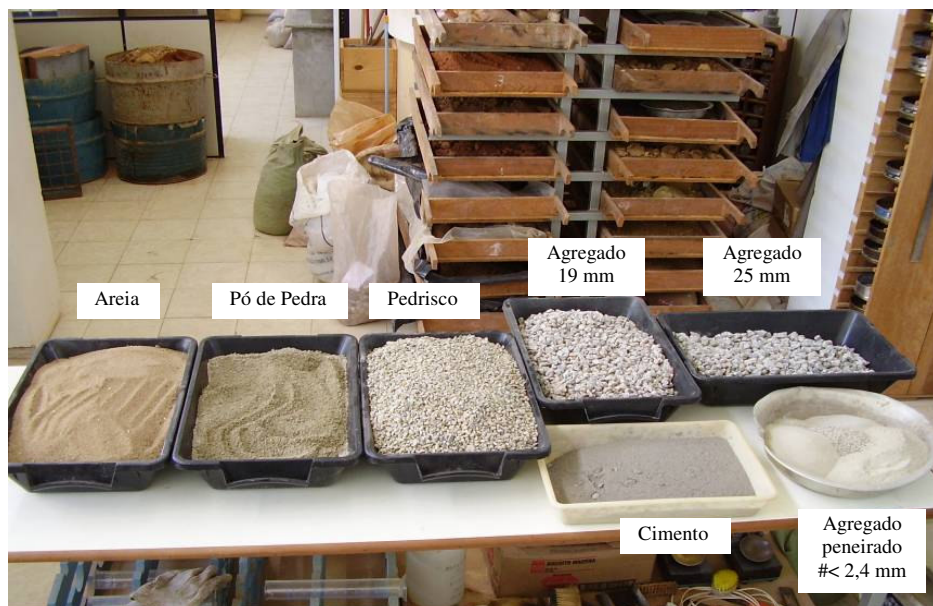
Agregado graúdo >> Coletado no município de São José – SC;

Cinza pesada >> Coletada nas bacias de decantação números 7 e 8 do complexo Termelétrico Jorge Lacerda;

Cimento >> Foi utilizado cimento CP-II Z 32 da marca Votoran; e,

Água >> Fornecida pela Companhia Catarinense de Água e Saneamento – CASAN.

A Figura 4.1 mostra uma fração de cada material usado no desenvolvimento da pesquisa.



**Figura 4.1** – Materiais usados na pesquisa

É interessante destacar que a cinza pesada não está apresentada nesta figura, pois a mesma será apresentada separadamente no item que trata exclusivamente da sua caracterização.

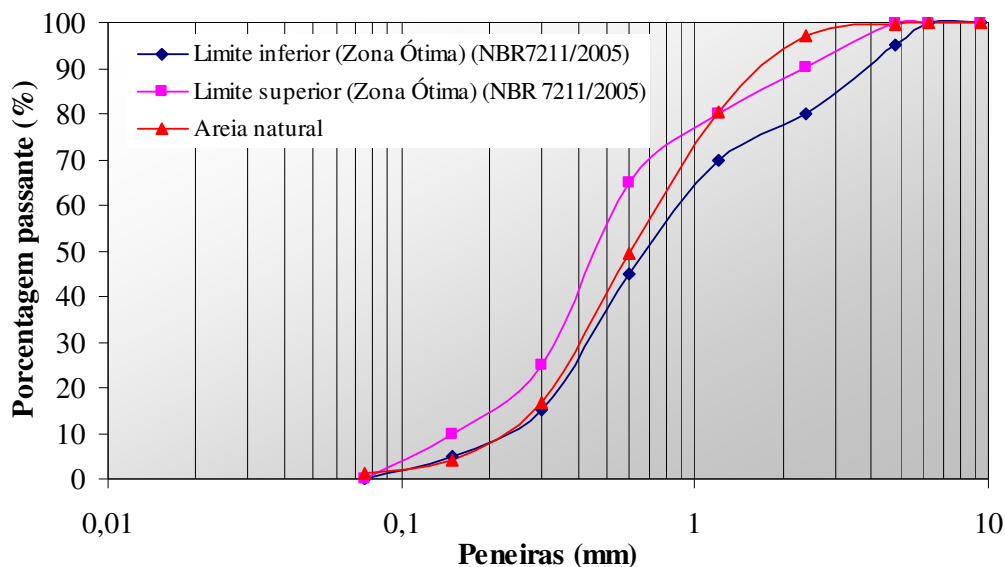
#### 4.1.1 – Areia Natural

A areia usada na pesquisa é de procedência da cidade de Tubarão e foi extraída do rio Tubarão e coletada no mês de novembro de 2004, sendo fornecida pela empresa Macoter Materiais de Construção.

A curva granulométrica deste material foi obtida conforme especificam as normas NBR 7211/2005 e DNER – ME 083/1998 e na Tabela 4.1 e na Figura 4.2 são mostrados os resultados obtidos.

**Tabela 4.1** – Composição granulométrica da areia natural

Peneiras (mm)	% Retida			% Retida Acumulada	% Passante	Limites Granulométricos - % Passante (NBR 7211/2005)	
	M1	M2	Média			Limite Inferior (Zona Ótima)	Limite Superior (Zona Ótima)
25	0	0	0	0	100	100	100
19	0	0	0	0	100	100	100
12,5	0	0	0	0	100	100	100
9,5	0	0	0	0	100	100	100
6,3	0,08	0,06	0,07	0	100	100	100
4,8	0,45	0,56	0,505	0,505	99,50	95	100
2,4	1,92	2,49	2,21	2,71	97,29	80	90
1,2	17,17	16,78	16,98	19,69	80,32	70	80
0,6	30,98	30,79	30,89	50,57	49,43	45	65
0,3	32,55	32,44	32,50	83,07	16,94	15	25
0,15	12,65	12,8	12,73	95,79	4,21	5	10
0,075	3,08	2,99	3,04	98,83	1,18	0	0
FUNDO	1,11	1,08	1,10	100,00	0,00	0	0
Dimensão máxima característica (D <sub>máx.</sub> )					2,4mm		
Dimensão mínima característica (D <sub>min.</sub> )					0,15mm		
Módulo de finura					3,51		
Classificação conforme a NBR 7211					Areia Média		



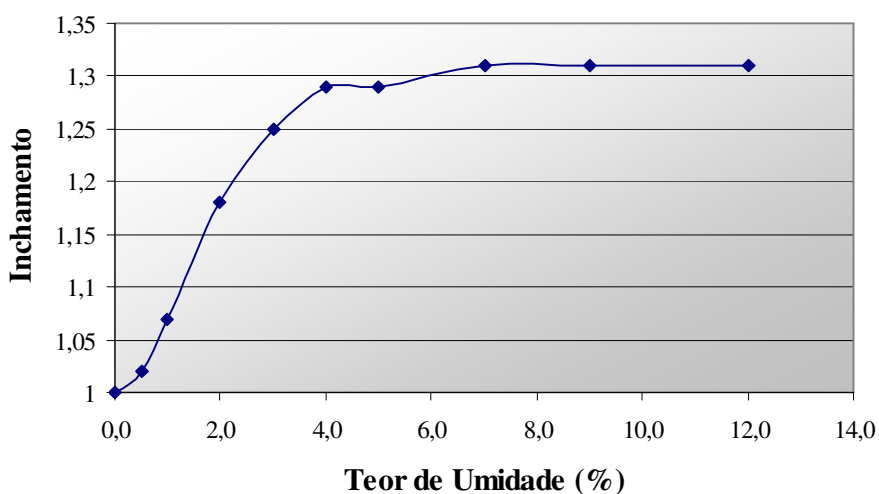
**Figura 4.2** – Curva granulométrica da areia natural

Pela análise da Tabela 4.1 e Figura 4.2 verifica-se que esta areia possui uma granulometria um pouco irregular de acordo com os limites da NBR 7211 (2005), pois ela resulta na falta de material grosso e material fino. Devido a sua uniformidade é possível que este agregado venha a incorporar vazios, o que não o torna favorável para que o CCR tenha um ganho de resistência.

Também foi realizado o ensaio de inchamento da areia conforme é especificado pelas normas NBR 6467 (1987) e DNER – ME 192 (1997), pois é importante conhecer qual a umidade crítica deste material, já que a dosagem do CCR se baseia no conceito de teor de umidade ótima de compactação. Na Tabela 4.2 e Figura 4.3 são mostrados os dados obtidos neste ensaio para este agregado.

**Tabela 4.2** – Análise do inchamento da areia natural

Teor de Umidade (%)	Quantidade de Água a ser Adicionada (ml)	Massa de Agregado Umido (kg)	Coefficiente de Inchamento (i)
0,0	0,00	22,93	1
0,5	114,65	22,66	1,02
1,0	114,65	21,74	1,07
2,0	229,30	19,86	1,18
3,0	229,30	18,85	1,25
4,0	229,30	18,53	1,29
5,0	229,30	18,61	1,29
7,0	458,60	18,74	1,31
9,0	458,60	19,02	1,31
12,0	687,90	19,55	1,31
Inchamento/Umidade Crítica			6,2
Coefficiente de Inchamento			1,35

**Figura 4.3** - Curva de inchamento da areia natural

Conforme observado na Tabela 4.2, este agregado apresentou uma umidade crítica acima do qual o coeficiente de inchamento pode ser considerado constante e igual ao coeficiente de inchamento médio, entre 7,0 e 12,0%. Esta areia apresentou um coeficiente de inchamento de 1,31 o qual é o quociente entre os volumes úmido e seco de uma mesma massa de agregado. No caso do uso deste agregado no CCR, a areia está em sua máxima condição de inchamento para uma dada faixa de umidade deste concreto.



Para a realização do ensaio de massa específica real dos grãos foi usado o método que prescreve o uso do picnômetro, por o mesmo fornecer resultados com maior precisão. A massa específica foi determinada conforme as normas NBR 9776 (1987) e DNER – ME 194 (1998).

Em paralelo, foi determinada a massa unitária, de acordo com a norma NBR 7251 (1982). Este ensaio é executado através do enchimento, de um recipiente paralelepípedo com volume de 15 litros, sendo que o agregado caía de uma altura de 10 a 12 cm. No caso de agregados com dimensão máxima  $\leq 4,8$  mm, após o enchimento é rasado o topo do recipiente e pesado com o material nele contido.

A massa unitária é a média de três resultados individuais obtidos em pelo menos três determinações, dividindo-se a massa do agregado pelo volume do recipiente utilizado. Este ensaio é muito importante, pois é aplicado no cálculo de índice de vazios, na dosagem volumétrica do agregado ou estimativas de peso ou volume do material nesta condição. Na Tabela 4.3 são mostrados os valores obtidos nestes dois ensaios.

**Tabela 4.3** – Massa específica e massa unitária da areia natural

<b>Massa Específica Real dos Grãos (kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa Unitária (kg/dm<sup>3</sup>)</b>
2,71	1,56

#### **4.1.2 – Cinza Pesada**

A cinza pesada utilizada neste estudo foi coletada nos tanques de decantação números 7 e 8 do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda localizado no município de Capivari de Baixo - SC. A Figura 4.4 mostra o aspecto da cinza pesada usada na pesquisa após secagem em estufa durante 24 horas.

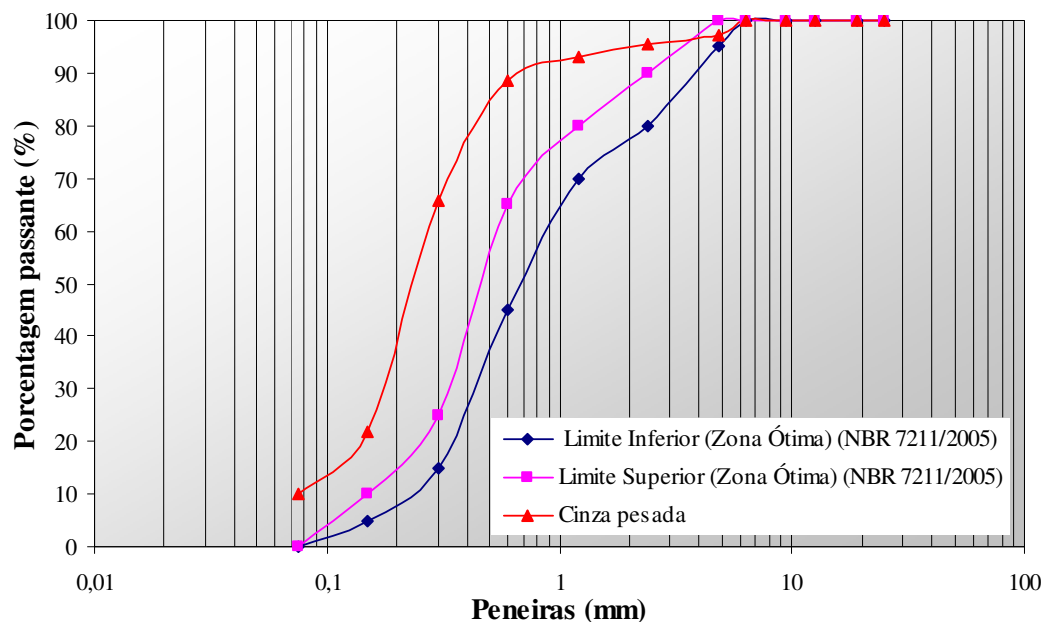


**Figura 4.4** – Cinza pesada após secagem em estufa durante 24 horas

Por não se disponibilizar de norma específica para determinar a granulometria da cinza pesada, foi considerado este subproduto como um agregado miúdo e realizado este ensaio conforme especifica a norma NBR 7211 (2005). Infelizmente, devido à cinza pesada apresentar uma granulometria bem irregular, não se pode classificá-la pelas faixas especificadas por esta norma. Na Tabela 4.4 e Figura 4.5 são mostrados os dados obtidos neste ensaio.

**Tabela 4.4** – Análise granulométrica da cinza pesada

Peneiras (mm)	% Retida			% Retida Acumulada	% Passante	Limites Granulométricos - % Passante (NBR 7211/2005)	
	M1	M2	Média			Limite Inferior (Zona Ótima)	Limite Superior (Zona Ótima)
25	0	0	0	0	100	100	100
19	0	0	0	0	100	100	100
12,5	0	0	0	0	100	100	100
9,5	0,17	0,13	0,15	0	100	100	100
6,3	0,28	0,24	0,26	0	100	100	100
4,8	3,3	2,2	2,75	2,75	97,25	95	100
2,4	1,64	1,68	1,66	4,41	95,59	80	90
1,2	2,6	2,24	2,42	6,83	93,17	70	80
0,6	4,84	4,25	4,55	11,38	88,63	45	65
0,3	23,61	22,37	22,99	34,37	65,64	15	25
0,15	43,24	44,38	43,81	78,18	21,83	5	10
0,075	12,21	11,1	11,66	89,83	10,17	0	0
FUNDO	8,11	11,41	9,76	100,00	0,00	0	0
Dimensão máxima característica (D <sub>máx.</sub> )					2,4mm		
Dimensão mínima característica (D <sub>mín.</sub> )					< 0,075mm		
Módulo de finura					2,28		
Classificação conforme a NBR 7211					Sem classificação		

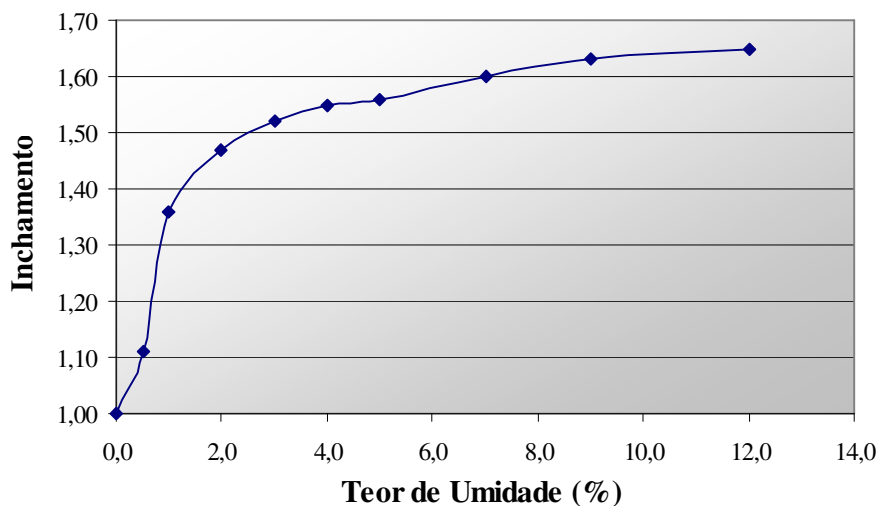


**Figura 4.5** – Curva granulométrica da cinza pesada

Também foi realizado o ensaio de inchamento para esta cinza, conforme estipula as normas NBR 6467 (1987) e DNER – ME 192 (1997). Pode ser visto na Tabela 4.5 e na Figura 4.6 os resultados obtidos neste ensaio para a cinza pesada.

**Tabela 4.5** – Análise do inchamento da cinza pesada

Teor de Umidade (%)	Quantidade de Água a ser Adicionada (ml)	Massa de Agregado Umido (kg)	Coefficiente de Inchamento (i)
0,0	0,00	15,33	1,00
0,5	76,65	13,84	1,11
1,0	76,65	11,38	1,36
2,0	153,30	10,64	1,47
3,0	153,30	10,36	1,52
4,0	153,30	10,28	1,55
5,0	153,30	10,29	1,56
7,0	306,60	10,23	1,6
9,0	306,60	10,23	1,63
12,0	459,60	10,42	1,65
Inchamento/Umidade Crítica			5,97
Coefficiente de Inchamento			1,65



**Figura 4.6** – Curva de inchamento da cinza pesada

Assim como ocorreu para a areia natural, para as faixas de umidade do CCR, a cinza pesada está na sua máxima condição de inchamento.

Observa-se na Tabela 4.5 que a cinza pesada apresentou uma umidade crítica definida como o teor de umidade acima do qual o coeficiente de inchamento pode ser considerado constante e igual ao coeficiente de inchamento médio, com valor de 5,97. O coeficiente de inchamento, que é quociente entre os volumes úmido e seco de uma mesma massa de agregado, foi de 1,65. Isso significa um aumento em relação a areia natural, resultando que quando se trabalhar com os materiais em volume tal constatação se reverte num aumento considerável do volume.

Para a cinza pesada também foram executados os ensaios de massa específica real e massa unitária conforme é estipulado pelas normas NBR 9776 (1987) / DNER - ME 194 (1998) / NBR 7251 (1982), respectivamente. Os valores encontrados são mostrados na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6** – Massa específica e massa unitária da cinza pesada

Massa Específica Real dos Grãos (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa Unitária (kg/dm <sup>3</sup> )
1,91	1,08

Através do resultado obtido para a massa específica da cinza pesada é possível classificá-la como um agregado leve, por apresentar uma massa específica menor que 2,0 kg/dm<sup>3</sup>.

#### 4.1.3 – Agregado Graúdo

Este agregado venho de central da britagem da empresa Saibrita Mineradora, localizada no distrito de Forquilhas, no município de São José – SC. A coleta deste material seguiu os padrões estabelecidos pela norma DNER – PRO 120 (1997).

Para a composição granulométrica do CCR foram usados, agregado 25 mm (1”), agregado 19 mm (¾”), pedrisco e pó de pedra, de tal forma que a curva obtida se enquadrasse dentro das composições granulométricas que são aceitas pelas experiências nacional e internacional.

Primeiramente, foi feita uma análise granulométrica para cada agregado. As Tabelas de 4.7 a 4.10 e a Figura 4.7 mostram os resultados e as curvas granulométricas obtidas para cada agregado.

**Tabela 4.7** – Análise granulométrica do agregado 1” (25 mm)

Peneiras (mm)	% Retida			% Retida Acumulada	% Passante
	M1	M2	Média		
25	0	0	0	0	<b>100</b>
19	67,20	66,09	66,65	66,65	<b>33,36</b>
12,5	32,17	32,97	32,57	99,22	<b>0,78</b>
9,5	0,56	0,852	0,706	99,92	<b>0,08</b>
6,3	0,040	0,039	0,040	99,96	<b>0,04</b>
4,8	0,004	0,000	0,002	99,96	<b>0,04</b>
2,4	0,000	0,009	0,005	99,97	<b>0,03</b>
1,2	0,003	0,003	0,003	99,97	<b>0,03</b>
0,6	0,003	0,005	0,004	99,97	<b>0,03</b>
0,3	0,003	0,005	0,004	99,98	<b>0,02</b>
0,15	0,005	0,013	0,009	99,99	<b>0,01</b>
0,075	0,007	0,009	0,008	100,00	<b>0,005</b>
FUNDO	0,005	0,005	0,005	100,00	<b>0,00</b>
<b>Somatório =</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	-----	-----
Dimensão máxima característica (D <sub>máx.</sub> )				25mm	
Dimensão mínima característica (D <sub>mín.</sub> )				12,5mm	

**Tabela 4.8** – Análise granulométrica do agregado ¾” (19 mm)

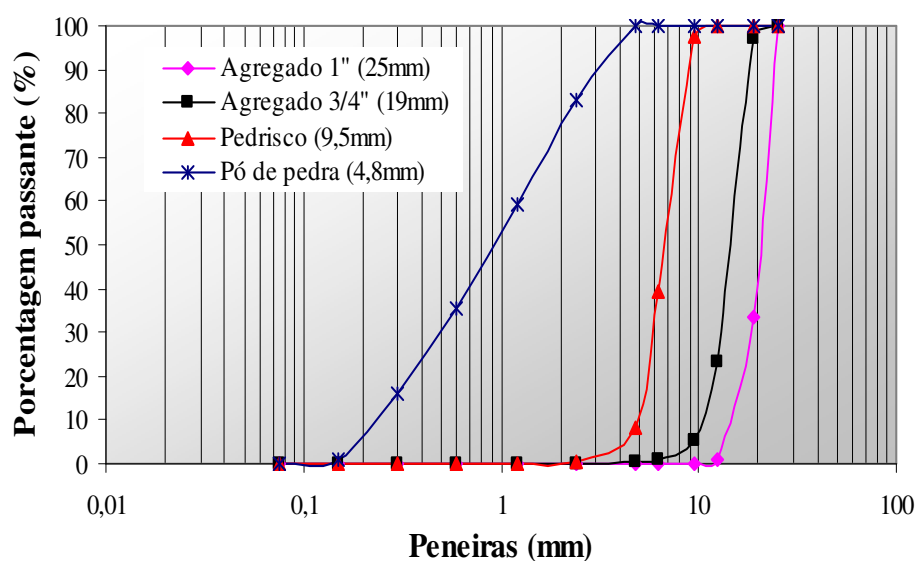
Peneiras (mm)	% Retida			% Retida Acumulada	% Passante
	M1	M2	Média		
25	0	0	0	0	<b>100</b>
19	2,45	3,57	3,01	3,01	<b>96,99</b>
12,5	69,43	77,61	73,52	76,53	<b>23,47</b>
9,5	21,75	14,94	18,35	94,88	<b>5,12</b>
6,3	5,200	3,489	4,345	99,22	<b>0,78</b>
4,8	0,301	0,259	0,28	99,50	<b>0,50</b>
2,4	0,830	0,097	0,464	99,96	<b>0,04</b>
1,2	0,004	0,007	0,006	99,97	<b>0,03</b>
0,6	0,004	0,007	0,006	99,97	<b>0,03</b>
0,3	0,004	0,006	0,005	99,98	<b>0,02</b>
0,15	0,006	0,004	0,005	99,98	<b>0,02</b>
0,075	0,013	0,006	0,010	99,99	<b>0,007</b>
FUNDO	0,010	0,004	0,007	100,00	<b>0,00</b>
<b>Somatório =</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	-----	-----
Dimensão máxima característica (Dmáx.)				19,0mm	
Dimensão mínima característica (Dmin.)				9,5mm	

**Tabela 4.9** – Análise granulométrica do pedrisco (9,5 mm)

Peneiras (mm)	% Retida			% Retida Acumulada	% Passante
	M1	M2	Média		
25	0	0	0	0	<b>100</b>
19	0	0	0	0	<b>100</b>
12,5	0	0	0	0	<b>100</b>
9,5	1,73	2,69	2,21	2,21	<b>97,79</b>
6,3	58,76	58,37	58,57	60,78	<b>39,23</b>
4,8	31,43	30,22	30,83	91,60	<b>8,40</b>
2,4	7,74	8,47	8,11	99,71	<b>0,30</b>
1,2	0,05	0,06	0,06	99,76	<b>0,24</b>
0,6	0,02	0,01	0,02	99,78	<b>0,22</b>
0,3	0,02	0,01	0,02	99,79	<b>0,21</b>
0,15	0,17	0,10	0,14	99,93	<b>0,07</b>
0,075	0,06	0,04	0,05	99,98	<b>0,02</b>
FUNDO	0,02	0,03	0,03	100,00	<b>0,00</b>
<b>Somatório =</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	-----	-----
Dimensão máxima característica (Dmáx.)				9,5mm	
Dimensão mínima característica (Dmin.)				2,4mm	

**Tabela 4.10** – Análise granulométrica do pó de pedra (4,8 mm)

Peneiras (mm)	% Retida			% Retida Acumulada	% Passante
	M1	M2	Média		
25	0	0	0	0	100
19	0	0	0	0	100
12,5	0	0	0	0	100
9,5	0	0	0	0	100
6,3	0	0	0	0	100
4,8	0,19	0,11	0,15	0,15	99,85
2,4	16,81	17,3	17,06	17,21	82,80
1,2	22,76	24,2	23,48	40,69	59,32
0,6	24,28	23,88	24,08	64,77	35,24
0,3	21,13	17,12	19,13	83,89	16,11
0,15	13,74	16,88	15,31	99,20	0,80
0,075	0,97	0,42	0,70	99,90	0,11
FUNDO	0,12	0,09	0,11	100,00	0,00
<b>Somatório =</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	-----	-----
Dimensão máxima característica (D <sub>máx.</sub> )				4,8mm	
Dimensão mínima característica (D <sub>mín.</sub> )				0,15mm	

**Figura 4.7** – Curva granulométrica dos agregados graúdos

A massa específica aparente dos grãos foi determinada conforme a norma NBR 9776 (1987) e DNER – ME 1947 (1998) enquanto que a massa unitária de determinada de acordo com a NBR 7251 (1982).

O ensaio de desgaste a abrasão Los Angeles foi executado conforme está prescrito nas normas NBR 6465 (1984) e DNER – ME 035 (1984), sendo que a carga abrasiva consiste de 12 esferas de aço com aproximadamente 47,6 mm de diâmetro,

com massa individual de cada esfera estava entre 390 e 445g e a massa total de  $\pm 5000$  g e para a execução deste ensaio foi utilizada uma amostra composta pela graduação “B” da norma citada.

Conforme a norma NBR 6465 (1984), o valor do desgaste por abrasão Los Angeles deverá ser menor que 35% em massa do material para, assim, poder-se preservar a granulometria do agregado durante o processo de mistura e compactação do concreto e, posteriormente, garantir as condições de resistência da mistura, especificadas no projeto. Portanto, o agregado graúdo usado neste estudo possui um desgaste por abrasão menor que os 35% estabelecidos pela norma, garantindo plenas condições de seu uso.

Os valores encontrados para estes três índices físicos estão apresentados na tabela 4.11.

**Tabela 4.11** – Ensaio físicos dos agregados graúdos

<b>INDICES FÍSICOS</b>				
Materiais	DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS			
	Massa Específica Real dos Grãos (kg/dm <sup>3</sup> ) - Condição saturado superfície seca (SSS)	Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	Abrasão Los Angeles (%)
Agregado 1" (25mm)	2,66	1,44	0,37	32,04
Agregado 3/4" (19mm)	2,64		0,42	
Pedrisco (9,5 mm)	2,59		1,16	
Pó de pedra (4,8 mm)	2,58		0,19	

#### **4.1.3.1 – Composição Granulométrica**

Após os ensaios de caracterização dos agregados procurou-se desenvolver uma composição granulométrica para a dosagem do CCR e que estivesse compreendida dentro dos intervalos estabelecidos pela experiência nacional e internacional.

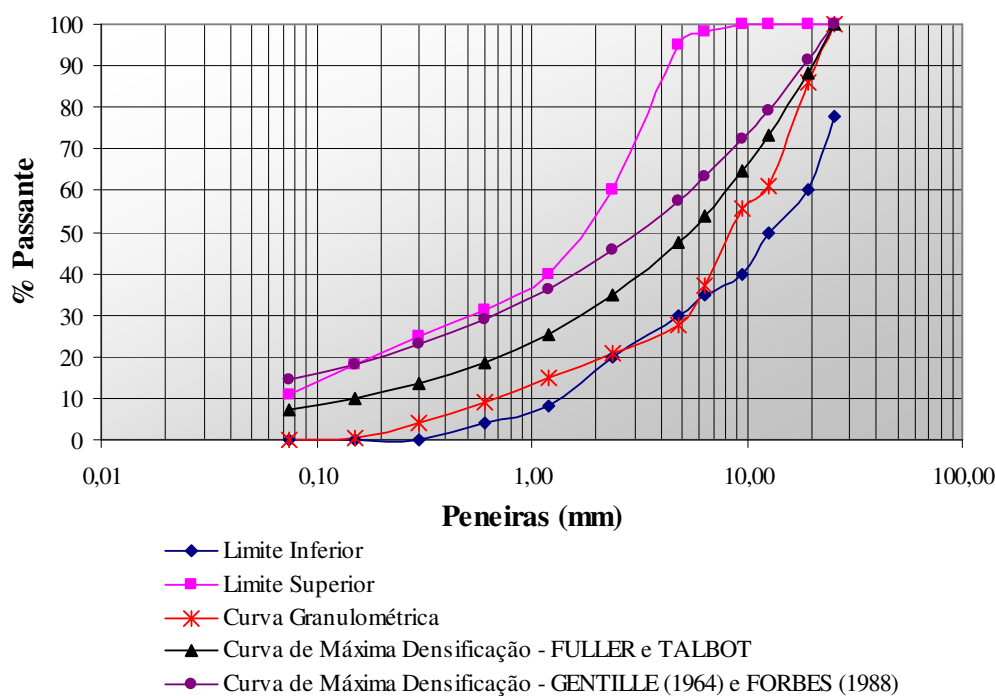
A proporção dos materiais usada para desenvolver a composição granulométrica foi feita por tentativas até conseguir uma curva de referência que estivesse muito perto da média entre os limites recomendados pela experiência nacional/internacional. Na



Tabela 4.12 mostra-se a porcentagem inicialmente usada de agregados para a montagem da curva granulométrica e a Figura 4.8 apresenta a forma desta curva. Nesta figura apresenta-se também a curva de máxima densificação segundo as proposições de Fuller e Talbot para  $n = 0,45$ .

**Tabela 4.12** – Porcentagem de material usado na composição granulométrica do CCR

Composição granulométrica	
Materiais	Porcentagem em massa (%)
Agregado 1" (25mm)	20
Agregado ¾" (19mm)	25
Pedrisco (9,5mm)	30
Pó de Pedra (4,8mm)	25



**Figura 4.8** – Composição granulométrica inicial do CCR

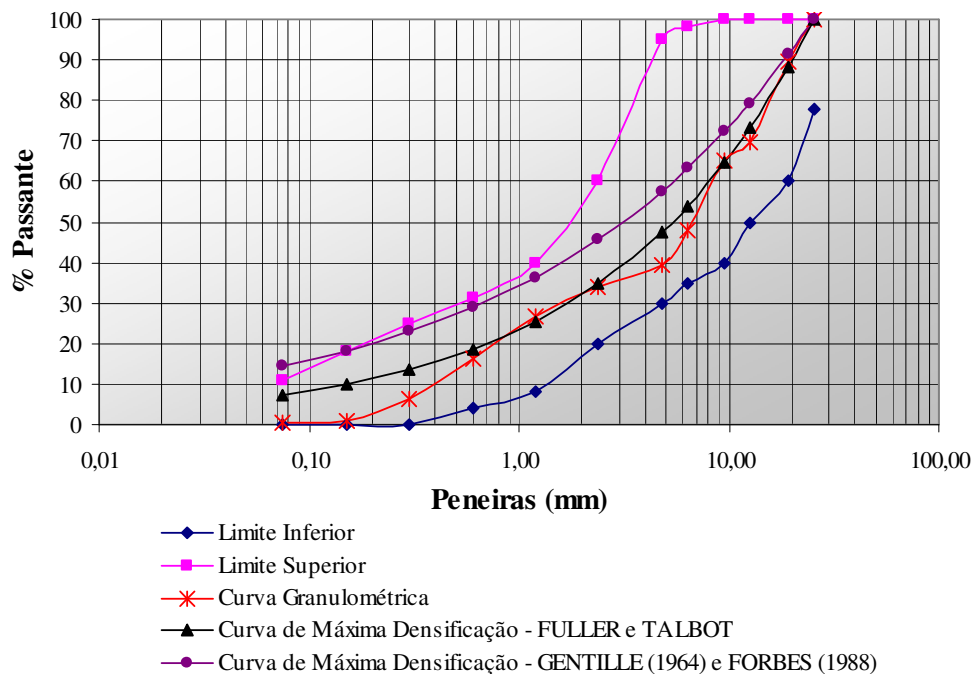
Através da análise da curva apresentada na Figura 4.8 se observa que a granulometria mostrou certa irregularidade na curva a partir da peneira #12,7 mm, indicando uma falta de finos na sua composição, e que a central de britagem não teria condições de prover a quantidade de finos necessária.

Constatado que a curva composta somente pelos agregados mostrados na Tabela 4.12, não atenderia a especificação optou-se em usar areia natural para tentar enquadrar melhor a curva granulométrica.

A Tabela 4.13 apresenta a nova composição dos agregados após a incorporação da areia natural e a Figura 4.9 mostra a forma da granulometria do CCR.

**Tabela 4.13** – Porcentagem de material usado na composição granulométrica do CCR após o incremento da areia natural

Composição granulométrica	
Materiais	Porcentagem em massa (%)
Agregado 1" (25mm)	15
Agregado ¾" (19mm)	20
Pedrisco (9,5mm)	28
Pó de Pedra (4,8mm)	15
Areia Natural (2,4 mm)	22



**Figura 4.9** – Composição granulométrica do CCR após a incorporação da areia natural

Através da análise da Figura 4.9 verificou-se que com a incorporação da areia natural resultou em uma melhora bem significativa da curva granulométrica. Porém, ainda observou-se que para as porcentagens de materiais usadas não se dispunha de uma quantidade ideal de finos na composição granulométrica do CCR, podendo a falta destes finos ocasionar o surgimento de vazios que poderiam vir a afetar a resistência da mistura.

Portanto, houve a necessidade de se adicionar um outro material, que foi denominado de “agregado peneirado”, o qual foi obtido peneirando-se o pó de pedra e formado pelas frações retidas a partir da peneira #1,2 mm.

Na Tabela 4.14 é mostrado as porcentagens usadas de material para formar o “agregado peneirado” e a Tabela 4.15 apresenta as porcentagens para a nova composição granulométrica do CCR. A Figura 4.10 mostra a forma da curva granulométrica do CCR após a incorporação de todos os materiais acima citados. Observa-se, ainda, uma falta de finos na peneira #0,075 mm, mas não se fez mais ajustes.

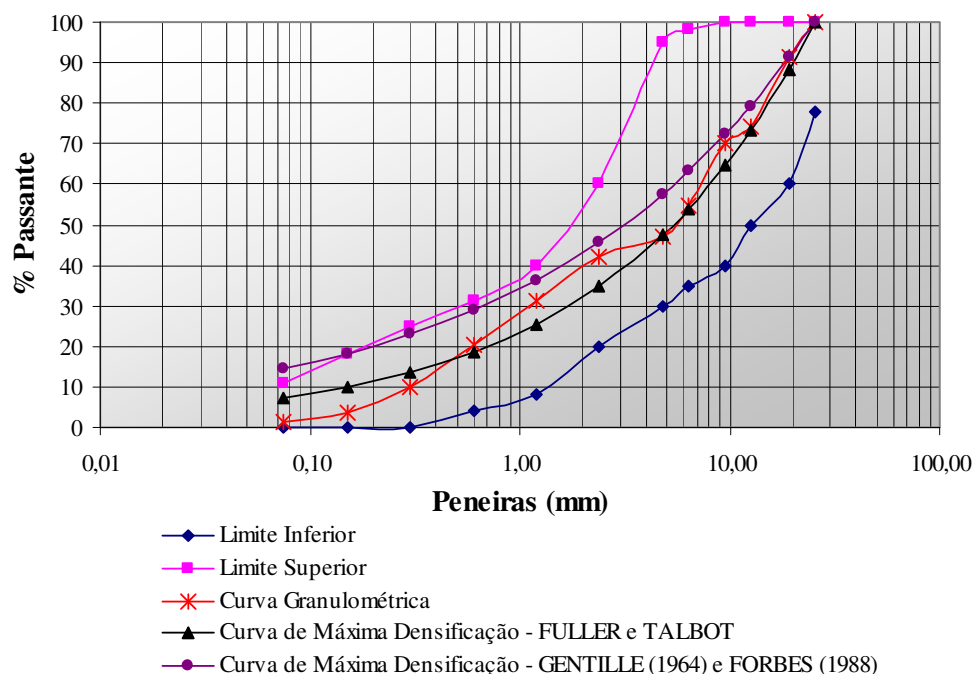
**Tabela 4.14** – Porcentagem de material usado para a composição do agregado peneirado (<2,38mm)

<b>Peneiras (mm)</b>	<b>% de material usado</b>
1,20	44,95
0,60	1,60
0,30	6,60
0,15	14,60
0,075	32,25

**Tabela 4.15** – Porcentagem de material usado na composição granulométrica do CCR após o incremento do agregado peneirado

Composição granulométrica	
Materiais	Porcentagem em massa (%)
Agregado 1" (25mm)	12
Agregado ¾" (19mm)	18
Pedrisco (9,5mm)	25
Pó de Pedra (4,8mm)	15
Agregado peneirado (<2,38 mm)	8
Areia natural (2,4 mm)	22

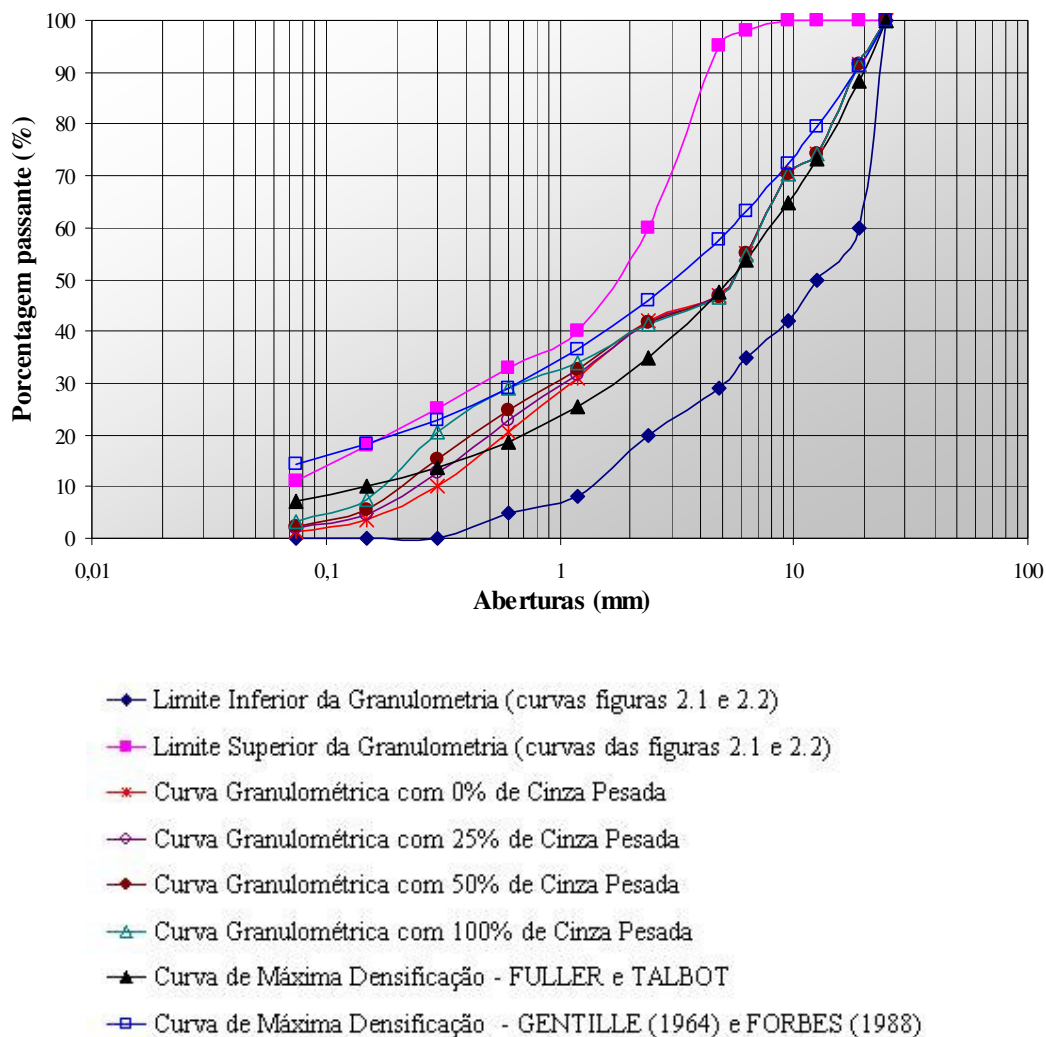
Obs: A areia natural será substituída por diferentes teores de cinza pesada



**Figura 4.10** – Composição granulométrica para o CCR com agregado peneirado

Através da curva apresentada na Figura 4.10 verificou-se que com 8% de agregado peneirado poderia se ter uma boa composição granulométrica. Verificou-se, também que a composição granulométrica final poderia ser formada por 22% de areia natural e esta seria a porcentagem máxima de cinza pesada que poderia ser incorporada na mistura.

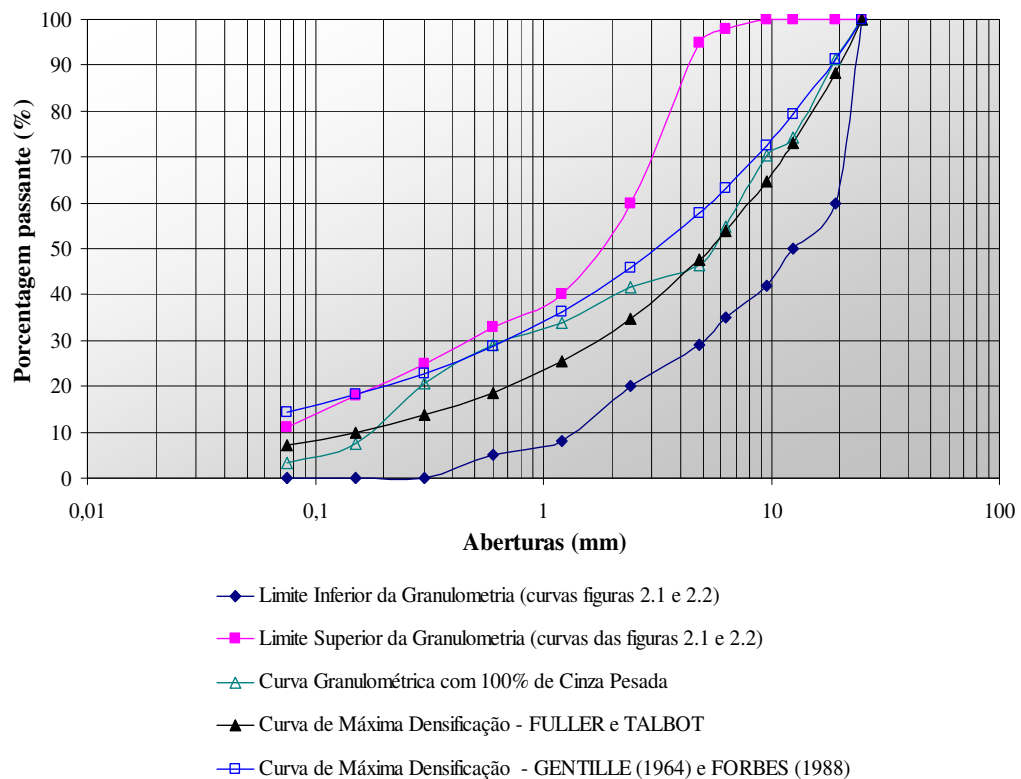
Assim, adotaram-se diferentes teores de cinza pesada, nas proporções de 25%, 50% e 100% em relação aos 22% de areia natural usados na composição granulométrica para a dosagem do CCR. A Figura 4.11 mostra o comportamento da curva granulométrica conforme se substituíam a porcentagem de areia natural pelos teores de cinza pesada citados.



**Figura 4.11** – Comportamento da curva granulométrica com a substituição da areia natural pela cinza pesada

Através da análise das curvas granulométricas mostradas na Figura 4.11 nota-se que, a partir do momento que a cinza pesada é incorporada na mistura, há um aumento da quantidade de material com graduação entre #1,2 mm e #0,15 mm, o que poderia

propiciar um melhor rearranjo dos agregados diminuindo os vazios existentes. Portanto, é de se esperar que isso possa resultar em uma melhor compactidade, aumentando a área superficial e vir influenciar positivamente na resistência final da mistura. Observa-se, também, que a curva granulométrica obtida está próxima das curvas de Fuller e Gentile (1964) e Forbes (1988), as quais caracterizam granulometrias de máxima densificação. A Figura 4.12 mostra a forma da curva granulométrica do CCR quando se substitui a areia natural por 100% de cinza pesada.



**Figura 4.12** – Situação da curva granulométrica após a substituição da areia natural por 100% de cinza pesada

#### 4.1.4 – Cimento

Foi utilizado nesta pesquisa o cimento CP II – Z 32, da marca Votorantin, produzido no município de Rio Branco localizado no estado do Paraná. Os dados de caracterização foram obtidos junto ao fabricante através do suporte técnico de atendimento ao consumidor e são mostrados alguns dados físicos na Tabela 4.16.

**Tabela 4.16** – Caracterização do cimento

Itens de Controle	Valor médio		
	Referentes ao mês de Janeiro/05	Referentes ao mês de Março/05	Referentes ao mês de Abril/05
Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3650	3529	3588
Início de pega (horas)	05:45	04:25	04:44
Fim de pega (horas)	06:54	05:30	05:57
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	2,98	2,95	2,95
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	36,44	36,79	36,17

FONTE: Cimentos Votorantin (2005)

A massa específica do cimento foi determinada de acordo com as prescrições da norma NBR 6474 e consiste basicamente na determinação do volume deslocado por uma massa de cimento conhecida, quando introduzida no frasco volumétrico de L<sup>e</sup> Chatelier. Destaca-se, ainda, que por ser um cimento pozolânico, está incorporado na sua composição em torno de 14% de cinza volante.

#### 4.1.5 – Água

A água utilizada nesta pesquisa foi tratada e fornecida pela Companhia Catarinense de Água e Saneamento – CASAN. A Tabela 4.17 apresenta alguns índices físico-químicos médios da água fornecida a região de abrangência dos laboratórios onde foi desenvolvida esta pesquisa durante os meses de janeiro a março de 2005.

**Tabela 4.17** – Índices físico-químicos da água

MESES DE REFERÊNCIA	REGISTRO DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS					
	pH	Cor	Turbidez	Alumina	Flúor	Cloro Residual
Janeiro/2005	6,47	14,79	4,63	0,50	0,62	1,24
Fevereiro/2005	6,17	9,19	2,73	0,21	0,53	1,70
Março/2005	6,17	9,36	3,13	0,30	0,60	1,47

FONTE: Companhia Catarinense de Água e Saneamento – CASAN (2005)

Em relação aos dados descritos na Tabela 4.16, foi verificado que os mesmos estão dentro dos limites estabelecidos pela Portaria 518 de 2004 do Ministério da Saúde, a qual trata das condições ideais de potabilidade da água para consumo humano.

#### 4.2 – DOSAGEM DO CCR

A dosagem do CCR baseou-se na equação 2.2 do item 2.5, a qual é recomendada por TRICHÊS (1993).

$$Cc = \frac{1000 - V}{\frac{1}{Mec} + \frac{m}{Meag} + \frac{h(1+m)}{100}}$$

A aplicação desta equação para a definição das proporções de cada agregado se dá com a seguinte marcha de cálculo (para CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento e 0,0% de cinza pesada):

**V** = 50 litros (Volume de vazios);

**Mec** = 2,98 kg/m<sup>3</sup> (Massa específica do cimento);

**m** = ? (Quantidade de agregado total por quantidade de cimento: Valor procurado);

**Meag** = 2,63 kg/m<sup>3</sup> (Massa específica ponderada dos agregados, para granulometria);

**h** = 7,00 % (Umidade teórica); e,

OBS: Sempre que mudar o valor da umidade teórica deverá ser recalculado o valor de “m”).

$$80 = \frac{950}{\frac{1}{2,98} + \frac{m}{2,63} + \frac{7,00*(1+m)}{100}}$$

**m = 25,47**

Com o valor de “m” tem-se a seguinte proporção dos agregados para cada 1 kg de cimento:

Agregado 1” (25 mm) = 12% \* 25,47 = 3,06

Agregado ¾” (19 mm) = 18% \* 25,47 = 4,58

Pedrisco = 25% \* 25,47 = 6,37

Pó de pedra = 15% \* 25,47 = 3,82

Agregado peneirado = 8% \* 25,47 = 2,04

Areia natural = 22% \* 25,47 = 5,60



## 4.2 – CURVAS DE COMPACTAÇÃO

Os teores de umidade ótima para cada mistura com seus respectivos consumo de cimento e diferentes teores de cinza pesada foram obtidos através do ensaio de compactação. A homogeneização de cada mistura foi feita com o auxílio de uma betoneira de eixo inclinado, como capacidade de 320 litros.

Para as misturas com cimento, a seqüência de colocação dos materiais na betoneira foi a seguinte:

- 100% das frações do agregado graúdo;
- 80%  $\pm$  10% da água de amassamento;
- 100% do cimento;
- 100% do agregado miúdo; e,
- O restante da água.

O tempo de mistura após a colocação de todas as frações de agregado graúdo foi de 40 a 50 segundos. Também foi adotado este intervalo de tempo após a colocação do cimento, tendo como objetivo a total lubrificação dos grãos dos agregados graúdos. Para finalizar a mistura, foi colocado todo o agregado miúdo e, depois da adição deste material, foi aguardado um tempo médio de 2 minutos para a completa homogeneização da mistura. As Figuras 4.13 e 4.14 ilustram a seqüência adotada para a produção das misturas de CCR.



**Figura 4.13** – Colocação e mistura dos materiais na betoneira de 320 litros



**Figura 4.14** – Colocação da água e período de mistura para produção do CCR

Para a obtenção das curvas de compactação utilizou-se a energia do Proctor Intermediário, sendo a energia aplicada através de um soquete de massa igual a 4,5 kg e altura de queda de 46 cm. A Figura 4.15 mostra os equipamentos e os procedimentos adotados para a produção dos CP's para a obtenção das curvas de compactação, sendo que os CP's foram moldados em 5 camadas com aplicação de 65 golpes em cada camada.



**Figura 4.15** – Equipamentos e procedimentos adotados para produção dos CP's de CCR

A descrição dos equipamentos e procedimentos adotados para a moldagem dos CP's destinados à obtenção da curva de compactação, mostrados na Figura 4.15 são:

**Figura 4.15.1:** Equipamentos necessários para a moldagem dos Cp's (soquete de 4,5 kg, molde cilíndrico 15 x 30 cm, concha, peneira #4,8 mm, desempenho e prolongador do molde);

**Figura 4.15.2:** Lançamento da mistura para dentro do molde de uma altura de 10 a 12 cm com auxílio de concha padronizada de modo a evitar a segregação;

**Figura 4.15.3:** Compactação de camada intermediária com auxílio do soquete de 4,5 kg;

**Figura 4.15.4:** Compactação da camada 5 com auxílio de soquete de 4,5 kg e prolongador de maneira a evitar perda do material e excesso de compactação na camada;

**Figura 4.15.5:** Peneiramento de material sobre a camada 5 através de peneira 4,8 mm;

**Figura 4.15.6:** Acabamento superficial do CP com auxílio de desempeno.

As curvas de compactação foram obtidas com 5 pontos sendo adotadas teores teóricos de umidade (4,0%; 5,50%; 7,0%; 8,50% e 10,0%). Após a compactação, o CP era pesado e se determinava a massa específica aparente úmida. As umidades de moldagem eram determinadas em estufa.

Para facilitar o entendimento, foi adotada para as misturas a mesma nomenclatura citada na Tabela 3.1 e as Figuras de 4.16 a 4.19 mostram as curvas de compactação obtidas neste ensaio, sendo que os resultados obtidos neste ensaio estão nas Tabelas de A6 a A8 dos anexos.

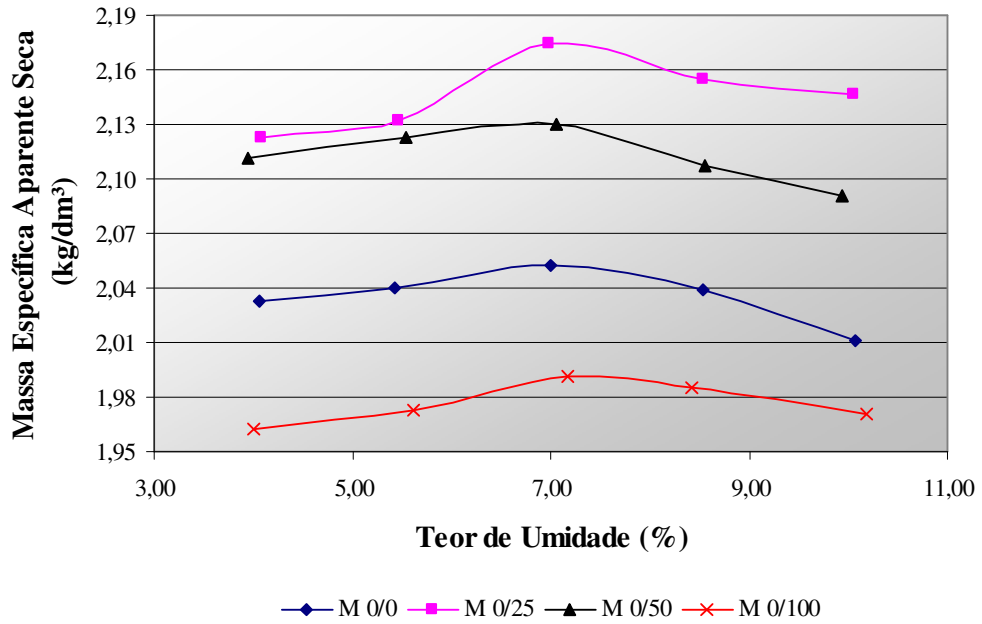


Figura 4.16 – Curva de compactação da mistura sem cimento

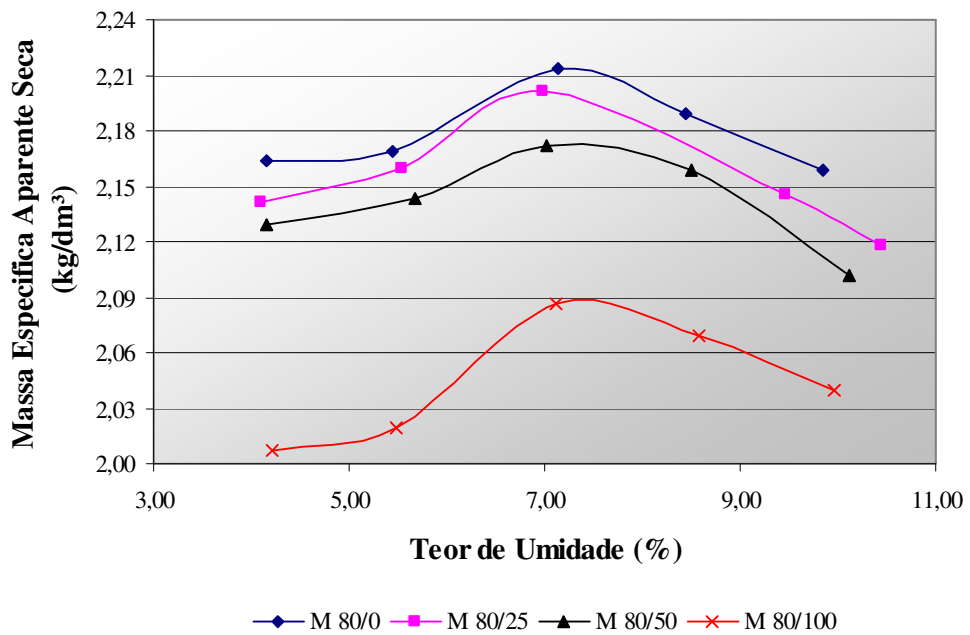
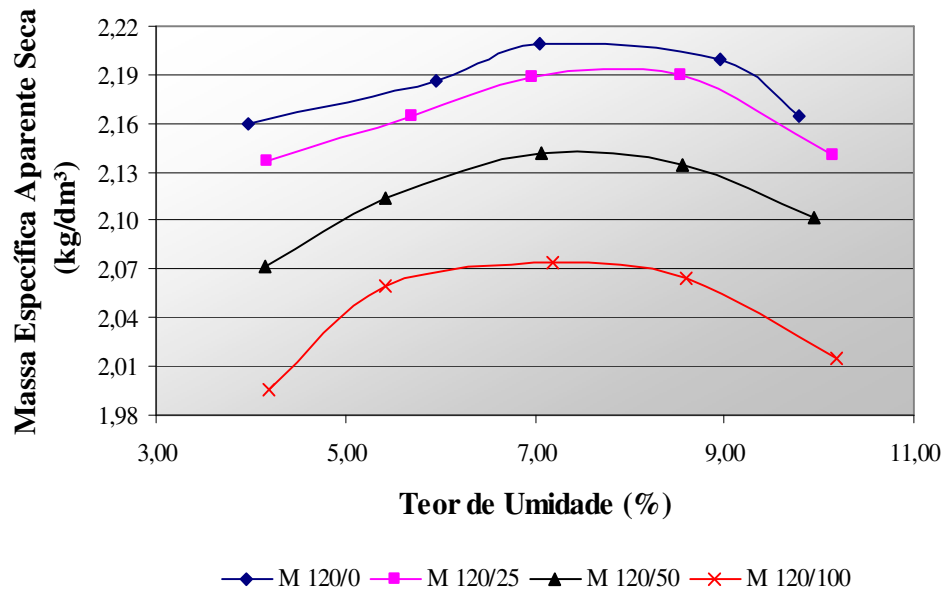
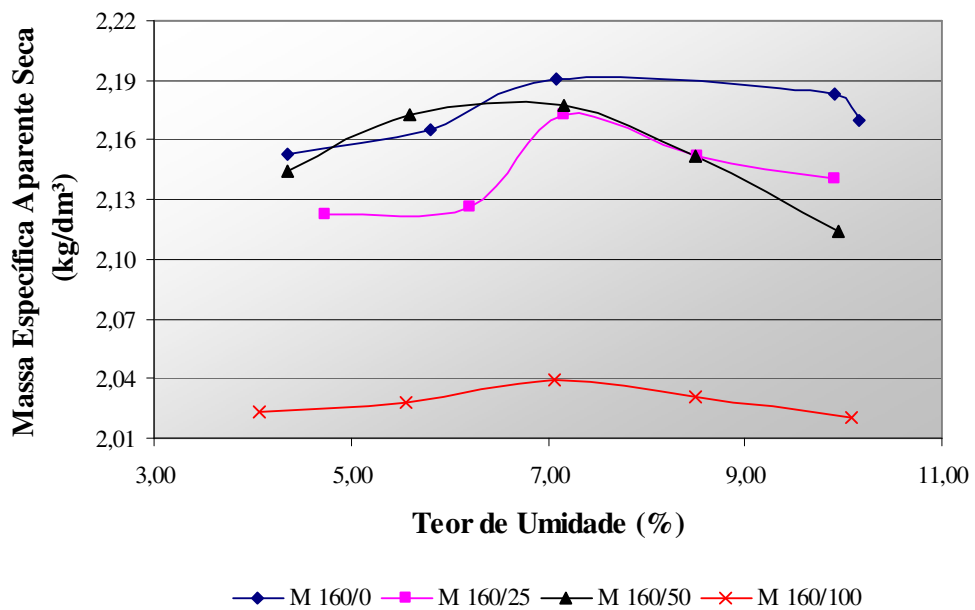


Figura 4.17 – Curva de compactação do CCR com 80 kg/m³ de cimento



**Figura 4.18** – Curva de compactação do CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento



**Figura 4.19** – Curva de compactação do CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento

A Tabela 4.18 mostra os resultados encontrados para a MEAS e umidade ótima durante a realização do ensaio de compactação.

**Tabela 4.18** – Umidade ótima e massa específica aparente seca máxima do CCR

Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de Cinza Pesada (%) Usado em Substituição a Areia Natural							
	0		25		50		100	
	h <sub>ótimo</sub> (%)	MEAS (kg/dm <sup>3</sup> )	h <sub>ótimo</sub> (%)	MEAS (kg/dm <sup>3</sup> )	h <sub>ótimo</sub> (%)	MEAS (kg/dm <sup>3</sup> )	h <sub>ótimo</sub> (%)	MEAS (kg/dm <sup>3</sup> )
0	6,99	2,05	6,98	2,17	7,05	2,13	7,16	1,99
80	7,14	2,21	6,98	2,20	7,03	2,17	7,12	2,09
120	7,05	2,21	6,98	2,19	7,06	2,14	7,18	2,07
160	7,08	2,19	7,16	2,17	7,16	2,18	7,06	2,04

Da análise das curvas compactação é possível verificar que a substituição de 25 a 50% da areia natural pela cinza pesada proporciona na mistura sem cimento um aumento na MEAS, embora a cinza pesada possua uma massa específica 42% menor que a da areia natural. Isto, provavelmente, ocorre porque a incorporação da cinza pesada melhora a granulometria da mistura, fornecendo mais finos para preencher os vazios intergranulares, aumentando com isso a densidade do conjunto. Para teores maiores de cinza, a melhora na granulometria não é suficiente para contrabalançar a queda na massa específica da mistura propiciada pela adição de uma maior quantidade deste subproduto, o que era esperado.

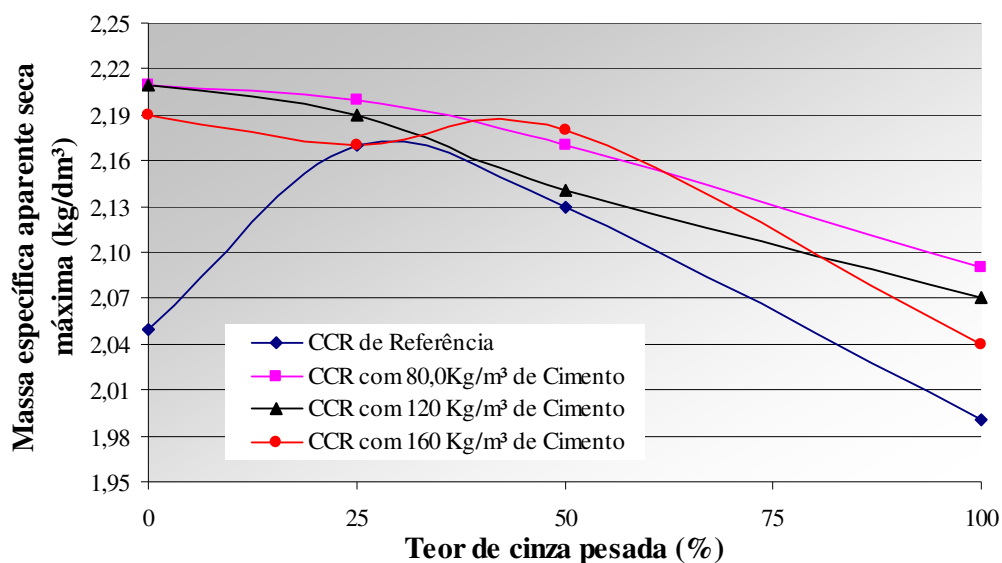
Para as misturas com cimento, há uma tendência de nas misturas onde houve a substituição de 25% da areia natural pela cinza pesada, a MEAS permaneceu no mesmo patamar que a mistura de referência. Como era de se esperar, para as misturas com maior porcentagem de cinza pesada, a MEAS diminuiu.

Em relação à umidade ótima de compactação, com a substituição da areia natural pela cinza pesada era de se esperar uma redução na umidade ótima. A causa para tal comportamento estaria associada ao fato de que a cinza pesada, por apresentar um granulometria mais arredondada que a areia natural, atua como um "lubrificante", o que facilitaria a aproximação das partículas reduzindo a quantidade de água necessária para alcançar à máxima densificação para dada energia de compactação.

Entretanto, isto nem sempre se observou nas diversas curvas, com evidência como nas misturas com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento. Em relação à umidade ótima na mistura com adição de cimento é notado que, a adição da cinza pesada provoca a redução da umidade ótima de compactação em relação à mistura sem cimento. Isto acontece porque

o cimento juntamente com a cinza pesada, formam uma pasta que facilita a aproximação dos agregados, ocasionando a redução da quantidade de água para alcançar o MEASmáx.

Na Figura 4.20 é mostrada a região de máxima densificação das misturas de CCR de referência e das misturas com 80, 120 e 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento.



**Figura 4.20** – Massa específica aparente seca máxima do CCR para os teores de cinza pesada adotados

Como após realização do ensaio de compactação foi disponibilizado aos valores de umidade ótima para as misturas, portanto, foi possível fazer a dosagem final para todos os materiais que seriam usados na moldagem dos CP's destinados aos ensaios mecânicos. A Tabela 4.19 mostra o traço adotado para cada mistura de CCR.

**Tabela 4.19** – Traço adotado para as misturas do CCR

TEOR DE CIMENTO (Kg/m <sup>3</sup> )	TEOR DE CINZA PESADA (%)	MATERIAIS							
		Cimento	Agregado 1" (25 mm)	Agregado 3/4" (19 mm)	Pedrisco (9,5 mm)	Pó de pedra (4,8 mm)	Agregado Peneirado (<2,38mm)	Areia Natural (2,4 mm)	Cinza pesada (< 2,4 mm)
80,00	0,0	1,00	3,05	4,57	6,35	3,81	2,03	5,59	0,00
	25	1,00	3,01	4,51	6,27	3,76	2,01	4,14	1,38
	50	1,00	2,97	4,45	6,18	3,71	1,98	2,72	2,72
	100	1,00	2,88	4,32	6,00	3,60	1,92	0,00	5,28
120,00	0,0	1,00	2,00	3,00	4,17	2,50	1,33	3,67	0,00
	25	1,00	1,97	2,96	4,11	2,46	1,31	2,71	0,90
	50	1,00	1,94	2,91	4,04	2,43	1,29	1,78	1,78
	100	1,00	1,90	2,85	3,96	2,37	1,27	0,00	3,48
160,00	0,0	1,00	1,47	2,21	3,07	1,84	0,98	2,70	0,00
	25	1,00	1,44	2,17	3,01	1,81	0,96	1,99	0,66
	50	1,00	1,43	2,14	2,97	1,78	0,95	1,31	1,31
	100	1,00	1,39	2,09	2,90	1,74	0,93	0,00	2,55

### 4.3 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Para a realização deste ensaio foram moldados 03 CP's para cada teor de cinza pesada usado nas misturas com 80, 120 e 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento. O procedimento de moldagem seguiu a mesma metodologia adotada para o ensaio de compactação, sendo que os CP's foram compactados na umidade ótima de compactação de cada mistura.

A resistência à compressão foi avaliada nas idades de 07, 14, 28 e 90 dias. A cura dos CP's foi realizada em câmara úmida (95% de umidade relativa e temperatura em torno de  $23 \pm 3$  °C). no dia da ruptura cada CP recebeu um capeamento em ambas as faces com pasta formada por cimento e enxofre (traço 1:4).

Este ensaio foi realizado conforme específica a norma NBR 5739/80 e os CP's ao serem submetidos ao ensaio de resistência à compressão o carregamento utilizado foi contínuo e sem choques, com velocidade entre 0,3 e 0,8 Mpa/segundo.

A Figura 4.21 ilustra o procedimento adotado para a realização do capeamento e do ensaio de resistência à compressão dos CP's de CCR.



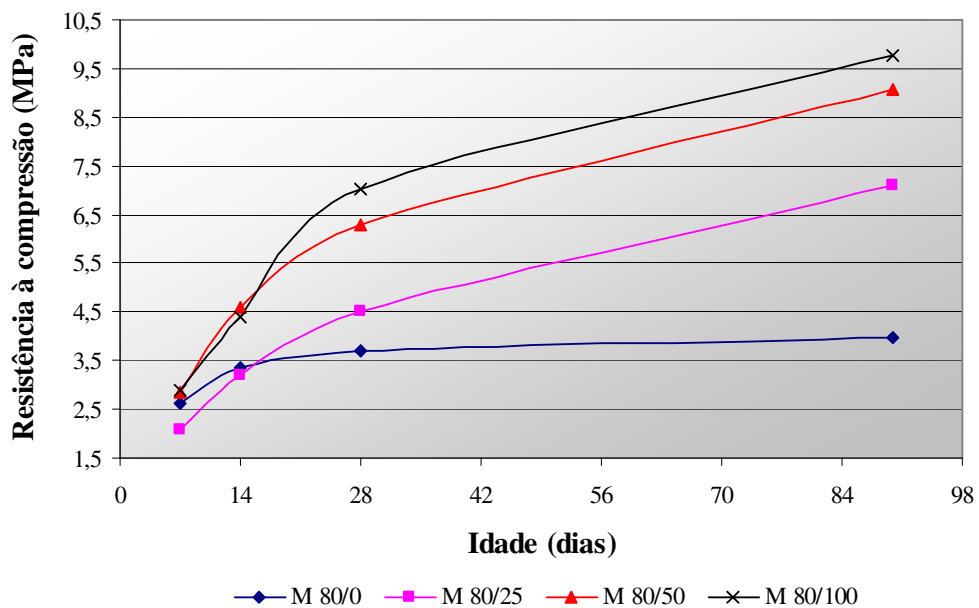


**Figura 4.21** – Procedimento adotado para a realização do capeamento e ensaio de resistência à compressão simples dos CP's de CCR

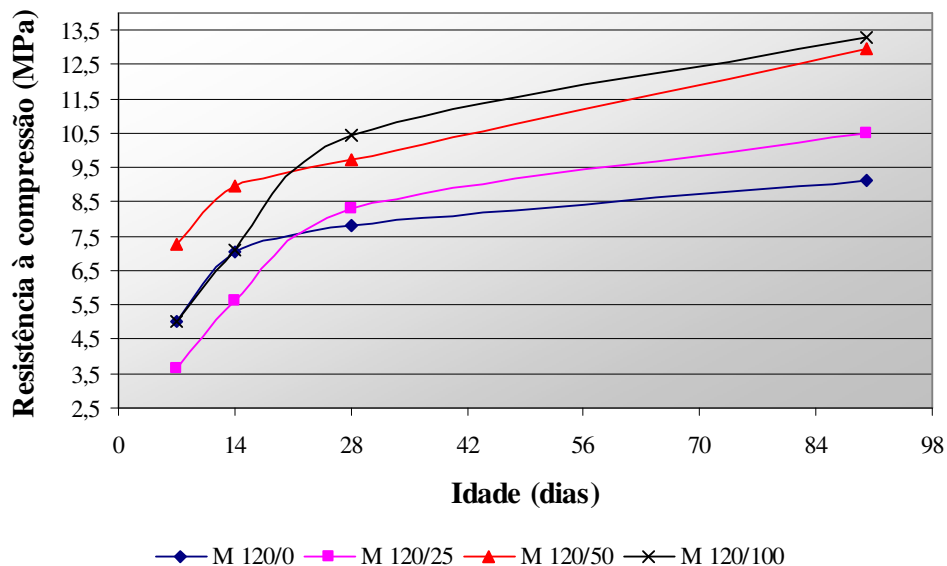
A Tabela 4.20 apresenta os resultados de resistência à compressão simples para as diferentes misturas e tempos de cura enquanto que as Figuras de 4.22 a 4.24 mostram a evolução da resistência com o tempo de cura.

**Tabela 4.20** – Resistência à compressão simples (MPa) das diferentes misturas de CCR com o decorrer do tempo

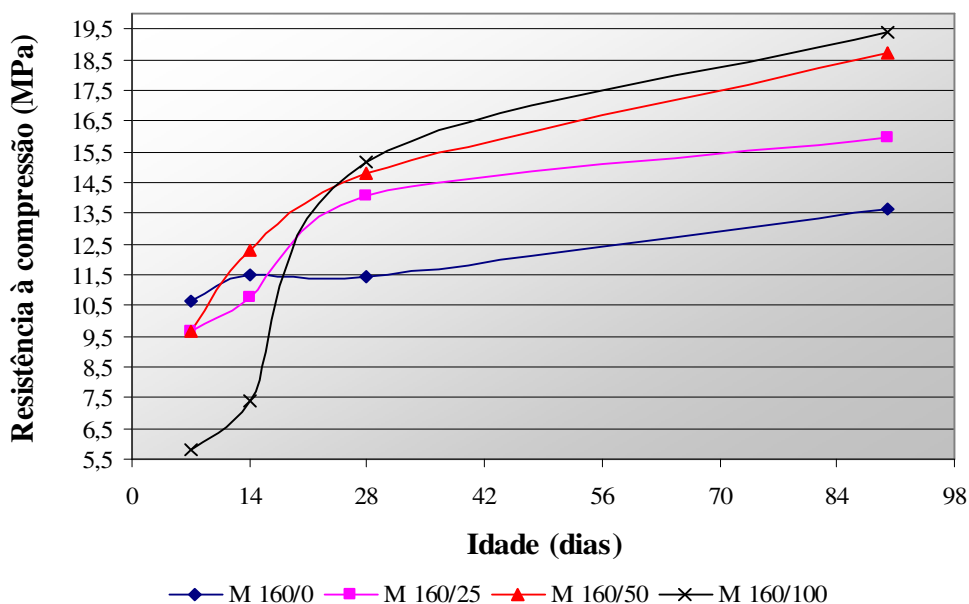
Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de Cinza Pesada (%)	Tempo de Cura (dias)			
		7	14	28	90
80	0	2,63	3,35	3,71	3,96
	25	2,07	3,21	4,52	7,10
	50	2,87	4,58	6,29	9,07
	100	2,89	4,40	7,03	9,77
120	0	5,00	7,06	7,80	9,10
	25	3,65	5,64	8,30	10,52
	50	7,26	8,95	9,73	12,97
	100	5,02	7,09	10,46	13,31
160	0	10,62	11,51	11,65	13,65
	25	9,65	10,76	14,05	15,96
	50	9,66	12,26	14,81	18,73
	100	5,80	7,39	15,20	17,68



**Figura 4.22** – Resistência à compressão do CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento



**Figura 4.23** – Resistência à compressão do CCR com 120 Kg/m<sup>3</sup> de cimento



**Figura 4.24** – Resistência à compressão do CCR com 160 Kg/m<sup>3</sup> de cimento

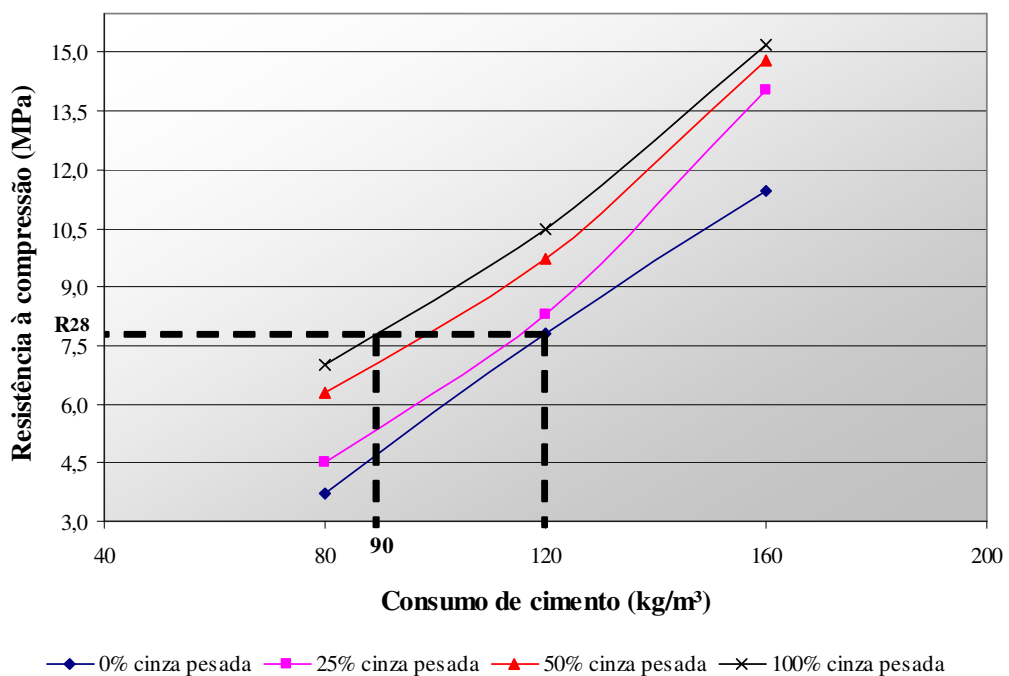
De maneira geral, se observou que nas primeiras idades (7 a 14 dias) a adição da cinza pesada resultava em uma resistência à compressão simples próxima dos valores encontrados para as misturas de referência (sem cinza pesada). No entanto, para idades maiores, como aos 90 dias, se observou que nas misturas com 80 e 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento ocorreu um aumento da resistência à medida que iria se substituindo a areia natural pela cinza pesada, chegando a valores de 146% e 46%, respectivamente,

superiores que nas misturas de referência. No caso da mistura com  $160 \text{ kg/m}^3$  de cimento, o acréscimo notado foi menor chegando a 29,50%.

É evidente que a adição da cinza pesada aumenta a resistência à compressão de todas as misturas, mesmo quando a massa específica é menor que a da mistura sem adição de cinza pesada, como, por exemplo, ocorreu com as misturas onde a cinza pesada substituiu 100% da areia natural.

A explicação para tal comportamento decorre, provavelmente, de a cinza pesada produzida no complexo Termelétrico Jorge Lacerda desenvolver atividade pozolânica, o que propicia um aumento da resistência das misturas de CCR com cinza pesada para idades mais avançadas (acima de 28 dias) conforme constatou *CHERIAF et al (1999)*.

A Figura 4.25 mostra que se for fixada uma resistência à compressão aos 28 dias ( $R_{28}$ ) para um consumo de  $120 \text{ kg/m}^3$  de cimento e sem adição de cinza pesada, esta mesma resistência poderá ser encontrada para um consumo aproximado de  $90 \text{ kg/m}^3$  de cimento e substituição de 100% da areia natural pela cinza pesada.



**Figura 4.25** – Resistência à compressão do CCR aos 28 dias em função do consumo de cimento e teor de cinza pesada usado

De modo a aproveitar os CP's cilíndricos usados para determinar a resistência à compressão, foi realizado antes deste ensaio e para as mesmas idades, a avaliação da propagação da velocidade dos pulsos de ultra-som. No item 4.6 serão mostrados os resultados obtidos nesta análise.

#### 4.4 – MÓDULO DE ELASTICIDADE

Para a determinação do módulo de elasticidade foram moldados 3 CP's nas condições ótimas de cada mistura conforme apresentado na Tabela 4.17. As idades adotadas para a realização deste ensaio foram aos 28 e 90 dias e com cura feita em câmara úmida. A Figura 4.26 ilustra a execução do ensaio.



**Figura 4.26** – Seqüência adotada na execução do ensaio de módulo de elasticidade

O ensaio especificado pela norma NBR 8522 (1984) recomenda que o módulo de elasticidade do concreto convencional calculado pelo módulo tangente inicial ou módulo de elasticidade, o qual leva em consideração as tensões e deformações iniciais do concreto. O valor do módulo de elasticidade do concreto convencional é calculado através da equação 4.1:

$$E = [30\% \sigma_{\text{última}} - 0,5 \text{ MPa}] / [30\% \epsilon\gamma_{\text{última}} - \epsilon (0,5\text{MPa})] \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde:

$\sigma_{\text{última}}$  = tensão última em MPa; e,

$\epsilon\gamma_{\text{última}}$  = deformação específica última, em mm/mm.

Porém, o CCR é um concreto que possui um menor consumo de cimento se comparado com concretos convencionais, resultando em tensões e deformações iniciais bem menores. Portanto, a utilização da Equação 4.1 para o cálculo do módulo de elasticidade no CCR pode levar a dados representativos de módulo de elasticidade secantes com níveis elevados de tensão e não necessariamente a níveis de tensões e deformações iniciais. Sendo assim, necessita-se modificar esta expressão para níveis mais baixos de tensão, como sugerido na Equação 4.2.

$$E = [30\% \sigma_{\text{última}} - 0,1 \text{ Mpa}] / [30\% \epsilon\gamma_{\text{última}} - \epsilon (0,1\text{MPa})] \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde:

$\sigma_{\text{última}}$  = tensão última, em MPa; e,

$\epsilon\gamma_{\text{última}}$  = deformação específica última, em mm/mm.

Ressalta-se que esta equação foi proposta tendo como base a observação do formato das curvas tensão-deformação obtidas.

Para a execução deste ensaio foi usada à mesma prensa utilizada para a realização do ensaio de resistência à compressão simples, sendo que para medir a deformação dos CP's foi utilizado um par de LVDT e através da Equação 4.2 foi determinado o módulo de elasticidade. O valor apresentado refere-se a uma média obtida de três resultados individuais.

Como estes CP's foram submetidos a carregamento até a ruptura, foi possível obter a resistência à compressão simples dos mesmos, conforme é mostrado na Tabela 4.21.

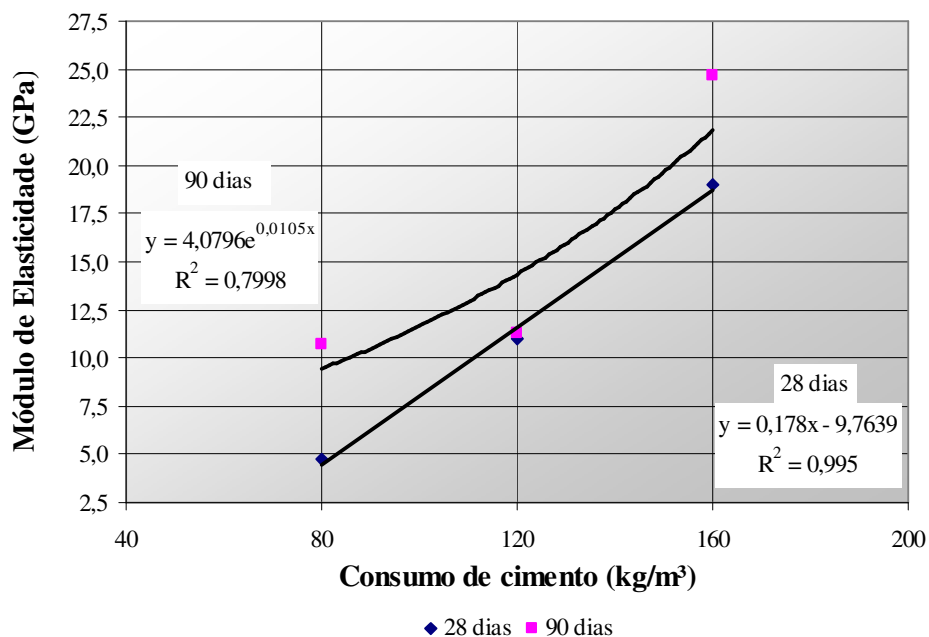
**Tabela 4.21** - Resistência à compressão simples e módulo de elasticidade aos 28 e 90 dias obtida nos CP's usados no ensaio de módulo de elasticidade

Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de cinza pesada (%)	Idade (dias)			
		28		90	
		Resistência à compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
80	0	4,07	4,77	5,23	4,90
	25	4,72	10,66	8,51	10,66
	50	6,24	11,48	9,90	12,54
	100	7,03	11,58	10,10	14,10
120	0	7,72	11,02	8,65	13,41
	25	8,24	11,27	11,59	13,84
	50	9,49	13,01	12,72	14,47
	100	10,54	12,96	13,30	14,72
160	0	11,79	19,01	13,87	21,85
	25	11,06	24,66	14,53	27,72
	50	14,40	20,60	15,22	26,95
	100	14,74	19,24	15,21	21,84

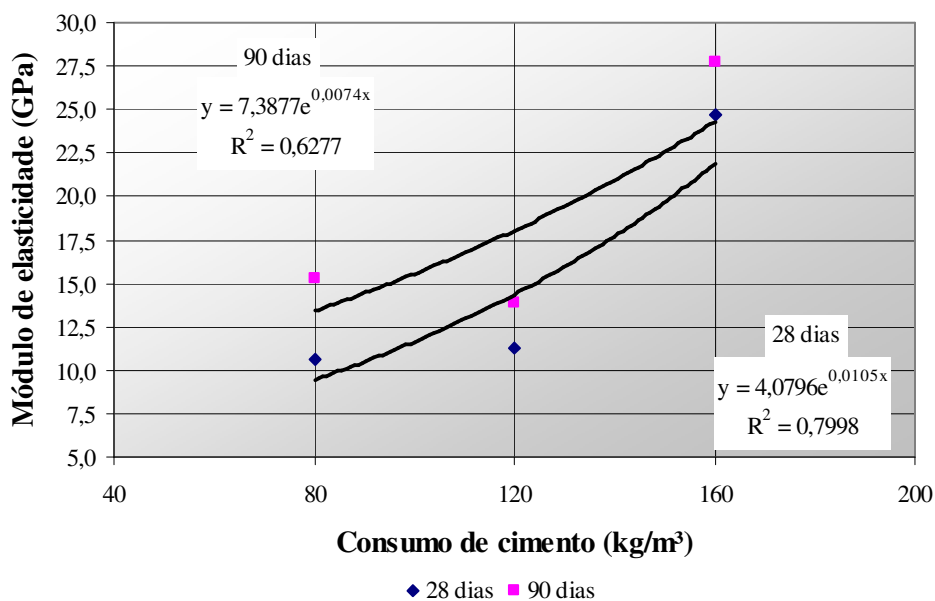
No geral, a cinza pesada resultou no aumento do módulo de elasticidade das misturas, exceto em algumas misturas em particular, quando comparada com a mistura de referência devido a cinza pesada possuir uma granulometria bem fina e agir diretamente no rearranjo dos agregados e na diminuição dos espaços vazios.

Para a mistura com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento a adição da cinza pesada aumentou de forma significativa a rigidez das misturas. No caso das misturas com maior consumo de cimento, como 120 e 160 kg/m<sup>3</sup>, a cinza pesada agiu, de maneira que, a rigidez das misturas acabou adquirindo um comportamento mais estável o que causa a melhor absorção e distribuição das deformações para as camadas inferiores, porém, resultando uma maior resistência e durabilidade da mistura.

As Figuras de 4.27 a 4.30 mostram o comportamento do módulo de elasticidade em função do consumo de cimento para as misturas nas idades de 28 e 90 dias. Nelas observa-se que a cinza pesada propicia um aumento na rigidez com o tempo de cura, devido a sua atividade pozolânica.

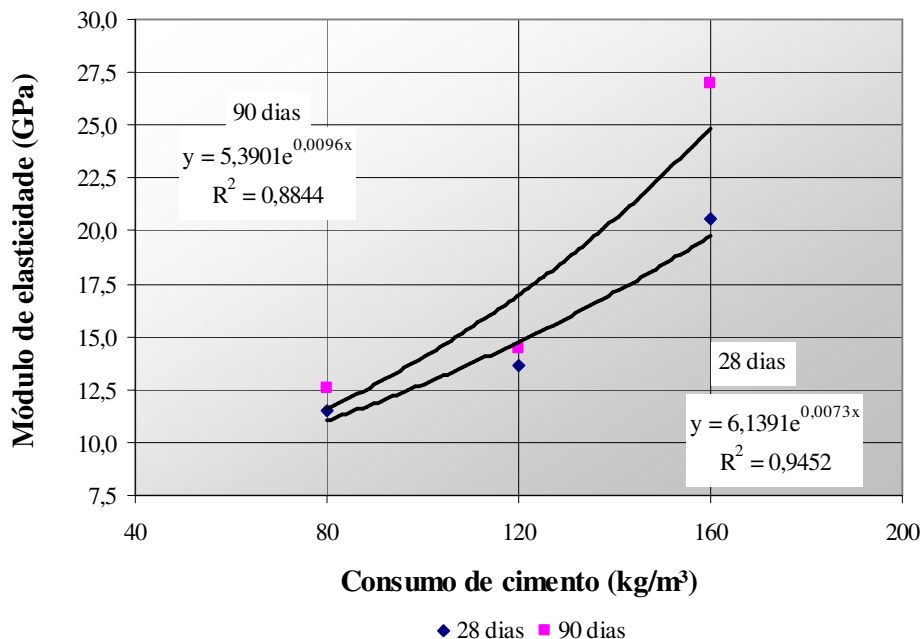


**Figura 4.27** – Módulo de elasticidade em função do consumo de cimento para o CCR de referência

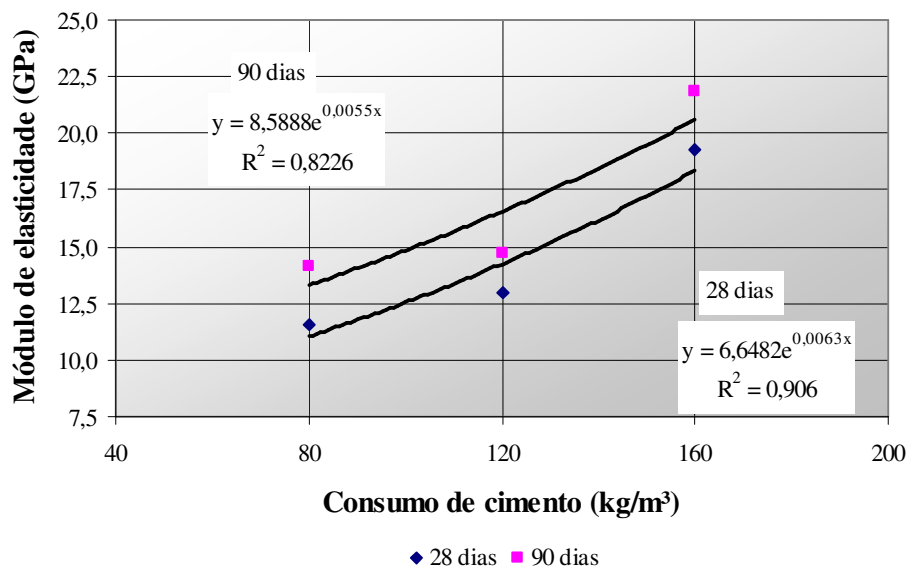


**Figura 4.28** – Módulo de elasticidade em função do consumo de cimento para o CCR com 25% de cinza pesada





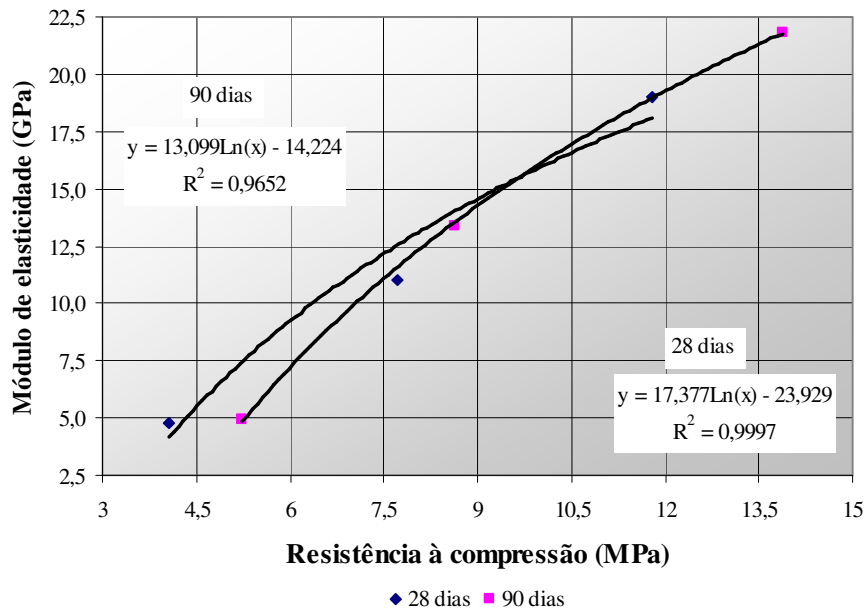
**Figura 4.29** – Módulo de deformação em função do consumo de cimento para o CCR com 50% de cinza pesada



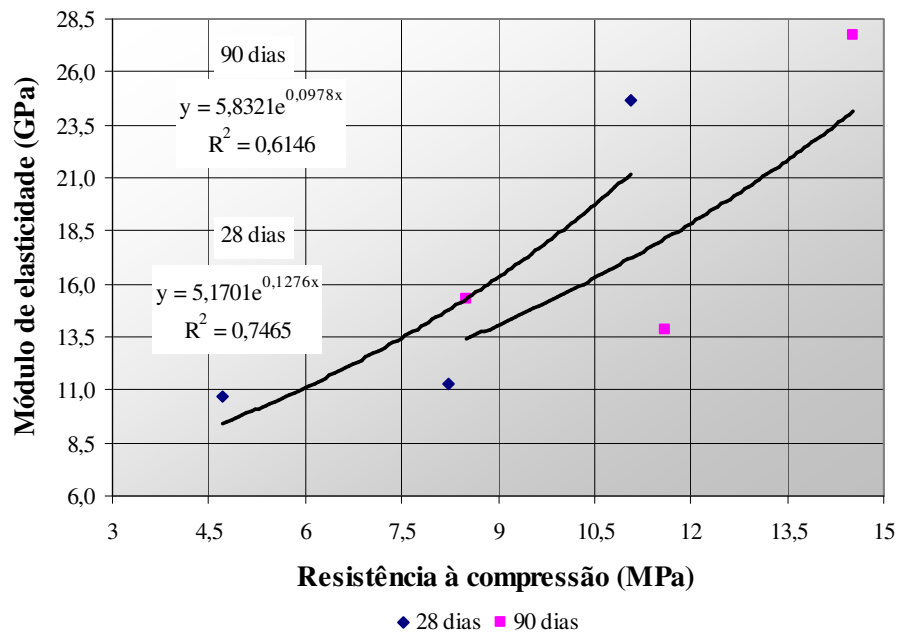
**Figura 4.30** – Módulo de deformação em função do consumo de cimento para o CCR com 100% de cinza pesada

Devido à dificuldade de realização do ensaio de módulo de elasticidade, principalmente, em função da demanda de equipamentos em laboratórios de campo, é muito interessante prever o valor desta propriedade em função da resistência à

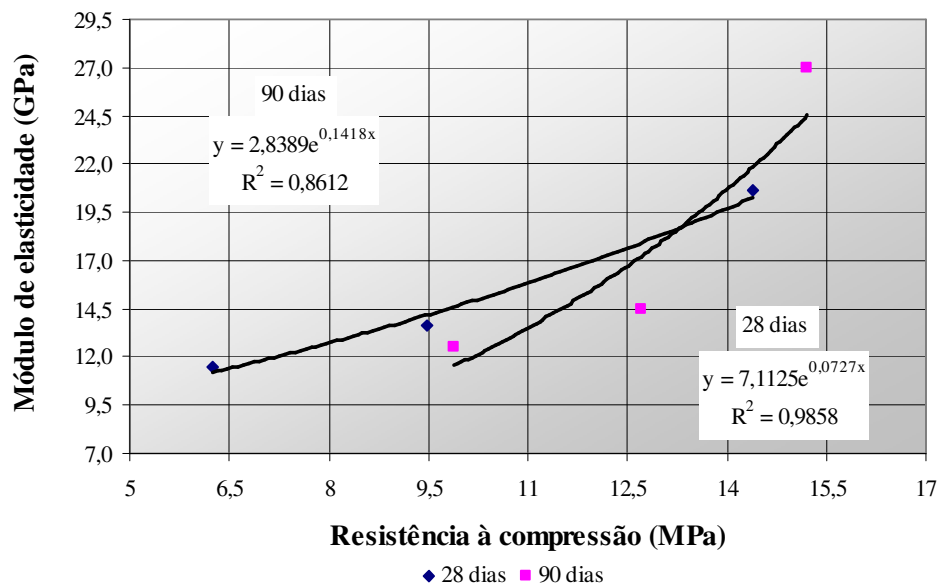
compressão. Portanto, as Figuras de 4.31 a 4.34 apresentam uma relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão em função do consumo de cimento adotado para as misturas de CCR e seus respectivos teores de cinza pesada, nas idades de 28 e 90 dias.



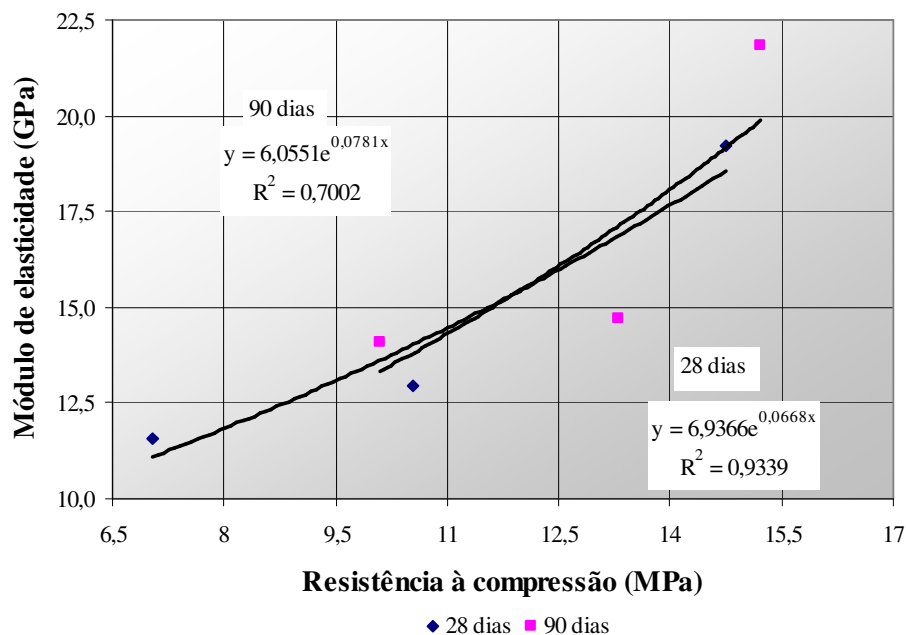
**Figura 4.31** – Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão para a mistura de referência



**Figura 4.32** – Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão para a mistura com substituição de 25% da areia natural por cinza pesada



**Figura 4.33** – Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão para a mistura com substituição de 50% da areia natural por cinza pesada



**Figura 4.34** – Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão para a mistura com substituição de 100% da areia natural por cinza pesada

Da análise das Figuras de 4.31 a 4.34, observa-se que para valores de resistência entre 9 e 13 MPa (correspondente ao consumo de cimento de 120 kg/m<sup>3</sup>) a cinza pesada no CCR reduz, de maneira moderada, a rigidez da mistura em relação à mistura de

referência, ou seja, um CCR com cinza pesada é menos rígido que um CCR convencional, porém com o mesmo nível de resistência. Esta é uma constatação muito positiva, pois significa que o CCR com cinza pesada tem uma maior capacidade de deformação, o que é benéfico para o desempenho desta camada em campo.

#### **4.5 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO**

A resistência à tração na flexão das misturas de CCR foi realizada em CP's prismáticos de 15 x 15 x 50 cm. Devido a grande quantidade de misturas estudadas, procurou-se adotar para cada consumo de cimento a porcentagem de cinza pesada que resultasse na maior resistência à compressão simples.

Portanto, para o CCR com 80 e 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento utilizou-se as misturas M 80/100 e M 120/100. Já para o CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento, a mistura adotada foi a M 160/50.

Os CP's prismáticos usados para a determinação da resistência à tração na flexão foram moldados nas condições de umidade ótima conforme dados apresentados na Tabela 4.17, sendo cada CP moldado em 2 camadas compactadas na energia do Proctor intermediário, sendo que cada camada recebeu 345 golpes através do mesmo soquete usado na compactação dos Cp's cilíndricos.

A resistência à tração na flexão das misturas foi realizada na idade de 28 e 90 dias, sendo que para cada idade foram moldados 3 CP's e curados em câmara úmida com umidade relativa de 95% e temperatura em torno de  $23 \pm 3$  °C.

A execução do ensaio de resistência à tração na flexão obedeceu aos requisitos estipulados pela norma NBR 12142 (1994). A Tabela 4.22 mostra os resultados encontrados para esta propriedade. A Figura 4.35 ilustra a seqüência de execução deste ensaio.

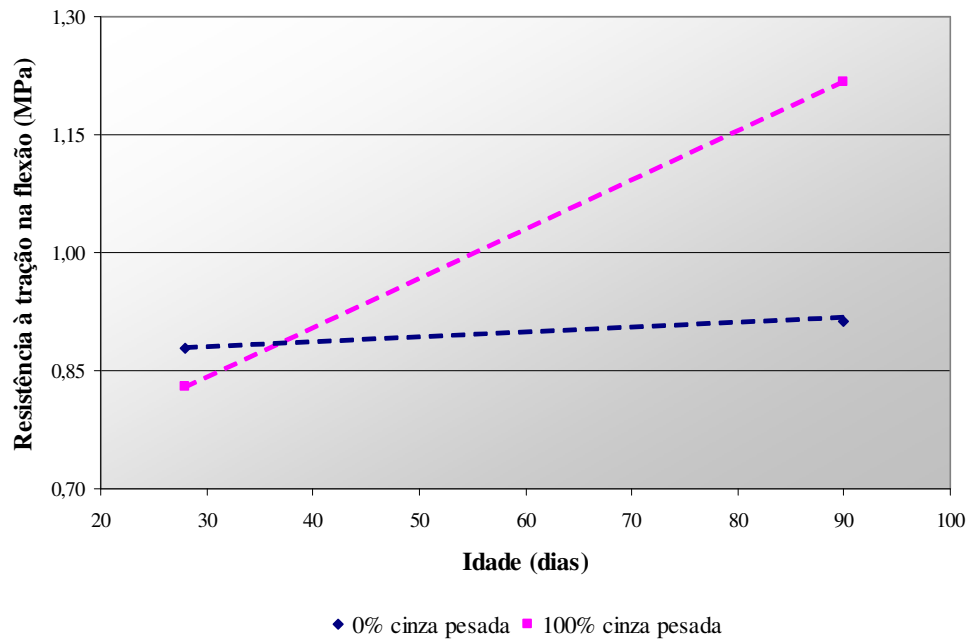
**Tabela 4.22** – Resistência à tração na flexão das misturas de CCR com o decorrer do tempo

Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de cinza pesada (%)	Idade de cura (dias)	
		28	90
80	0	0,88	0,91
	100	0,83	1,22
120	0	1,85	2,34
	100	2,08	2,70
160	0	2,12	2,58
	50	2,19	3,82

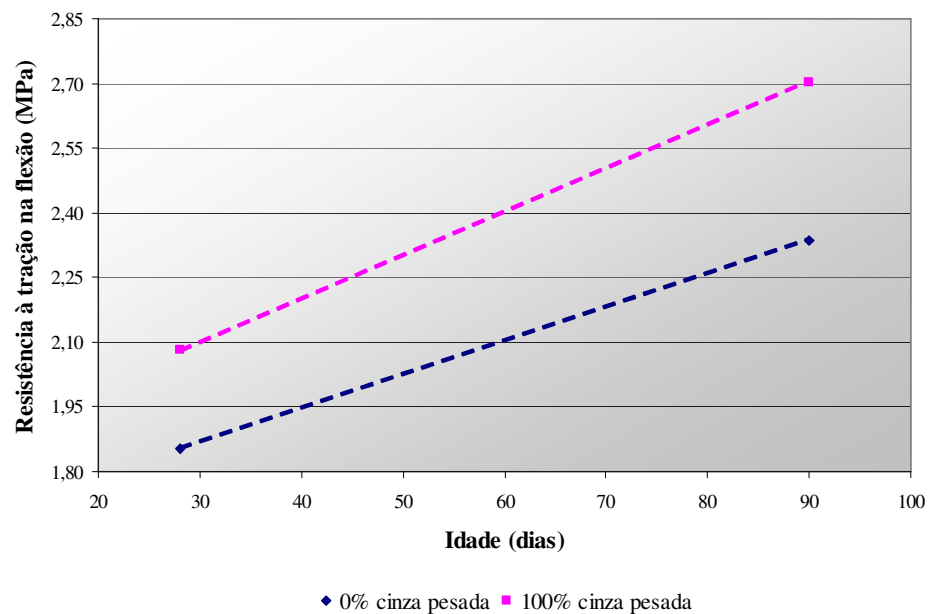


**Figura 4.35** – Ensaio de resistência à tração na flexão com prensa hidráulica

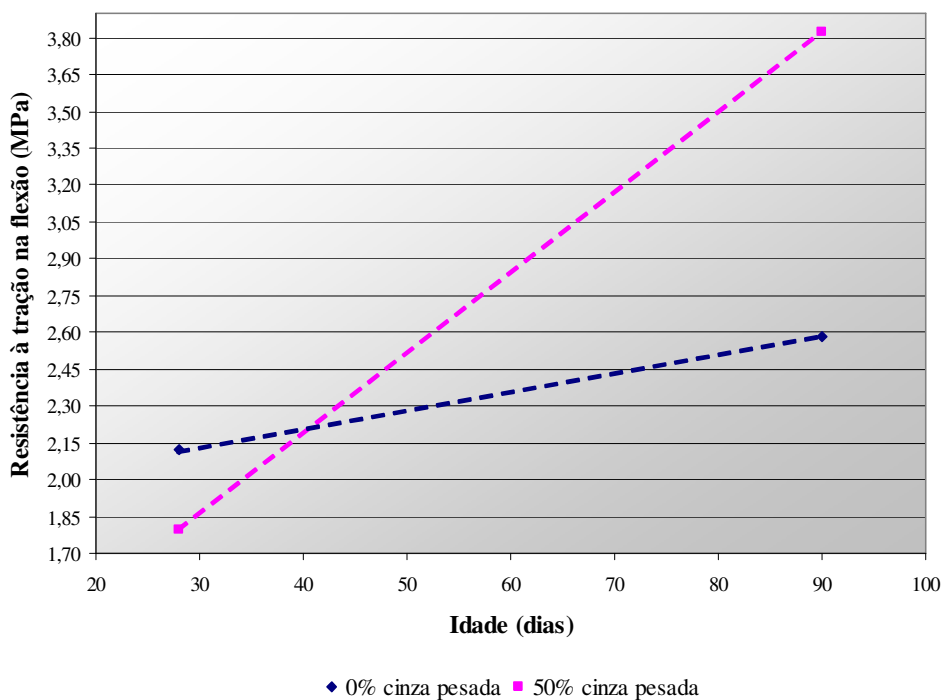
Analisando os dados da Tabela 4.22, observa-se que nas misturas onde a areia natural é substituído pela cinza pesada, este subproduto resultam maiores valores desta propriedade, pois a cinza pesada melhora a interface pasta/agregado através da diminuição dos espaços vazios, tornado a mistura mais densa e melhorando a resistência à tração na flexão. Os resultados obtidos nas misturas com cinza pesada foram comparados com os resultados encontrados para as misturas de referência e nas Figuras de 4.36 a 4.38 são mostrados estes valores.



**Figura 4.36** – Resistência à tração na flexão do CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento



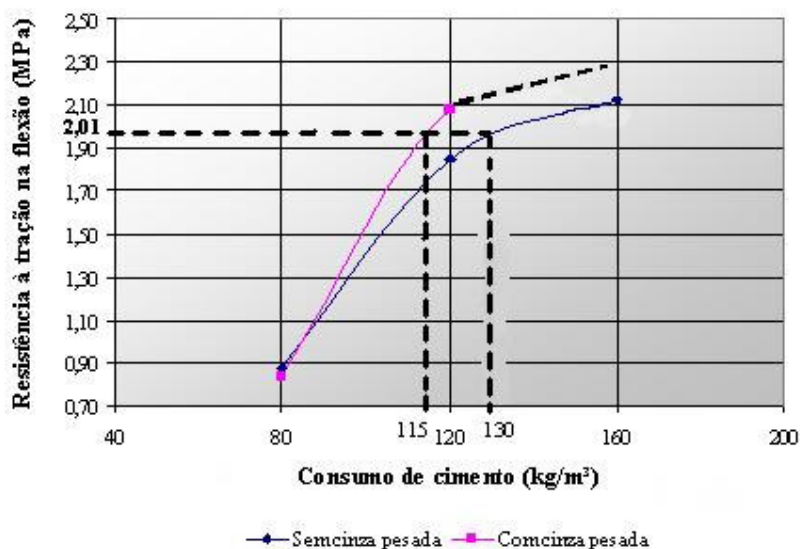
**Figura 4.37** – Resistência à tração na flexão do CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento



**Figura 4.38** – Resistência à tração na flexão do CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento

Analisando os gráficos das Figuras de 4.36 a 4.38 verifica-se que a cinza pesada age positivamente na resistência à tração na flexão do CCR aumentando o seu valor para maiores idades de cura (devido à ação pozolânica).

A Figura 4.39 mostra a variação da resistência à tração na flexão com o consumo de cimento e a idade de cura. Na figura, o segmento pontilhado representa uma extrapolação. Nesta figura, considerando-se uma resistência à tração na flexão de 2,01 MPa, a qual será adotada para dimensionar uma estrutura de pavimento hipotética na qual a camada de base será em CCR (vide capítulo 5) pode-se constatar que esta resistência poderá ser obtida com um CCR de referência com previsão de uso de 130 kg/m<sup>3</sup> de cimento ou com um CCR com 22% de cinza pesada (100% de substituição da areia natural), porém com 115 kg/m<sup>3</sup> de cimento. Isto representa uma redução de 13% no consumo de cimento, além da economia representada e o benefício do passivo ambiental.



**Figura 4.39** - Resistência à tração na flexão do CCR aos 28 dias em função do consumo de cimento e uso da cinza pesada

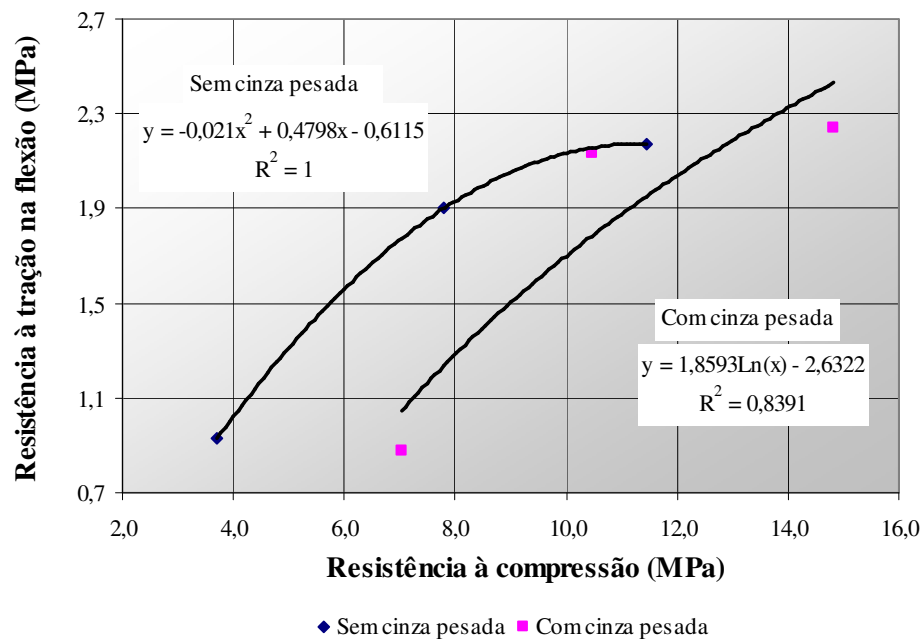
Em relação à economia adquirida conforme visto na Figura 4.39 é muito importante este tipo de simulação, pois a diminuição no consumo de cimento se reverte em economia para a obra sem deixar de lado os objetivos estabelecidos em projeto.

Com os dados da Tabela 4.19 e 4.20 foi possível estabelecer uma relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão. Este tipo de correlação é interessante de ser obtida face à maior complexidade para realizar os ensaios de tração na flexão. A Tabela 4.23 mostra a relação obtida. As Figuras 4.40 e 4.41 mostram a evolução desta relação para as idades de 28 e 90, respectivamente.

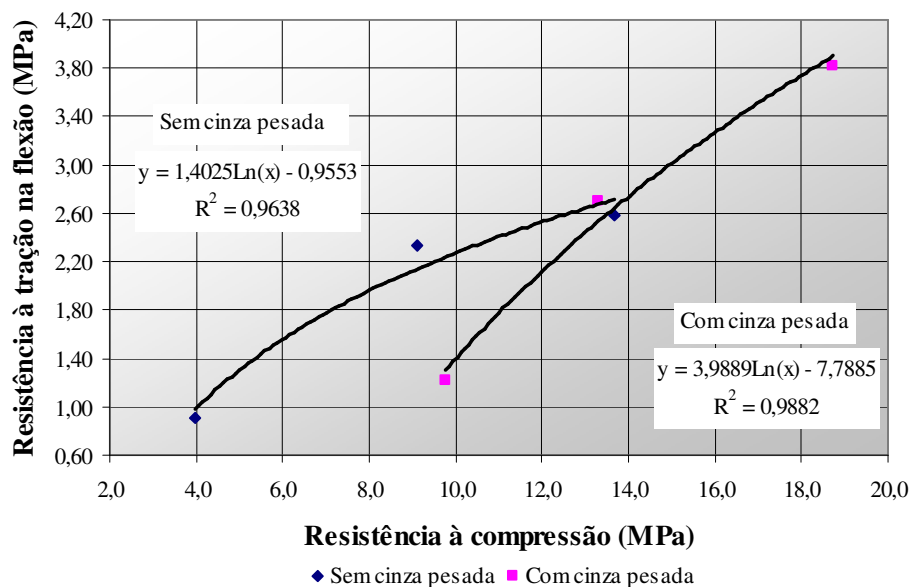


**Tabela 4.23** – Porcentagem da resistência à tração na flexão estimada em função da resistência à compressão

Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de cinza pesada (%)	Idade (dias)	
		28	90
		Rt/Rc (%)	Rt/Rc (%)
80	0,0	23,72	22,98
	100	11,80	12,49
120	0,0	23,71	25,71
	100	19,88	20,28
160	0,0	18,50	18,90
	50	14,78	20,39



**Figura 4.40** – Relação Resistência à tração na flexão e resistência à compressão para a idade de 28 dias



**Figura 4.41** – Relação Resistência à tração na flexão e resistência à compressão para a idade de 90 dias

De modo a aproveitar os mesmos Cp's foi avaliada a evolução da propagação da velocidade de pulso do ultra-som antes da realização do ensaio de resistência à tração na flexão e no item 4.6 é apresentada os resultados obtidos nesta análise.

#### 4.6 – PROPAGAÇÃO DA VELOCIDADE DE PULSO DO ULTRA-SOM

Com a realização do ensaio de propagação da velocidade de pulso do ultra-som foi possível monitorar a resistência do CCR através da variação da velocidade de propagação dos pulsos com o tempo de cura das misturas.

A busca para tal conhecimento tem como finalidade a sua aplicação no controle de qualidade de execução do CCR no campo, haja vista que os procedimentos tradicionalmente empregados (Frasco de areia) para garantir que se atinja a resistência de projeto são de difícil realização e de validade questionável.

Como parâmetro, se procurou correlacionar a magnitude do pulso de ultra-som com os dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão.

Nos CP's cilíndricos, a velocidade de pulso do ultra-som foi medida pelo modo de transmissão direta, conforme esquema mostrado na Figura 2.6, onde os pulsos são gerados por transdutores colocados em faces opostas. Nos CP's prismáticos, os pulsos do ultra-som foram gerados por dois transdutores colocados no mesmo plano, sendo que a velocidade de pulso do ultra-som foi medida pelo modo de transmissão indireta.

A avaliação da velocidade de pulso do ultra-som foi realizada nos mesmos CP's usados para determinar a resistência à compressão e resistência à tração na flexão. Para os CP's cilíndricos, essa avaliação foi realizada na idade de 28 e 90 dias e nos CP's prismáticos foi aos 03, 07, 14, 21, 28, 56 e 90 dias. A Figura 4.42 ilustra a realização do ensaio de pulso do ultra-som nos CP's prismáticos (modo de transmissão indireta).



**Figura 4.42** – Ensaio de pulso do ultra-som em CP's prismáticos 15 x 15 x 50 cm

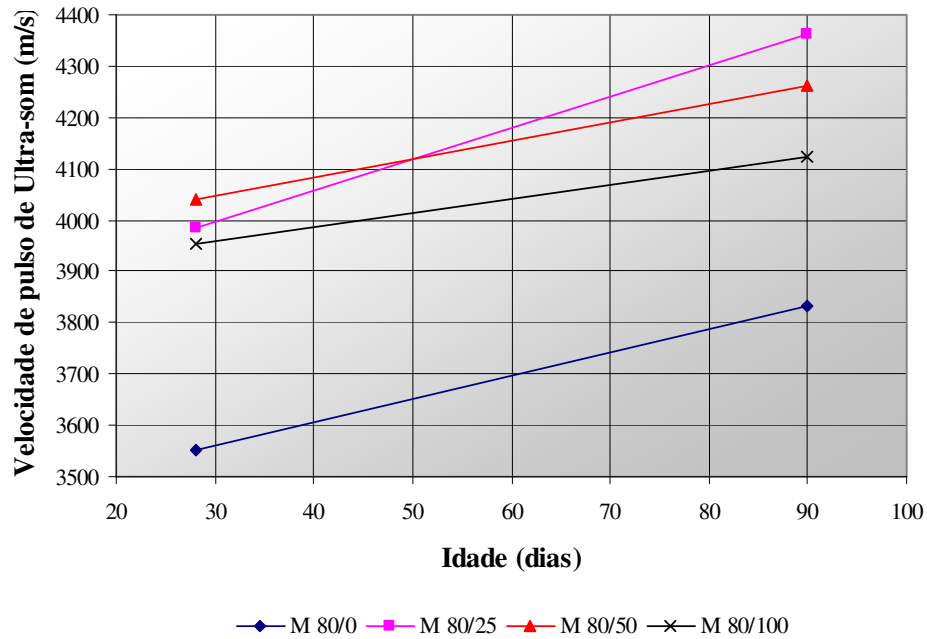
Nas Tabelas 4.24 e 4.25 são mostrados os valores da velocidade de pulso do ultra-som obtidos a partir dos CP's Cilíndricos e CP's prismáticos. As Figuras de 4.43 a 4.45 apresentam a evolução da velocidade de pulso do ultra-som com o tempo de cura para os CP's cilíndricos.

**Tabela 4.24** – Velocidade de pulso do ultra-som medida nos CP's cilíndricos

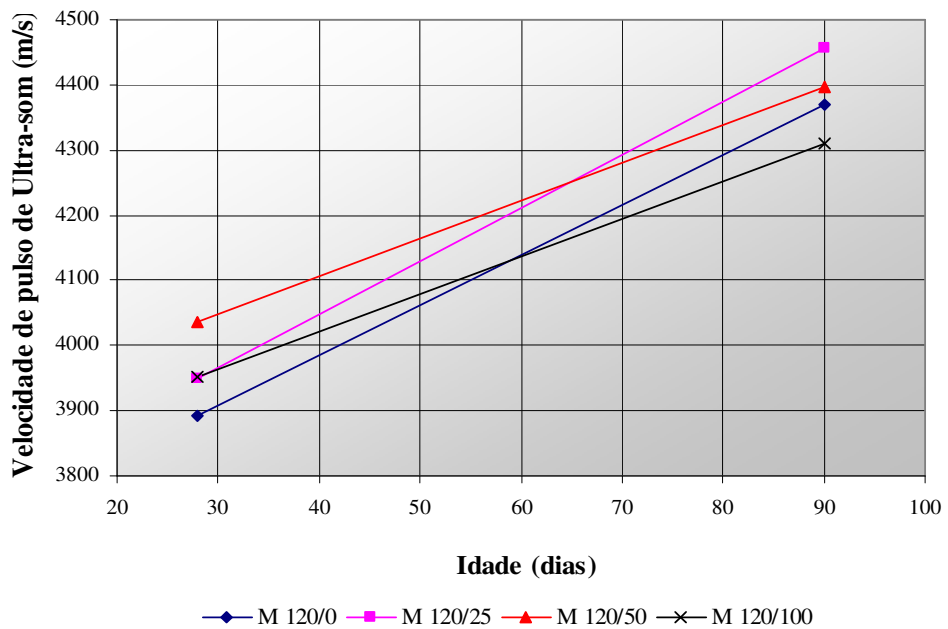
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de cinza pesada (%)	Velocidade de pulso do ultra-som (m/s)	
		28 dias	90 dias
80	0	3551	3833
	25	3984	4363
	50	4039	4261
	100	3955	4124
120	0	3891	4371
	25	3948	4457
	50	4037	4397
	100	3952	4309
160	0	4246	4581
	25	4483	4687
	50	4424	4670
	100	4381	4452

**Tabela 4.25** – Velocidade de pulso do ultra-som obtida por transmissão direta e indireta e medida nos CP's prismáticos

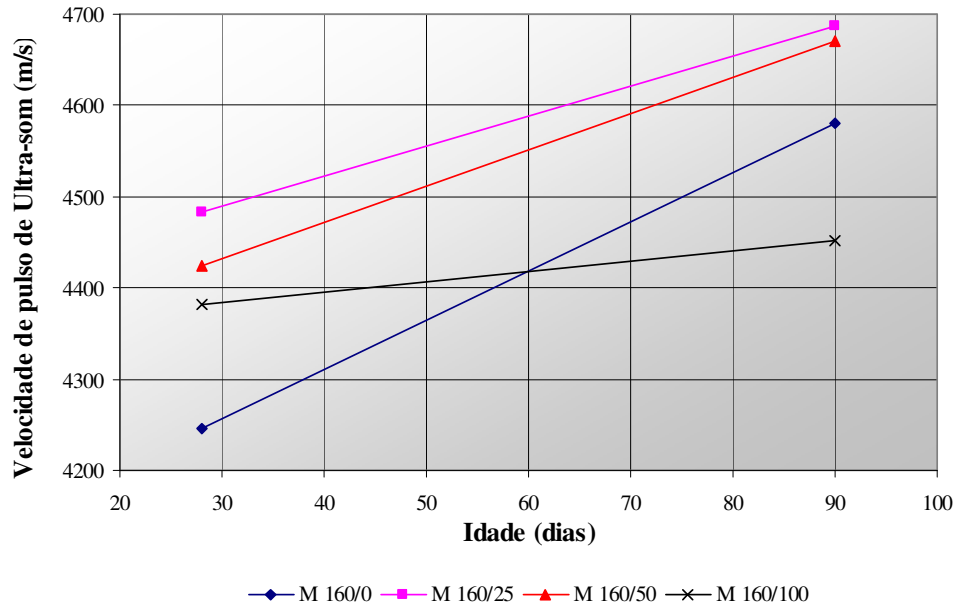
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de cinza pesada (%)	Velocidade de pulso do ultra-som (m/s)							
		7 dias		14 dias		28 dias		90 dias	
		Transmissão direta	Transmissão indireta	Transmissão direta	Transmissão indireta	Transmissão direta	Transmissão indireta	Transmissão direta	Transmissão indireta
80	0	3032	2320	3276	3055	3392	3220	3676	3637
	100	2671	2376	2958	2976	3185	3155	3460	3343
120	0	3844	3728	4167	3882	4300	4096	4547	4306
	100	3402	2905	3711	3566	4013	3660	4133	4036
160	0	3877	3644	4106	3741	4157	3984	4481	4234
	50	3539	3420	4075	3798	4231	3979	4532	4299



**Figura 4.43** – Variação da velocidade de pulso do ultra-som com o tempo para o CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento (CP's cilíndricos)

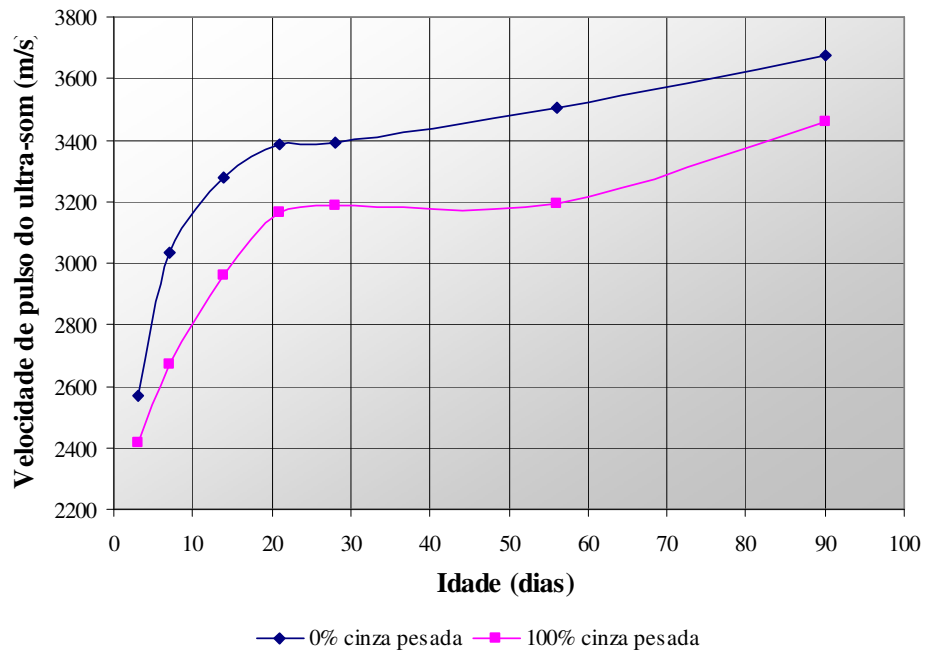


**Figura 4.44** – Variação da velocidade de pulso do ultra-som com o tempo para o CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento (CP's cilíndricos)

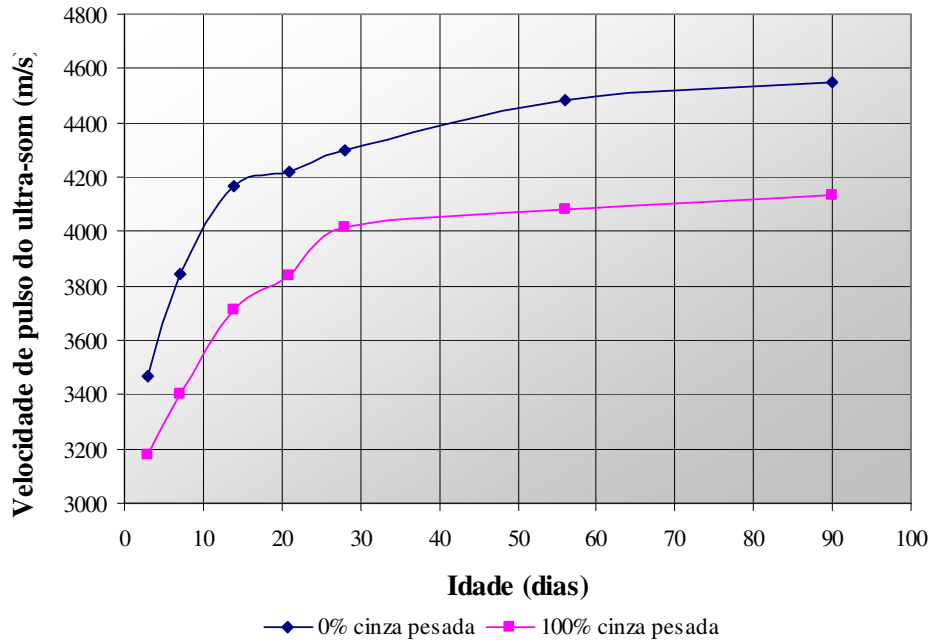


**Figura 4.45** – Variação da velocidade de pulso do ultra-som com o tempo para o CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento (CP's cilíndricos)

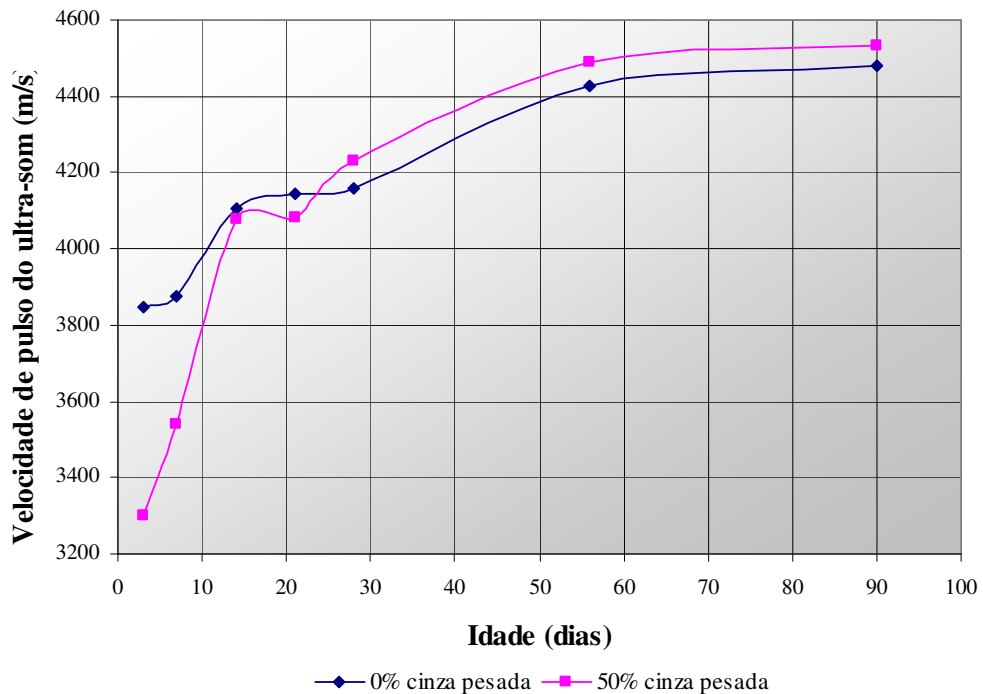
As figuras de 4.46 a 4.48 mostram a evolução da velocidade do pulso do ultra-som com a idade para os CP's prismáticos.



**Figura 4.46** – Variação da velocidade de pulso do ultra-som com o tempo para o CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento (CP's prismáticos)



**Figura 4.47** – Variação da velocidade de pulso do ultra-som com o tempo para o CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento (CP's prismáticos)



**Figura 4.48** – Variação da velocidade de pulso do ultra-som com o tempo para o CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento (CP's prismáticos)

Segundo BUNGEY (1989) e MALHOTRA & CARINO (1991), a velocidade de pulso de ultra-som é inversamente proporcional à massa específica do material (vide equação 2.5).

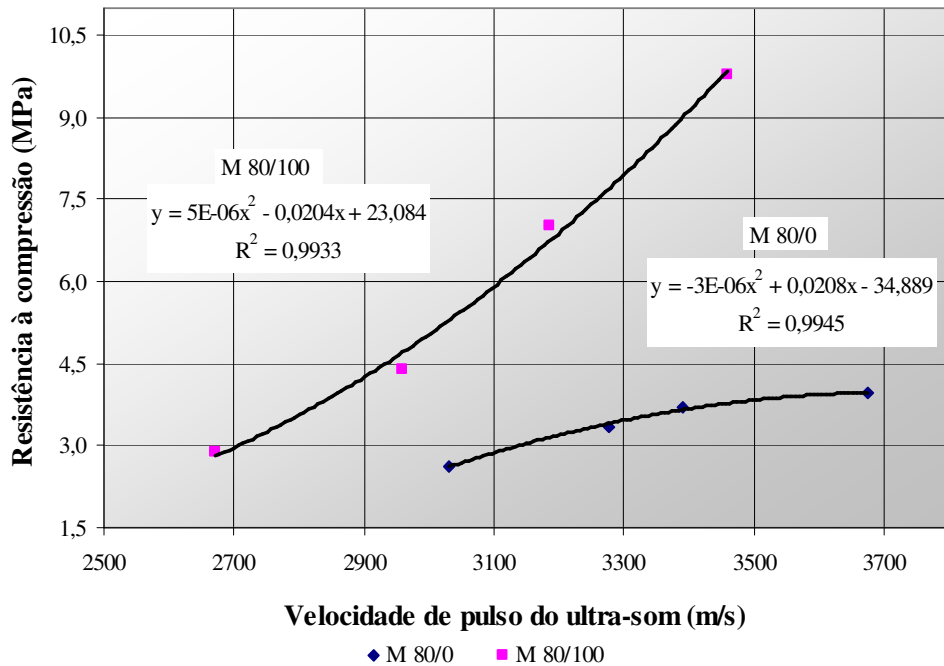
Fica evidente que nas misturas de referência o consumo de cimento e a idade de cura influencia diretamente no aumento da velocidade de pulso de ultra-som, pois no CCR o aumento do teor de cimento além de ajudar no aumento da resistência também melhora a compactidade da mistura diminuindo os espaços vazios devido às reações de hidratação que ocorrem entre as partículas de cimento com o passar do tempo.

Entretanto, nota-se, que nos CP's prismáticos, a adição de cinza pesada diminuía a velocidade de propagação de pulso do ultra-som resultando na diminuição da massa específica. Já nos CP's cilíndricos, a adição de cinza pesada propiciou um aumento na velocidade de pulso do ultra-som com o decorrer do tempo, muito embora com a adição da cinza pesada ocorra à diminuição da massa específica nos dois tipos de CP's.

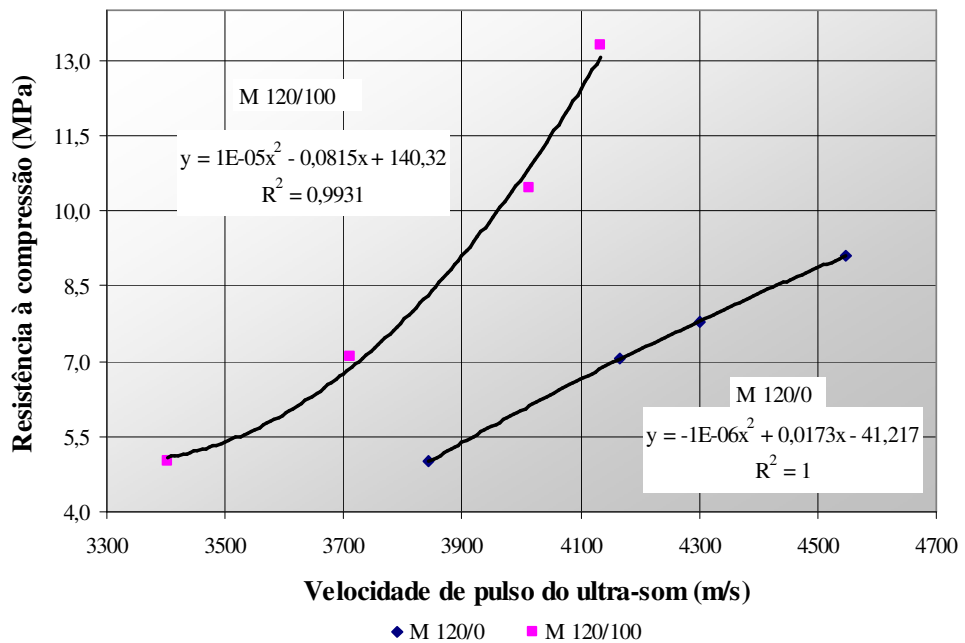
É provável que se o modo de como se propaga o pulso do ultra-som nos dois CP's (modo direto e indireto) sofra alguma influência da forma de como os CP's são compactados, isto é, nos CP's cilíndricos (modo direto) a propagação do pulso do ultra-som se dá no sentido em que o CP é compactado enquanto que nos CP's prismáticos (modo indireto) a propagação se dá perpendicularmente à forma como o CP é compactado e principalmente na região junto à superfície.

As Figuras de 4.49 a 4.51 apresentam a correlação entre a resistência à compressão simples e a velocidade de pulso do ultra-som para as idades de 28 e 90 dias.

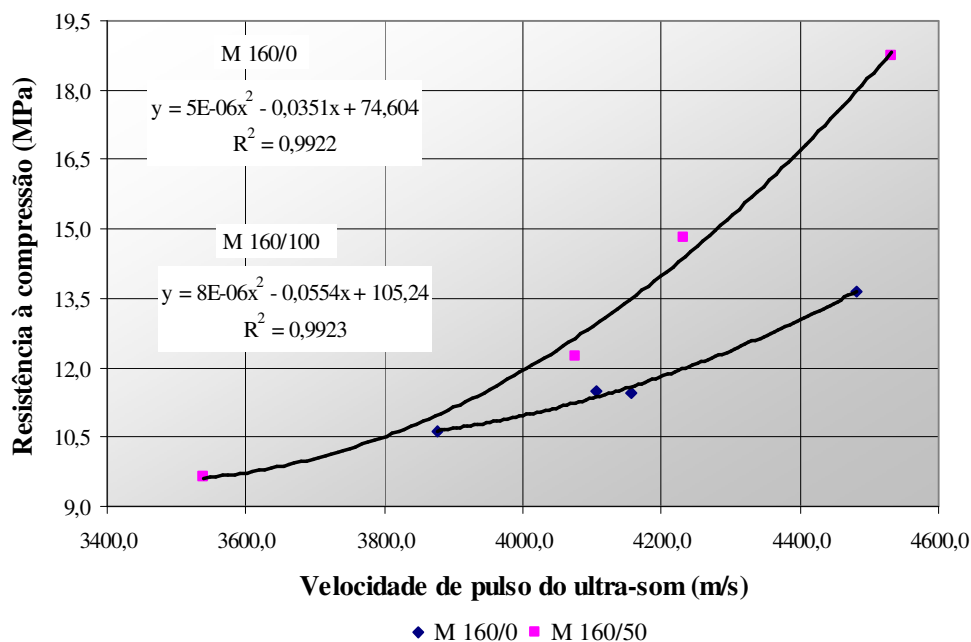




**Figura 4.49** – Relação entre a velocidade de pulso do ultra-som e a resistência à compressão para o CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento



**Figura 4.50** – Relação entre a velocidade de pulso do ultra-som e a resistência à compressão para o CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento



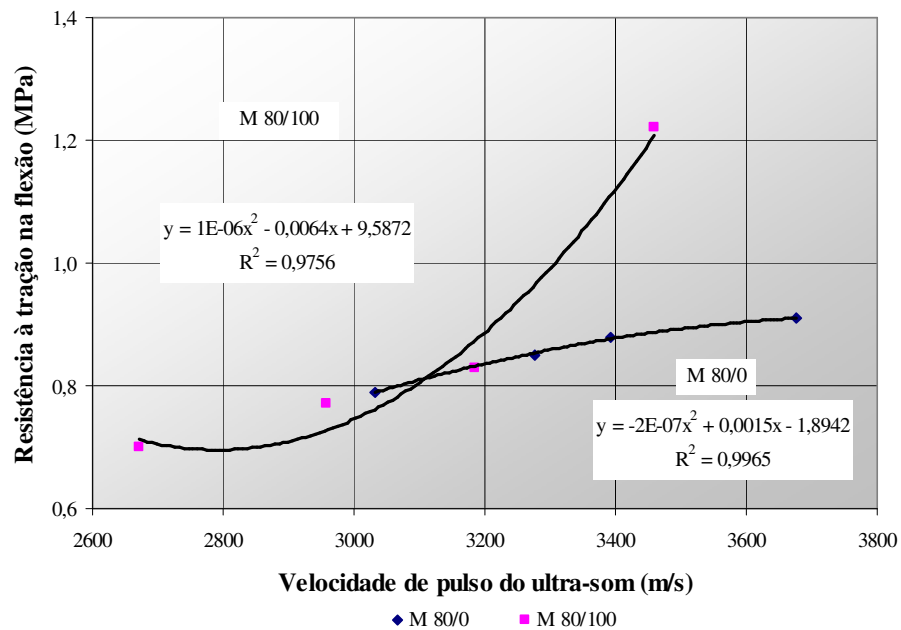
**Figura 4.51** – Relação entre a velocidade de pulso do ultra-som e a resistência à compressão para o CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento

Através da análise de regressão verifica-se que é possível se estimar a resistência do CCR a partir do conhecimento da velocidade de pulso do ultra-som. Porém, para idades maiores, comprova-se que devido a menor massa específica da cinza pesada e por mais que ocorra o acréscimo da resistência à compressão, a adição de cinza pesada produz valores menores de propagação de pulso do ultra-som.

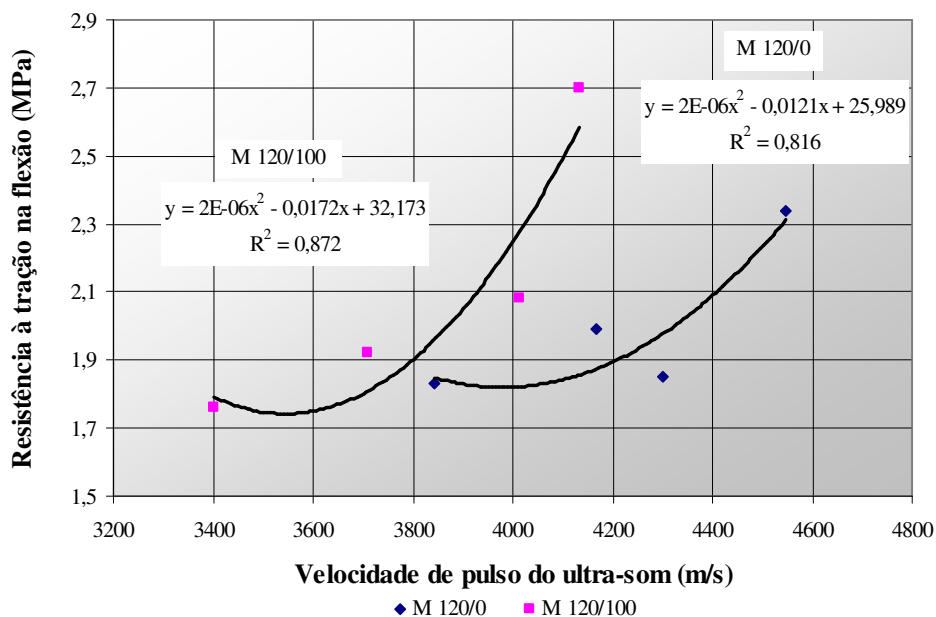
A partir da relação entre a resistência à tração na flexão (Tabela 4.20) e a resistência à compressão (Tabela 4.19) e com os dados obtidos da velocidade propagação da velocidade de pulso do ultra-som (Tabelas 4.22 e 4.23) foi possível modelar uma curva que mostrasse como seria a evolução da resistência à tração na flexão para as idades de 7, 14, 28 e 90 dias. A Tabela 4.26 e as Figuras de 4.52 a 4.54 mostram os dados da correlação entre a velocidade de pulso e a resistência à tração na flexão.

**Tabela 4.26** – Dados da resistência à tração na flexão obtidos a partir da modelagem entre a relação  $R_t/R_c$  e velocidade de pulso do ultra-som

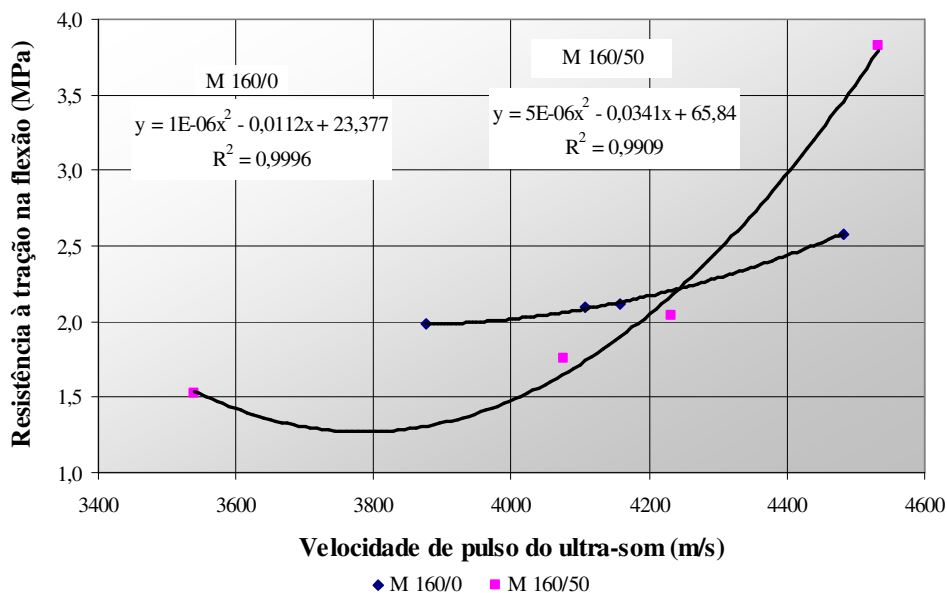
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	cinza pesada (%)	Resistência à tração na flexão (MPa)				Velocidade de pulso do ultrasom (m/s)			
		7	14	28	90	7	14	28	90
80	0	0,79	0,85	0,88	0,91	3032	3276	3392	3676
	100	0,70	0,77	0,83	1,22	2671	2958	3185	3460
120	0	1,83	1,99	1,85	2,34	3844	4167	4300	4547
	100	1,76	1,92	2,08	2,70	3402	3711	4013	4133
160	0	1,98	2,09	2,12	2,58	3877	4106	4157	4481
	50	1,53	1,76	2,04	3,82	3539	4075	4231	4532



**Figura 4.52** – Correlação entre a resistência à tração na flexão e a velocidade de pulso do ultra-som para o CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento



**Figura 4.53** – Correlação entre a resistência à tração na flexão e a velocidade de pulso do ultra-som para o CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento



**Figura 4.54** – Correlação entre a resistência à tração na flexão e a velocidade de pulso do ultra-som para o CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento

Após todos os dados obtidos e analisados, pode-se dizer que ao ser comparado com a mistura de referência, a adição da cinza pesada propicia um aumento de 90% na resistência à compressão aos 28 dias e 147% aos 90 dias para as misturas com 80 kg/m<sup>3</sup>

de cimento. Para as misturas com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento foram observados aumentos de 34% aos 28 dias e 46% para os 90 dias. Para as misturas com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento a influencia da cinza pesada se reverteu no aumento da resistência à compressão em 33% aos 28 dias e 30% aos 90 dias.

Para a resistência à tração na flexão, a substituição da areia natural pela cinza pesada proporcionou um aumento de 34%, 16% e 48% para a idade de 90 dias, para as misturas com 80, 120 e 160 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Ao ser fixado um valor pra a resistência, tanto à compressão como à tração na flexão, a adição da cinza pesada contribui para a diminuição do consumo de cimento, o que vem a se reverter em economia para a obra.

Devido à necessidade do conhecimento inicial das propriedades mecânicas sem que provoque danos à camada de CCR, o ensaio de velocidade de pulso do ultra-som se mostrou uma ferramenta de grande potencial para se estimar os valores da resistência mecânica sem causar danos às misturas de CCR.

## CAPITULO 5 – APLICAÇÃO DOS RESULTADOS AO DIMENSIONAMENTO DE UMA ESTRUTURA DE PAVIMENTO

### 5.1 – DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO HÍBRIDO

Entre os métodos de dimensionamento adotados no Brasil destacam-se o modelo do DNER de 1994, o modelo que considera a resiliência no projeto de pavimentos, desenvolvido pelo Engenheiro Salomão Pinto e pelo Engenheiro Ernesto Simões Preussler (1994) e como programas computacionais para a análise tensão-deformação destacam-se o programa FEPAVE-2 e o programa ELSYM-5.

Inicialmente se definiu uma estrutura hipotética conforme metodologia apresentada no item 3.2.7.

Na seqüência avaliou-se a vida útil da estrutura através de análise tensão-deformação. A Tabela 5.1 mostra os parâmetros adotados na análise tensão-deformação. A análise foi realizada empregando-se o programa ELSYM – 5.

Conhecido o valor da tensão de tração na face inferior da camada de base ( $\sigma_t = 1,0$  MPa) determinou-se a relação SR que é a relação entre a tensão de tração e a resistência à tração ( $R_t = 2,01$  MPa).

Utilizando-se o modelo desenvolvido por TRICHÊS (1993) para o CCR com  $120 \text{ kg/m}^3$  de cimento, dado por:

$$N = 10^{(14,911 - 15,074 \times SR)} \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde:

N = nível de tráfego; e,

SR =  $\sigma / R_t \gg$  Relação entre a tensão aplicada e a resistência à tração na flexão.

## ESTRUTURA DE PAVIMENTO

Determinou-se qual a vida útil da estrutura em termos do número  $N_{8,2t}$  como segue:

$$\sigma = 1,0 \text{ MPa ou } 10 \text{ kgf/cm}^2; e,$$

$$R_t = 2,01 \text{ MPa ou } 20,1 \text{ kgf/cm}^2.$$

$$SR = 10 / 20,1$$

$$SR = 0,4975$$

$$N = 10^{(14,911 - 15,074 \times 0,4975)}$$

$$N = 2,58 * 10^7$$

A Tabela 5.1 mostra os parâmetros mecânicos dos materiais adotados no dimensionamento.

**Tabela 5.1** – Parâmetros mecânicos dos materiais usados no dimensionamento

CAMADAS	Pavimento Flexível	Pavimento Híbrido
Subleito	Solo Tipo II >> CBR 7% Módulo Resiliente (MR) = 100 MPa	Solo Tipo II e CBR 7% MR = 100 MPa
Sub-base	Macadame Seco >> CBR 20% MR = 220 MPa	Brita graduada (espessura = 13,0 cm e MR = 350 MPa
Base	Brita graduada >> CBR = 80% MR = 350 MPa	CCR 115 kg/m <sup>3</sup> de cimento e 100% de cinza pesada E = 14600 MPa (28 dias) R <sub>t</sub> = 2,01 MPa (28 dias) Espessura = 20,0 cm Coef. Poisson = 0,20
Revestimento	Mistura asfáltica (K = 2,0) MR = 6000 MPa	Tratamento superficial duplo (esp. = 2,0 cm; MR = 2000 MPa)

A Tabela 5.2 mostra a configuração adotada para o pavimento híbrido

**Tabela 5.2** – Configuração adotada para o pavimento híbrido

Camada	Espessura (cm)	Coefficiente de Poisson ( $\mu$ )	Módulo Resiliente (GPa)
Tratamento superficial duplo	2	0,3	20,0
Base	20	0,20	14,60
Sub-base	13	0,35	3,0
Subleito	---	0,45	1,0

Carga /roda = 2050 kgf

Pressão nos pneus = 0,57 MPa

Distância entre cargas = 31 cm

Deflexão ( $\delta$ ) =  $22,7 \times 10^{-2}$  mm

Deformação de tração ( $\epsilon_t$ ) no fundo da camada asfáltica =  $110 \times 10^{-6}$  mm/mm

Tensão vertical de compressão no subleito ( $\sigma_c$ ) = 0,019 MPa

## 5.2 – DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO FLEXÍVEL

### 5.2.1 – Dados para o Dimensionamento

$$N_{\text{de projeto}} = 2,58 \times 10^7$$

**CBR = 7% e solo tipo II**

### 5.2.2 – Espessura total do pavimento ( $H_T$ )

$$H_T = 77,67 \times 25.800.000^{0,0482} \times \text{CBR}^{-0,598}$$

$$H_T = 77,67 \times 25.800.000^{0,0482} \times 7^{-0,598}$$

$$H_T = 55,22 \text{ cm}$$

$$H_T \text{ (adotado)} = 56 \text{ cm}$$

### 5.2.3 – Deflexão admissível de projeto ( $D_P$ )

$$\log D = 3,148 - 0,188 \log N$$



$$\log \bar{D} = 3,148 - 0,188 \log 2,58 \times 10^7$$

$$\bar{D} = 56,22 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

$$D_p \leq \bar{D}$$

$$D_p \leq 56,22 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

#### 5.2.4 – Espessura mínima do revestimento betuminoso ( $H_{CB}$ )

$$H_{CB} = -5,737 + 807,961/D_p + 0,972 I_1 + 4,101 I_2$$

Considerado subleito tipo II:  $I_1 = 1,0$        $I_2 = 0,0$

$$H_{CB} = -5,737 + 807,961/56,22 + 0,972 \times 1 + 4,101 \times 0$$

$$H_{CB} = 9,60 \quad \longrightarrow \quad H_{CB} \text{ (adotado)} = 10,0 \text{ cm}$$

#### 5.2.5 – Valor estrutural da camada betuminosa de revestimento

$$N = 2,58 \times 10^7$$

Subleito: solo tipo II

$$V_e = 2,8 \text{ (valor estrutural da camada betuminosa)}$$

#### 5.2.6 – Espessura da camada granular ( $H_{CG}$ )

$$H_{CB} \times V_x + H_{CG} = H_T$$

$$10,0 \times 2,8 + H_{CG} = 56,0$$

$$H_{CG} = 28 \text{ cm}$$

$$H_{CG} = 28 \text{ cm}$$

$$H_{CG} \leq 35 \text{ cm}$$

**OK!!!!**

Segundo o método DNER/94 a camada granular do pavimento tem que ser menor que 35 cm, portanto, depois de realizado o cálculo da espessura desta camada foi

verificado que o valor encontrado é menor que o estipulado pelo método do DNER/94, sendo aceito o valor calculado.

A estrutura final do pavimento Segundo esta metodologia é a seguinte:

- Camada betuminosa ( $H_{CB}$ ) = 10,0 cm; e,
- Camada granular ( $H_{CG}$ ) = 28 cm.

### 5.2.7 – Análise tensão deformação da estrutura flexível

Segundo o modelo desenvolvido por SALOMÃO PINTO (1991) e apresentado na Equação 5.2 a deformação de tração no fundo da camada asfáltica de revestimento para o  $N_{de\ projeto}$ .

$$N = 9,07 \times 10^{-9} \times (1/\epsilon_t)^{2,65} \times (1/M_R)^{-0,033} \quad \text{Equação 5.2}$$

Onde:

$N$  = Tráfego de projeto: adotado o valor obtido pelo modelo de TRICHÊS (1993) na estrutura hipotética de revestimento do pavimento híbrido;

$\epsilon_t$  = Deformação de tração no fundo da camada asfáltica; e,

$M_R$  = Módulo resiliente da mistura asfáltica: adotado  $M_R = 4.000$  MPa

Com a aplicação da Equação 5.2 encontrou-se:

$$\epsilon_t = 129 \times 10^{-6} \text{ mm/mm.}$$

Com o auxílio do programa ELSYM – 5 verificou-se se a estrutura dimensionada suportaria a solicitação do tráfego de projeto.

A simulação numérica mostrou que ao serem adotados os valores para o dimensionamento do pavimento flexível a deformação de tração é bem maior que a calculada pelo modelo de SALOMÃO PINTO (1991), o que tornou necessário alterar as

espessuras das camadas até conseguir uma deformação igual aquela calculada pelo modelo da equação 5.2.

A Tabela 5.3 apresenta a configuração final da estrutura do pavimento flexível que seria equivalente tecnicamente à estrutura hipotética do pavimento híbrido.

**Tabela 5.3** – Configuração adotada para o pavimento flexível

<b>Camada</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Coefficiente de Poisson (<math>\mu</math>)</b>	<b>Módulo Resiliente (GPa)</b>
Revestimento	16	0,3	60,0
Base	20	0,35	3,5
Sub-base	21	0,35	2,2
Subleito	---	0,45	1,0

Carga /roda = 2050 kgf

Pressão nos pneus = 0,57 MPa

Distância entre cargas = 31 cm

Deflexão ( $\delta$ ) =  $29 \times 10^{-2}$  mm

Deformação de tração ( $\epsilon_t$ ) no fundo da camada asfáltica =  $126 \times 10^{-6}$  mm/mm

Tensão vertical de compressão no subleito ( $\sigma_c$ ) = 0,02 MPa

Analisando os dados das Tabelas 5.2 e 5.3 observa-se que para um mesmo nível de tráfego ( $N = 2,6 \times 10^7$ ), o pavimento composto resulta em espessuras bem menores para a camada de revestimento e sub-base se comparado com o pavimento flexível. É muito provável então que a estrutura do pavimento híbrido apresente um custo inicial de implantação inferior ao da estrutura do pavimento flexível. Entretanto, vale ressaltar que as estruturas ora apresentadas atenderiam a uma rodovia de tráfego médio. É interessante observar que para efeito de cálculo de maneira a obter uma deformação de tração no fundo da camada menor que a calculada pela Equação 5.2 acabou-se extrapolando os limites estipulados pelo método DNER/94 quanto o diz respeito à camada granular, sendo que foi adotado o valor de 41 cm para esta camada.

## CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1 – CONCLUSÕES

De uma maneira geral, a partir dos resultados obtidos, pode-se afirmar que a cinza pesada mostrou-se como um agregado miúdo muito competitivo, por influenciar positivamente e de maneira direta no comportamento mecânico do CCR, o que a caracteriza como um material alternativo de boa qualidade.

Ficou evidente que a adição da cinza pesada aumenta a resistência à compressão simples de todas as misturas, mesmo sendo a massa específica menor que a das misturas de referência, como, por exemplo, ocorreu nas misturas onde a cinza pesada substituiu 100% da areia natural.

É muito provável que devido à granulometria mais fina, a adição da cinza pesada nas misturas de CCR faça com que este subproduto resulte uma melhor interação da interface argamassa/agregado diminuindo os espaços vazios existentes no conjunto e proporcionando uma melhor estabilidade à mistura.

Com a substituição de 100% da areia natural pela cinza pesada, os valores da resistência à compressão simples aos 90 dias para as misturas de CCR com 80 e 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento resultaram num aumento de 146% e 46%, respectivamente, quando comparado com as misturas de referência. No caso da mistura com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento, o acréscimo na resistência foi menor, chegando a 29,50%.

Para valores de resistência de tração na flexão da ordem de 2,0 MPa, a substituição da areia natural por cinza pesada pode resultar em uma economia de cerca de 11% no consumo de cimento.

Para misturas com 120 a 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento a adição da cinza pesada reduz a rigidez da mistura em relação aos valores para um mesmo nível de resistência obtidos para a mistura de referência.

Também se observou que com o decorrer do tempo as misturas com cinza pesada resultavam no aumento da resistência à tração na flexão se comparadas com as misturas de referência. Nas misturas com 80, 120 e 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento e que a areia natural foi 100% substituída foram obtidos acréscimos de resistência de 34%, 15% e 48%, respectivamente, em relação às misturas de referência.

Foi possível obter relações significativas entre a velocidade de pulso de ultra-som com a resistência à compressão e a tração na flexão o que indica que é viável o controle da resistência da camada durante o processo construtivo, “in loco” a partir das medidas de ultra-som.

Devido ao comportamento positivo que a cinza pesada apresentou, torna-se possível dar um destino nobre a este resíduo que atualmente é apenas depositado em aterros nos arredores do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda. O uso da cinza pesada colabora também com a diminuição do passivo ambiental e com a gestão deste resíduo.

## 6.2 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização deste estudo experimental, sentiu-se a necessidade de novos trabalhos que abordem esta mesma linha de pesquisa, tais como:

- Execução de um trecho experimental;
- Utilização do ultra-som no acompanhamento de obras para controle da resistência “*in situ*” e criar um banco de dados com os resultados obtidos;
- Realização do ensaio com o aparelho Vebe modificado de modo a obter índices de consistência e massa unitária das misturas de CCR no estado fresco; e,
- Verificação da influência do tipo de agregado graúdo existente na região de influência do complexo Termelétrico Jorge Lacerda quanto à evolução das propriedades mecânicas e da velocidade de pulso de ultra-som nas misturas de CCR com e sem cinza pesada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, I. B. **“Caracterización de Cenizas Volantes de Centrales Termoeléctricas de Carbón Brasileñas. Utilización en la Ingeniería Civil y Sus Implicaciones Medio Ambientales”**. Tesis de doctoral – Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona: Escola Tècnica Superior d’ enginyers de comins, canals i ports. Barcelona 1999. 255p.

ABREU, J. V. **“Estudo do Concreto de Alta Resistência Compactado com Rolo”**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia. São Paulo, 2002. p. 1 – 132.

ACI Committee 325. **“State-of-the-Art Report on Roller-Compacted Concrete Pavements”**. ACI 325-95, American Concrete Institute, 32 pp., 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **“Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete: ASTM C618”**. Philadelphia, 1995.

AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **“Standard Specification on for Materials, Aggregate and Soil-Aggregate Subbase, Base and Surface Courses”**. AASHTO Designation: M147-70 (1980). Part I Specifications, 14th Edition, 1986.

AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **“Guide for design of Pavements Structures”**. Washington, D. C., 1993.

AÏTCIN, P. C. **“High Performance Concrete”**. E & FN Spon, London, 1998.

- AMER, N.; DELATTE, N.; STOREY, C. **“Using Giratory Compaction to Investigate Density and Mechanical Properties of RCC”**. TRB 2003. Annual Meeting. November 13, 2002. p. 1 – 26.
- ANDRADE, L. B. **“Metodologia de Avaliação para o Uso de Cinzas Pesadas de Termelétrica como Agregado Natural para o Concreto”**. Dissertação de Mestrado Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004. 238p.
- ANDRADE, W. P. **“Concretos – Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo: Ensaios e Propriedades / Autores: Equipe de Furnas, Laboratório de Concreto, Departamento de Apoio e Controle Técnico”**. Editora Pini. São Paulo – 1997. Pág. 66.4 – 73.4, 1.16 – 27.16.
- ANDRIOLO, F. R. **“Construções de Concreto – Manual de Práticas para Controle e Execução”**. Editora Pini. São Paulo – 1984. Pág. 568 –594.
- ANDRIOLO, F. R. **“Contribuições para Conhecimento e Desenvolvimento do Concreto Rolado”**. Editora Barber Greene. Brasil – 1989.
- ANDRIOLO, F. R.; SGARBOZA, B. C. **“Inspeção e Controle de Qualidade do Concreto”**. Editora NEWSWORK. São Paulo – 1993.
- ANDRIOLO, F. R. **“The Use of Roller Compacted Concrete”**. Oficina de Textos. São Paulo , 1998.
- ARM, M. **“Mechanical Properties of Residues as Unbound Road Materials: Experimental tests on MSWI Bottom Ash, Crushed Concrete and Blast Furnace Slag”**. Doctoral Thesis. Stockholm, Sweden. 2003. 61p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **“Agregado para Concreto: NBR 7211”**. Rio de Janeiro, 1983.

- \_\_\_\_ **“Agregados – Determinação da Composição Granulométrica: NBR 7211”**.  
Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_ **“Agregado em Estado Solto – Determinação da Massa Unitária. NBR 7251”**.  
Rio de Janeiro, 1982.
- \_\_\_\_ **“Massa unitária: NBR 7251/1982)”**. Rio de Janeiro, 1982.
- \_\_\_\_ **“Massa específica: NBR 9776/1987”**. Rio de Janeiro, 1987.
- \_\_\_\_ **“Massa específica: NBR 9937/1987”**. Rio de Janeiro, 1987.
- \_\_\_\_ **“Inchamento: NBR 6467/1987”**. Rio de Janeiro, 1987.
- \_\_\_\_ **“Abrasão Los Angeles: NBR 6465/1984”**. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_ **“Concreto – Ensaio de resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 5739”**. Rio de Janeiro, 1980.
- \_\_\_\_ **“Concreto – Ensaio de módulo de elasticidade: NBR 8522”**. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_ **“Concreto – Ensaio de resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos: NBR 12142”**. Rio de Janeiro, 1994.
- BRETT, D. M. **“RCC Pavements in Tasmania, Australia”**. In: Roller Compacted Concrete. By K. D. Hansen and L. K. Guice. ASCE, New York, 1988. p. 369 – 428.
- BRETT, D. M.; PETRIE, R.E.; and MATHEWS, S. **“Developments in Australia RCC”**. En: 6º Simpósio Internacional sobre Carreteras de Hormigón. Madri. Out 1990. p. 9 – 18.



- BUCHER, H. R. E. **“Método de Dosagem de Concreto Pobre Rolado para Pavimentos”**. ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland (Estudo Técnico 77). São Paulo, 1985.
- CANNON, R. W. **“Air – Entrained Roller Compacted Concrete”**. Concrete International, May 1993.
- CARRASCÓN, S; DIAZ, J; JOSA, A. **“RCC Application in Low-Volume Roads in Spain”**. In: 6º Simpósio Internacional sobre Carreteras de Hormigón. Madrid – out. 1990. p 93 – 102.
- CARVALHO, M. D. et al. **“Características e Aplicações do Concreto Compactado a Rolo em Pavimentação”**. Reunião Anual – IBRACON. São Paulo. 1987.
- CARVALHO, M. D. **“O concreto Rolado como Camada Final de Base e Revestimento de Pavimentos Urbanos”**. IN: 1º Simpósio de Obras de Concreto Compactado com Rolo. Anais. São Paulo, 1995. p. 563 – 580.
- CARVALHO, E. **“Procedimento de Execução de Serviço: Execução de sub-base em concreto rolado”**. Grupo de Serviço: Pavimentação. M&C Engenharia Ltda. Código: PES PAV 035. Versão: V1. Data: 28/05/2002.
- CHANDLER, et al. **“An International Perspective on Characterization and Management of Residues from Municipal Solid Waste Incineration”**. Summary Report, International Energy Agency, 1994.
- CHERIAF, M., ROCHA, J. C., PERA, J. **“Pozzolanic Properties of Pulverized Coal Combustion Bottom Ash”**. Cement and concrete research, V 29. Issue 09. September 1999. p 1387 – 1391.
- COUTINHO, A. S. **“Fabrico e Propriedades do Betão”**. Volume I. Laboratório Nacional de Engenharia Civil LNEC – Lisboa, 1997.
- CRIGNON, C.; PECQUERUR, G. and QUENEE, B. **“Behavior of Cement Treated MSWI Bottom Ash”**. 21º Waste Management. 2001. p. 229 – 233.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 2001.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **“Manual de Pavimentos de Concreto Rolado: Histórico, Características Tecnológicas, Estado-da-Arte, Materiais, Dosagem e Normas Pertinentes”**. Vol – 01. Rio de Janeiro, 1992.

EDWARDS, J. **“Bottom Ash an Aggregate in Structural Concrete”**. University of Houston. 2003.

FARIAS, E. R. **“A Utilização de Misturas Solo/Cinza Pesada na Pavimentação – Análise dos Aspectos de Comportamento Mecânico e Ambiental”**. Dissertação de Mestrado Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, março de 2005. 97 pág.

FERRARI, V. J.; PADARATZ, I. J. **“Aplicação de Ondas Ultra-Sônicas na Detecção das Primeiras Fissuras em Vigas de Concreto Armado e na Avaliação da Resistência à Compressão”**. Acta Scientiarum. Technology. V 25 n° 2. Maringá – PR. 2003. p. 185 – 191.

FIGHMY, T. T., GRESS, D. L. et al. **“The Laconia, New Hampshire Bottom Ash Paving Project: Physical Performance Testing Report”**. Environmental research group, University of New Hampshire. Volume 3. January, 1996.

FORBES, B. A. **“The Development and Testing of Roller Compacted Concrete for Dams in Australia”**. XVI International Congress on Large Dams, San Francisco-USA. Volume 03. Junho – 1988. Pág. 103 – 104.

FRANÇA, E. P. **“Tecnologia Básica do Concreto”**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Apostila de Aula da Disciplina de Materiais de Construção. Belo Horizonte – Minas Gerais, 2002. 164 pág.

- FUGARO, D. A. **“Aplicação de Material Zeolítico Preparado com Cinzas de Carvão no Tratamento de Águas Contaminadas”**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) – Centro de Química e Meio Ambiente: Revista Meio Filtrante. Abril – Maio – Junho de 2004.
- FUJIMURA, F.; HENNIES, W. T.; SILVA, M. A. R.; SOARES, L. **“O Uso de Finos de Pedreira de Rochas Gnáissicas e Graníticas em Substituição às Áreas Naturais”**. Anais. 29º Reunião Anual de Pavimentação. v 1. Cuiabá – MT, 23 à 27 de setembro de 1995. p 146 – 151.
- FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS – Sistema de Gestão da Qualidade. Departamento de Apoio e Controle Técnico. Manual da Qualidade. **“CCR – Preparação em Laboratório”**. Edição 01. Ano: 02/05/2002.
- FHWA. **“Accelerated Rigid Paving Techniques”**. *Special Project 201*, FHWA-SA-94-080, 1994.
- GALLO, D. F. e PADILHA, J. O. **“Experiências em la Pavimentacion com Concreto Compactado com Rodillo en México”**. Anais da 25º Reunião Anual de Pavimentação, São Paulo – SP. 1991.
- GAGNÉ, R. **“Proportioning for Non-Air-Entrained RCCP”**. *Concrete International*, Vol.21, No. 5, Ano 1999, pp. 37-41.
- GENTILE, G. **“Study, Preparation and Placement of Low Cement Concrete, with Special Regard to its Use in Solid Gravity Dams”**. VIII International congress of Large Dams, Edinburgh – Great Britain. Volume 03. Maio – 1964. Pág. 265.
- GHAFOORI, N., CAI, Y. **“Laboratory-Made Roller Compacted Concretes Containing Dry Bottom Ash: Part I – Mechanical Properties”**. *ACI Materials Journal*, V. 95, Nº 2, March – April 1998. Pág. 121 – 130.

- GHAFOORI N., BUCHOLC J. “**Properties of High-Calcium Dry Bottom Ash Concrete**”. ACI Materials Journal, Vol 94, No 2. March-April 1997, pp 90-101.
- GHAFOORI, N., BAHR, W. “**Large-Scale Field Utilization of Illinois PCC Bottom Ash for Roadways and Parking Lots of a Youth, Sport, Safety Complex**”. Final Technical Report. Southern Illinois University. June 15, 1998 Through January 1, 2000.
- GOLDEN, D. M. (1997), “**U.S. Power Industry’s Activities to Expand Coal Ash Utilization**”. presented at the TRB 76<sup>th</sup> Annual Meeting, Washington. 19 pp.
- GOMEZ, J. D. “**Roller Compacted Concrete for Highway Applications**”. PhD dissertation. Purdue University. Dec. 1987.
- GONSALVES, R. “**Uso do Ultra-som na Avaliação de Materiais**”. Jornal da UNICAMP. Edição 228. 8 a 14 de setembro 2003.
- GRUPO DE ESPECIALISTAS EM PAVIMENTAÇÃO DA ABCP (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND). “**PR - 2 - Controle Tecnológico da Qualidade da Camada de Concreto Rolado**”. São Paulo – SP.
- HOLANDA, F. G., CARVALHO, J. L. V., and MENDONÇA, J. E. F. de. “**Diretrizes para Procedimento de Dosagem de Concreto Compactado a Rolo (CCR)**”. Anais IBRACON: 35° REIBRAC. Brasília – 21 a 25 de Junho de 1993.
- HURTADO DÍAZ, P. S. “**Parâmetros de Dosagem do Concreto Compactado a Rolo para Pavimentação**”. Tese apresentada à escola politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia. São Paulo, 1993.
- JOFRÉ, C. et. al. “**RCC Pavements in Spain**”. International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Proceedings. West Lafayette, 1989.
- JOFRÉ, C. et. al. “**Roller Compacted Concrete (RCC) Pavements for Motorways and Main Highways: the Spanish practice**”. En 6º Simpósio International

sobre Carreteras de Hormigón. General Report Seminar, Madrid. Out. 1990. p. 155 – 165.

JOSA, A.; RUIZ, J. M.; CARRASCÓN, S. and BOLLATI, R. **“Estudio Experimental Del Modulo de Deformacion Del Hormigón Compactado con Rodrillo”**. En: 6º Simposio International sobre Carreteras de Hormigón. Madrid. Out. – 1990. p 61 – 72.

KEIFER, O. **“Corps of Engineers Experience with RCC Paviments”**. In: Roller Compacted Concrete. By K.D. Hansen and L> K. Guice. ASCE, New York. 1988. p 429 – 437.

KIARA, Y. **“O Estudo das Cinzas Volantes Brasileiras”**. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica. Anais. Criciúma – SC, Abril de 1985.

KOPPELMAN, L. E. and TANENBAUM, E. G. **“The Potential for Beneficial Use of Waste-to-Energy Facility Ash: Engineering Properties”**. New York State energy research and development authority. Volume 4. July, 1993.

KOKUBU, K.; CABRERA, J. G., AND UENO, A. **“Compaction Proprieties of Roller Compacted Concrete”**. Department of civil Engineering, Tokio Metropolitan University, Tokio, Japan and Civil Engineering Materials Units, Department of civil Engineering University of Leeds. 27 November 1995.

KOKUBO, K., CABRERA, J. G., UENO, A., **“Compaction Proprieties of Roller Compacted Concrete”**. Cement & Concrete Composites – Elsevier Science Limited – Great Britain. 1996. p. 109 – 117.

MALHOTRA, V. M.; & CARINO, N. J., **“CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete”**. CRC Press, Boston, 1991, 343 pp.

MARGON, P. V. **“Influências do Uso das Cinzas de Carvão Mineral de Termelétricas em Argamassa de Revestimento: Dosagem por Curvas Granulométricas”**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil pelo

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002. 127 p.

MARCHAND, J., BOISVERT, S., TREMBLAY, J. PIGEON, M. “**Air entrainment in no slump mixes**”. Concrete International, April, 1998.

MARQUES, G. L. O. “**Procedimentos de Avaliação e Caracterização de Agregados Minerais Usados na Pavimentação Asfáltica**”. 1º Seminário de Qualificação Acadêmica ao Doutorado, COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. “**Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**”. São Paulo: Pini, 1994.

MENEGUETTI, L. C. “**Avaliação da Resistência à Compressão de Concretos nas Primeiras idades Através do Ultra-som**”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999. 163 p.

MESQUITA, J. C. “**Pavimento Rígido como Alternativa Econômica para Pavimentação Rodoviária – Estudo de Caso: Rodovia BR 262, Miranda – Morro do Azeite (MS)**”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001. 135 p.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DIRETORIA DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO – IPR. DIVISÃO DE CAPACITAÇÃO TECNOLÓGICA. “**Pavimentação – Sub-Base de Concreto de Cimento Portland Compactada com Rolo (Sub-Base de Concreto Rolado): DNER – ES 322/97**”. Ano 1997. p 01 – 09.

\_\_\_\_\_, “**Pavimento rígido – Pavimento de Concreto de Cimento Portland, compactado com Rolo: Especificação de Serviço.DNIT 059/2004 - ES**”. Ano 2004. p 01 – 11.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DIRETORIA DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO – ESPECIFICAÇÕES PARTICULARES DE PROJETO. “Rodovia BR – 101/SC, Trecho DIV. PR/SC – SC/RS, Subtrecho entre BR 280 e SC 470, Segmento KM57 – KM 112, PNV 101 bsc 3870/3931”.

NAIMAK, T. N. **“Use of Roller Compacted Concrete (RCC) in Norway”**. En: 6º Simpósio Internacional sobre Carreteras de Hormigón. Madrid. Out, 1990. p. 115 – 123.

NAIK, T. R.; MALHOTRA, V. M. **“The Ultrasonic pulse velocity method. In: Handbook on Non-Destructive Testing of Concrete”**. V. m. Malhotra and N. J. Carino, Eds. CRC Press, Boston, Chap. 7, 1991, pp 169 – 188.

NANNI, A.; LUDWIG D., and SHOENBERGER J. **“Roller compacted concrete for highway pavements”**. Concrete International, p.33 – 38, may, 1996.

NARDI, J. V. **“Cinza: uma Alternativa na Construção de Pavimentos – Noções Gerais”**. 23º Reunião Anual de Pavimentação. Anais. Volume 01. 03 a 07 de outubro de 1988. p. 287 – 310.

NEVILLE, A. M. **“Propriedades do concreto”**. São Paulo: Pini, 1997.

**“Notice to Contractors and Special Provisions for Construction on States Highway in Marin County in Marin at Route 1/101 Separation: District 04, Route 1”**. State Of California: Department Of Transportation: Contract N° 04-201904. May 8, 2000.

OLIVEIRA, P. J.; SALLES, F. M.; ANDRIOLO, F. R. **“Studies of Various types of RCC Mix Designs – Laboratory Test Results, Proceedings of the International Symposium Held in Santander”**. Spain, on 2 – 4 october 1995. Vol. One. Ed IECA – CNEGP, 1995.

- PASKO, T. J. Jr, **“Pavements: Past, Present and Future”**, Concrete International, Vol 20. N. 5, May 1998, pp. 47 – 52.
- PAULON, V. A.; DALMOLIN, D.; FILHO, J. M.; ANDRADE, W. P.  
**“Caracterização do Concreto Compactado com Rolo em Laboratório”**. e-Mat – Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil. Vol. 1. nº 1. pág. 66 – 78. Maio de 2004.
- PCA 2004. **“Guide Specification for Construction of Roller Compacted Concrete Pavements”**. Portland Cement Association. 2004. 08 pág.
- PETRUCCI, E. G. R. **“Concreto de Cimento Pórtland”**. 8º Edição atualizada e revisada. Editora Globo, 1981.
- PIAZZA, J. L., RUI, V. **“Comportamento das Cinzas Pesadas de Carvão Mineral como Substituto da Areia Quartzosa em Argamassa”**. In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais. Vitória – ES. 1999. p 389 – 401.
- PIGGOTT, S. A. **“Roller Compacted Concrete for Heavy-Duty Pavements: Past Performance, Recent Projects, and Recommended Construction Methods”**. TRR 1062. Mar. – 1986. p. 7 – 12.
- PITTA, M. R. **“Concreto Rolado: Uma Solução Econômica e Durável para a Pavimentação Urbana”**. Seminário Técnico Sobre Pavimentação Urbana à Base de Cimento. São Paulo – 11 de setembro de 2002.
- PITTA, M. R. & HURTADO DIAZ, P. S. **“Estado-del-Arte de Los Pavimentos de concreto Compactado com Rodillo”**. Simpósio sobre Pavimentos de Concreto – Anais. Caracas, 1991. p. 605 – 633.
- PITTMAN, D. W. **“Construction of Roller Compacted Concrete Pavements”**. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Vicksburg, Mississippi, Aug. 1985.



PITTMAN, D. W. **“Construction of Roller Compacted Concrete Pavements”**. TRR 1062, Mar. – 1986. p. 12 – 32.

POZZOBON, C. E. **“Aplicações Tecnológicas para a Cinza do Carvão Mineral Produzida no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda”**. Mestrado em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999. 122 p.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION - PCA. **“Cement-Treated Aggregate Base”**. Report No. SR221.01S, Skokie, Illinois, 1979.

PRUDÊNCIO JR, L. R. **“Tecnologia do Concreto de Cimento Portland”**. Núcleo de pesquisa em construção. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – SC, 1999.

RAVINDRARAJAH, R. S.; **“Evaluatino of compressive Strength for High-Strength Concrete by Pulse Velocity Method”**. NONDESTRUCTIVE TESTING OF CONCRETE ELEMENTS AND STRUCTURES: Proceeding of Sessions sponsored by the Engeneering Mechanics Division of the American Society of Civil Engineer in conjunction with the Structures Congress San Antonio, Texas, Edited by Farhad Ansari and Stein Sture, 1992, pp 115 – 126.

RIBEIRO, A. C. Bittencourt, **“Estudos de composição e caracterização do betão compactado com cilindros (BCC)”**. relatórios 57/97 – NAB, Lisboa, Ed. LNEC, Março, 1997.

RIBEIRO, A. C. B.; ALMEIDA, I. R. **“Study on high performance roller compacted Concrete”**. Materials and Structure – RILEM, Vol. 33, pp 398 - 402 , July 2000.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D. Y.; E KENNEDY, T. W. **“Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction”**. NAPA Research and Education Foundation, Lanham, Maryland, 1996, 2º edição. NCAT.

- ROCHA, J. C.; CHERIAF, M.; POZZOBON, C.; MAIA, M. S.; MAGRI, L.; XAVIER, S. M. T. **“Reaproveitamento das Cinzas Pesadas do Complexo Jorge Lacerda na Elaboração de Materiais de Construção: Aspectos Tecnológicos e Ambientais”**. XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu - 17 a 22 de Outubro de 1999.
- ROCHA, J. C. **“Alternativas para a construção civil – Quantum: habitação”**. Boletim educativo do núcleo de comunicação do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – agosto de 2003. ano 2 nº 1. 2 pág.
- ROLLINGS, R. S. **“Design of Overlays for Rigid Airport Pavements”**. Federal Aviation Administration. Final Report, Apr. 1988.
- SANCHES, J. G. B.; FORTES, R. M.; NETO, A. Z.; ASSUMPÇÃO, S. M. **“High Performance Concrete for Pavement”**. Second International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavement and Technological Control. Auburn, Alabama, USA. July 29 – August 1, 2001.
- SANTANA, H. **“Análise Crítica da ABNT TB – 7/1953 – Terminologia e Classificação de Pavimentação – Tendo em Vista Vias Urbanas”**. Anais. 6º Reunião de pavimentação urbana. Santos – SP, 18 à 20 de Abril de 1995. p 297 – 326.
- SANTOS, F. I. G.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M.; LENZI, E. J. **“Avaliação de Resíduos para uso em Argamassas – Estudo com Cinza Pesada”**. I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. 18-21 julho 2004, São Paulo.
- “South Carolina Department of Transportation (SCDOT)”**. Supplemental Specifications: Roller Compacted Concrete Pavement, Draft. 2001
- SWAMY, R. N. **“Fly Ash An Slag: Standards and Specifications Help or Hidrance? Materials and Structures”**. RILEM 26. 200 –213, 1993. p 600 – 613.

SOUZA, M. L. de. **“Pavimentação Rodoviária”**. Livros Técnicos e Científicos: DNER – Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 1980.

**“Standard Specifications: for Subdivisional Development”**. Engineering and Technical Services – City of Canning: Austrália. December 2000.

TANGO, C. E. S. **“Fundamentos de dosagem do concreto para blocos estruturais”**, 5º International Seminar on Structural Masonary for Developing Countries, Florianópolis – Brazil. 21 – 24 August, 1994.

TRICHÊS, G. **“Concreto Compactado a Rolo para Aplicação em Pavimentação – Estudo do Comportamento na Fadiga e Proposição de Metodologia de Dimensionamento”**. Tese de Doutorado. ITA/RJ. São José dos Campos – 1993.

UFRGS/Centro de Ecologia. **“Carvão e Meio Ambiente”**. Universidade Federal do rio Grande do Sul – Porto Alegre: Ed. Universidade, p 467. Ano 2000.

VIZZONI, R. **“Anel Viário de São Paulo em Concreto: Uma Luta de Êxitos”**. Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. Outubro de 2004.

WHITE, T. D. **“Mix Desing, Thickenss Design, and Construction of Roller Compacted Concrete Pavement”**. TRR 1062. Mar. – 1986. p 1 – 6.

WHITING, D.; NAGI, M.; and OKAMOTO, P. A. **“Early Strength Gain of Rapid Highway Repair Concrete”**. *Concrete International*, Vol. 16, No. 8, Georgia, 1994.

WOODS, K. B. **“Highway Engeineering Handbook”**. McGraw Hill. New York, 1960.

ZUAZO, I. Z. **“Pavimentos de hormigón compactado con rodillo en vías de baja intensidad de tráfico en Bizkaia”**. Cemento – Hormigon, Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, Barcelona – Espanha, 1997.

**SITES ÚTEIS:**

[www.abcp.com.br](http://www.abcp.com.br)

[www.artba.org](http://www.artba.org)

[www.cement.org/pavements/pv\\_rcc.asp](http://www.cement.org/pavements/pv_rcc.asp)

[www.ciment.ca/cement.nsf](http://www.ciment.ca/cement.nsf)

[www.dner.gov.br](http://www.dner.gov.br)

[www.mississippiconcrete.com/rollercompacted.cfm](http://www.mississippiconcrete.com/rollercompacted.cfm)

[www.brasilengenharia.com.br](http://www.brasilengenharia.com.br)

[www.enfoque.com](http://www.enfoque.com)



**Tabela A1** – Faixas granulométricas usadas no Brasil para o CCR

FAIXAS GRANULOMÉTRICAS NO BRASIL - CCR									
Peneiras (mm)	SP 55: Cubatão - Pedro Taques (SP)		DNIT 059/2004 - ES		SC 438: Guatá - Alto da Serra (SC)		BR-101/SC: km 57 - km 112		
	25	94	100	82	92	78	90	95	100
19	75	90	74	84	60	75	75	94	
12,5	60	75	64	74	50	65	60	79	
9,5	45	60	58	68	40	55	45	64	
6,3	37,5	52,5	50	60	35	50	37,5	54,5	
4,75	30	45	45	55	30	45	30	45	
2,4	20	35	35	45	20	40	20	35	
1,2	15	30	27	37	10	30	15	28	
0,6	10	25	20	30	6	20	10	20	
0,3	6	15	15	25	3	10	5	15	
0,15	3	10	11	21	0	7	0	10	
0,075	0	5	8	18	0	5	0	5	

**Tabela A2** – Faixas granulométricas usadas no mundo para o CCR

FAIXAS GRANULOMÉTRICAS NO MUNDO - CCR										
Peneiras (mm)	City of Columbus (2003)		South Carolina Department of Transportation (2001)		City of Canning - Austrália (2000)		PCA (2004)		Department of Transportation to the California - EUA (2000)	
	25	100	100	100	100	100	100	100	100	100
19	85	100	90	100	95	100	90	100	95	100
12,5	70	90	71	90	77,5	90	75	92,5	92,5	100
9,5	60	85	57	80	60	80	60	85	90	100
4,75	40	70	40	60	40	60	40	60	45	95
2,4	27,5	55	30	50	30	45	30	50	25	60
1,2	15	40	20	40	20	35	20	40	---	---
0,6	---	---	13	30	13	27	15	31	---	---
0,3	---	---	10	25	8	20	11	23	8	30
0,15	5	20	5	15	5	14	6	18	4	22,5
0,075	2	8	2	9	5	11	2	8	0	15

Tabela A3 – Massa específica do CCR

CCR - MASSA ESPECÍFICA						
Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de Cinza Pesada (%)	Nº do Molde	Tara do Molde (Kg)	Massa Compactada + Tara (Kg)	Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )	Valor médio (kg/dm <sup>3</sup> )
80,00	0,0	1	5,50	18,00	2,36	2,37
		2	6,64	19,24	2,38	
	25,0	1	6,52	19,03	2,36	2,36
		2	6,51	19,03	2,36	
	50,0	1	5,50	18,74	2,50	2,40
		2	6,64	18,83	2,30	
	100,0	1	6,52	18,31	2,23	2,23
		2	6,51	18,38	2,24	
120,00	0,0	1	5,50	18,65	2,48	2,44
		2	6,64	19,36	2,40	
	25,0	1	6,52	18,90	2,34	2,34
		2	6,51	18,93	2,34	
	50,0	1	5,50	17,19	2,21	2,21
		2	6,51	18,28	2,22	
	100,0	1	6,52	18,74	2,31	2,30
		2	6,64	18,80	2,29	
160,00	0,0	1	6,52	19,29	2,41	2,39
		2	6,64	19,19	2,37	
	25,0	1	5,50	17,93	2,35	2,34
		2	6,62	18,99	2,33	
	50,0	1	5,45	17,48	2,27	2,25
		2	6,12	17,98	2,24	
	100,0	1	5,50	17,19	2,21	2,19
		2	6,62	18,14	2,17	

Tabela A4 – Influencia da cinza pesada na massa específica aparente seca máxima do CCR

INFLUENCIA DA CINZA PESADA NA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA MÁXIMA DO CCR		
Consumo de Cimento (Kg/m <sup>3</sup> )	Teor de Cinza Pesada (%)	Massa Específica Aparente Seca Máxima (kg/dm <sup>3</sup> )
0	0	2,05
	25	2,17
	50	2,13
	100	1,99
80	0	2,21
	25	2,20
	50	2,17
	100	2,09
120	0	2,21
	25	2,19
	50	2,14
	100	2,07
160	0	2,19
	25	2,17
	50	2,18
	100	2,04

Tabela A.5 – Dados experimentais obtidos no ensaio de compactação das misturas sem cimento

Consumo de cimento (Kg/m <sup>3</sup> )	Teores de cinza pesada (%)	Teor de unidade teorico (h%)	Teor de unidade real (h%)						Mistura compactada				Massa específica (Kg/dm <sup>3</sup> )				
			Massa inicial (g)		Massa final (g)		Tara das capsulas (g)		h% Real		Amostra 01 (Kg)	Amostra 02 (Kg)		Amostra 01	Amostra 02		
			Capsula 01	Capsula 02	Capsula 01	Capsula 02	Capsula 01	Capsula 02	Capsula 01	Capsula 02						Média	
0,00	0,00	4,00	137,00	140,00	132,60	134,80	15,50	15,70	3,76	4,37	4,06	14,05	13,87	2,14	2,09	<b>2,03</b>	
		5,50	129,00	114,20	108,90	23,50	24,50	4,56	6,28	<b>5,42</b>	14,11	14,10	2,15	2,15	2,15	<b>2,04</b>	
		7,00	127,80	123,80	120,90	117,30	22,10	24,50	6,98	7,00	<b>6,99</b>	14,23	14,35	2,18	2,21	2,21	<b>2,05</b>
		8,50	145,00	157,90	132,80	150,70	24,40	26,90	11,25	5,82	<b>8,54</b>	14,37	14,35	2,22	2,21	2,21	<b>2,04</b>
		10,00	149,10	155,40	136,90	143,90	22,20	22,80	10,64	9,50	<b>10,07</b>	14,35	14,37	2,21	2,22	2,22	<b>2,01</b>
	25,00	4,00	116,50	134,90	113,60	129,70	14,80	30,50	2,94	5,24	<b>4,09</b>	14,32	14,37	2,20	2,20	2,22	<b>2,12</b>
		5,50	135,80	126,50	131,60	119,80	23,50	24,50	3,89	7,03	<b>5,46</b>	14,45	14,56	2,24	2,24	2,26	<b>2,13</b>
		7,00	141,60	133,40	132,40	127,60	22,10	24,50	8,34	5,63	<b>6,98</b>	14,89	14,76	2,34	2,31	2,31	<b>2,17</b>
		8,50	138,00	149,20	129,70	138,90	24,40	26,90	7,88	9,20	<b>8,54</b>	15,02	14,73	2,37	2,30	2,30	<b>2,16</b>
		10,00	146,40	145,10	135,60	133,40	22,20	22,80	9,52	10,58	<b>10,05</b>	14,96	14,98	2,36	2,36	2,36	<b>2,15</b>
50,00	4,00	126,30	126,10	123,40	120,70	18,50	15,20	2,76	5,12	<b>3,94</b>	14,31	14,26	2,20	2,19	2,19	<b>2,11</b>	
	5,50	139,20	135,70	133,60	129,40	23,50	24,50	5,09	6,01	<b>5,55</b>	14,49	14,45	2,25	2,24	2,24	<b>2,12</b>	
	7,00	127,80	126,70	120,80	120,00	22,10	24,50	7,09	7,02	<b>7,05</b>	14,64	14,63	2,28	2,28	2,28	<b>2,13</b>	
	8,50	138,10	142,80	129,30	133,50	24,40	26,90	8,39	8,72	<b>8,56</b>	14,66	14,67	2,29	2,29	2,29	<b>2,11</b>	
	10,00	179,00	172,30	164,50	159,10	22,20	22,80	10,19	9,68	<b>9,94</b>	14,70	14,72	2,30	2,30	2,30	<b>2,09</b>	
	100,00	4,00	112,80	125,30	110,20	119,80	16,80	14,80	2,78	5,24	<b>4,01</b>	13,62	13,69	2,03	2,05	2,05	<b>1,96</b>
		5,50	134,30	145,00	128,30	138,70	23,50	24,50	5,73	5,52	<b>5,62</b>	13,84	13,82	2,09	2,08	2,08	<b>1,97</b>
		7,00	132,80	124,30	125,10	117,90	22,10	24,50	7,48	6,85	<b>7,16</b>	14,05	14,02	2,14	2,13	2,13	<b>1,99</b>
		8,50	133,10	126,00	124,90	118,07	24,40	26,90	8,16	8,70	<b>8,43</b>	14,10	14,12	2,15	2,15	2,15	<b>1,98</b>
		10,00	146,70	153,40	135,70	140,80	22,20	22,80	9,69	10,68	<b>10,18</b>	14,16	14,22	2,16	2,16	2,18	<b>1,97</b>

0,00



Tabela A6 – Dados experim entais obtidos no ensaio de compactação das misturas com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento

Consumo de cimento (Kg/m <sup>3</sup> )	Teores de cinza pesada (%)	Teor de unidade teorico (h%)	Teor de unidade real (h%)						h% Real				Mistura compactada				Média	
			Massa inicial (g)		Massa final (g)		Tara das capsulas (g)		Capsula 01	Capsula 02	Média	Amostra 01 (Kg)		Amostra 02 (Kg)		Amostra 01		Amostra 02
			Capsula 01	Capsula 02	Capsula 01	Capsula 02	Capsula 01	Capsula 02				01 (Kg)	02 (Kg)	01	02			
	0,00	4,00	135,00	139,90	130,30	134,90	15,30	15,70	4,09	4,19	<b>4,14</b>	17,55	18,46	2,27	2,23	<b>2,16</b>		
		5,50	131,60	113,80	126,00	109,20	23,30	24,50	5,46	5,43	<b>5,45</b>	16,21	16,21	2,29	2,29	<b>2,17</b>		
		7,00	129,90	123,80	122,70	117,20	22,10	24,50	7,16	7,12	<b>7,14</b>	16,69	16,63	2,38	2,37	<b>2,21</b>		
		8,50	149,40	161,70	139,60	151,30	24,40	26,90	8,51	8,36	<b>8,43</b>	16,64	16,70	2,37	2,38	<b>2,19</b>		
		10,00	153,20	156,10	141,40	144,20	22,20	22,80	9,90	9,80	<b>9,85</b>	16,60	16,72	2,36	2,38	<b>2,16</b>		
80,00	25,00	4,00	117,50	133,90	113,50	129,80	14,80	30,50	4,05	4,13	<b>4,09</b>	17,32	18,43	2,23	2,23	<b>2,14</b>		
		5,50	137,80	125,60	131,80	120,30	23,50	24,50	5,54	5,53	<b>5,54</b>	16,14	16,20	2,27	2,28	<b>2,16</b>		
		7,00	140,60	133,90	132,40	127,20	22,10	24,50	7,43	6,52	<b>6,98</b>	16,33	16,61	2,35	2,36	<b>2,20</b>		
		8,50	139,00	149,30	128,80	139,20	24,40	26,90	9,77	9,17	<b>9,47</b>	16,50	16,58	2,34	2,36	<b>2,15</b>		
		10,00	147,90	145,70	136,60	133,50	22,20	22,80	9,88	11,02	<b>10,45</b>	16,48	16,50	2,34	2,34	<b>2,12</b>		
80,00	50,00	4,00	127,80	126,30	123,70	121,60	18,50	15,20	3,90	4,42	<b>4,16</b>	17,25	18,38	2,22	2,22	<b>2,13</b>		
		5,50	139,40	135,80	133,20	129,80	23,50	24,50	5,65	5,70	<b>5,67</b>	16,05	16,14	2,26	2,27	<b>2,14</b>		
		7,00	127,60	126,10	120,60	119,50	22,10	24,50	7,11	6,95	<b>7,03</b>	16,40	16,42	2,32	2,33	<b>2,17</b>		
		8,50	138,60	143,60	129,60	134,50	24,40	26,90	8,56	8,46	<b>8,51</b>	16,43	16,58	2,33	2,36	<b>2,16</b>		
		10,00	181,00	175,30	166,40	161,30	22,20	22,80	10,12	10,11	<b>10,12</b>	16,33	16,38	2,31	2,32	<b>2,10</b>		
80,00	100,00	4,00	111,80	124,30	108,10	119,70	16,80	14,80	4,05	4,39	<b>4,22</b>	16,62	17,67	2,10	2,09	<b>2,01</b>		
		5,50	133,30	144,00	127,60	137,80	23,50	24,50	5,48	5,47	<b>5,47</b>	15,33	15,43	2,12	2,14	<b>2,02</b>		
		7,00	132,80	124,30	125,40	117,70	22,10	24,50	7,16	7,08	<b>7,12</b>	15,87	16,00	2,22	2,25	<b>2,09</b>		
		8,50	133,10	126,00	124,50	118,20	24,40	26,90	8,59	8,54	<b>8,57</b>	15,98	16,02	2,24	2,25	<b>2,07</b>		
		10,00	147,70	153,60	136,30	141,80	22,20	22,80	9,99	9,92	<b>9,95</b>	15,97	15,99	2,24	2,25	<b>2,04</b>		

Tabela A7 – Dados experim entais obtidos no ensaio de compactação das misturas com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento

Consumo de cimento (Kg/m <sup>3</sup> )	Teores de cinza pesada (%)	Teor de unidade teorico (h%)	Teor de unidade real (h%)										Mistura compactada				Média	
			Massa inicial (g)		Massa final (g)		Tara das capsulas (g)		h% Real		Amostra 01 (Kg)		Amostra 02 (Kg)		Amostra 01	Amostra 02		Média
			Capsula 01	Capsula 02	Capsula 01	Capsula 02	Capsula 01	Capsula 02	Capsula 01	Capsula 02	Amostra 01 (Kg)	Amostra 02 (Kg)	Amostra 01	Amostra 02				
	0,00	4,00	150,70	134,20	145,60	129,60	16,10	15,20	3,94	4,02	<b>3,98</b>	17,38	18,54	2,24	2,25	<b>2,16</b>		
		5,50	143,20	138,60	136,30	132,30	23,80	23,20	6,13	5,77	<b>5,95</b>	16,28	16,46	2,30	2,33	<b>2,19</b>		
		7,00	144,30	152,00	136,40	143,40	22,90	22,90	6,96	7,14	<b>7,05</b>	16,64	16,61	2,37	2,36	<b>2,21</b>		
		8,50	151,80	155,40	141,30	144,60	24,20	23,60	8,97	8,93	<b>8,95</b>	16,75	16,83	2,39	2,40	<b>2,20</b>		
		10,00	154,60	166,20	142,60	153,30	20,70	21,00	9,84	9,75	<b>9,80</b>	16,68	16,70	2,38	2,38	<b>2,17</b>		
	25,00	4,00	137,30	136,90	132,40	132,10	16,00	15,70	4,21	4,12	<b>4,17</b>	17,32	18,39	2,23	2,22	<b>2,14</b>		
		5,50	146,60	151,20	140,20	144,20	26,80	22,80	5,64	5,77	<b>5,70</b>	16,26	16,18	2,30	2,28	<b>2,16</b>		
		7,00	146,80	150,70	138,80	142,40	24,30	23,00	7,00	6,95	<b>6,98</b>	16,45	16,55	2,33	2,35	<b>2,19</b>		
		8,50	197,70	142,20	183,80	132,90	23,60	22,40	8,68	8,42	<b>8,55</b>	16,68	16,70	2,38	2,38	<b>2,19</b>		
		10,00	164,10	186,10	151,20	170,80	23,00	21,50	10,06	10,25	<b>10,16</b>	16,53	16,65	2,35	2,37	<b>2,14</b>		
120,00	50,00	4,00	122,30	134,90	118,00	130,10	16,50	12,30	4,24	4,07	<b>4,16</b>	16,85	18,13	2,14	2,17	<b>2,07</b>		
		5,50	121,60	133,40	116,50	127,80	23,80	23,30	5,50	5,36	<b>5,43</b>	15,88	15,93	2,22	2,23	<b>2,11</b>		
		7,00	139,30	136,90	131,60	129,40	22,90	22,90	7,08	7,04	<b>7,06</b>	16,21	16,28	2,29	2,30	<b>2,14</b>		
		8,50	142,60	145,00	133,30	135,40	24,30	23,60	8,53	8,59	<b>8,56</b>	16,41	16,34	2,32	2,31	<b>2,13</b>		
		10,00	160,70	154,30	147,90	142,40	20,70	21,20	10,06	9,82	<b>9,94</b>	16,28	16,40	2,30	2,32	<b>2,10</b>		
	100,00	4,00	118,80	117,70	114,70	113,50	14,30	15,80	4,08	4,30	<b>4,19</b>	16,47	17,69	2,07	2,09	<b>2,00</b>		
		5,50	121,40	120,60	116,50	115,50	24,50	22,90	5,33	5,51	<b>5,42</b>	15,50	15,70	2,15	2,19	<b>2,06</b>		
		7,00	120,30	121,40	113,80	114,90	24,60	23,10	7,29	7,08	<b>7,18</b>	15,89	15,86	2,23	2,22	<b>2,07</b>		
		8,50	135,00	130,80	126,40	122,20	26,00	22,40	8,57	8,62	<b>8,59</b>	15,94	16,01	2,24	2,25	<b>2,06</b>		
		10,00	160,60	143,40	147,80	132,20	23,00	21,50	10,26	10,12	<b>10,19</b>	15,86	15,85	2,22	2,22	<b>2,01</b>		



Tabela A8 – Dados experimentais obtidos no ensaio de compactação das misturas com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento

Consumo de cimento (Kg/m <sup>3</sup> )	Teores de cinza pesada (%)	Teor de unidade teorico (h%)	Teor de unidade real (h%)												Mistura compactada				Média
			Massa inicial (g)		Massa final (g)		Tara das capsulas (g)		h% Real		Amostra 01 (Kg)		Amostra 02 (Kg)		Amostra 01	Amostra 02	Média		
			Capsula 01	Capsula 02	Capsula 01	Capsula 02	Capsula 01	Capsula 02	Capsula 01	Capsula 02	01 (Kg)	02 (Kg)	01	02					
	0,00	4,00	123,00	136,10	118,70	130,90	16,40	15,20	4,20	4,49	4,35	18,49	18,56	2,24	2,25	2,15			
		5,50	132,90	124,30	126,70	118,90	23,30	22,90	6,00	5,63	5,81	16,21	16,26	2,29	2,30	2,17			
		7,00	138,50	133,70	131,20	126,30	26,10	23,70	6,95	7,21	7,08	16,51	16,54	2,34	2,35	2,19			
		8,50	152,90	133,80	141,70	123,50	25,20	22,70	9,61	10,22	9,92	16,80	16,82	2,40	2,40	2,18			
		10,00	179,90	184,90	165,60	170,20	25,50	24,80	10,21	10,11	10,16	16,75	16,77	2,39	2,39	2,17			
160,00		4,00	131,50	137,20	126,30	131,70	16,10	15,80	4,72	4,75	4,73	17,29	17,26	2,23	2,22	2,12			
		5,50	139,20	130,00	132,80	123,40	23,30	22,90	5,84	6,57	6,21	15,97	16,15	2,24	2,28	2,13			
		7,00	141,30	140,70	133,00	133,50	26,10	23,70	7,76	6,56	7,16	16,45	16,41	2,33	2,32	2,17			
		8,50	133,90	146,40	125,80	136,20	25,20	22,70	8,05	8,99	8,52	16,51	16,43	2,34	2,33	2,15			
		10,00	155,50	175,50	143,70	162,00	25,50	24,80	9,98	9,84	9,91	16,55	16,57	2,35	2,35	2,14			
	50,00	4,00	120,70	135,90	116,40	130,70	15,60	14,10	4,27	4,46	4,36	17,32	17,39	2,23	2,24	2,14			
		5,50	135,90	127,10	130,00	121,50	23,30	22,90	5,53	5,68	5,60	16,22	16,28	2,29	2,30	2,17			
		7,00	139,70	143,50	132,10	135,50	26,10	23,70	7,17	7,16	7,16	16,47	16,45	2,34	2,33	2,18			
		8,50	157,40	148,20	147,10	138,30	25,20	22,40	8,45	8,54	8,50	16,44	16,49	2,33	2,34	2,15			
		10,00	178,60	179,00	164,80	165,00	25,50	24,80	9,91	9,99	9,95	16,42	16,40	2,33	2,32	2,11			
	100,00	4,00	121,40	126,80	117,10	122,50	13,10	15,30	4,13	4,01	4,07	16,61	16,70	2,10	2,11	2,02			
		5,50	130,80	118,40	125,10	113,40	23,30	22,90	5,60	5,52	5,56	15,42	15,46	2,14	2,15	2,03			
		7,00	133,60	119,60	126,60	113,20	26,10	23,70	6,97	7,15	7,06	15,67	15,65	2,18	2,18	2,04			
		8,50	138,60	122,30	129,70	114,50	25,20	22,40	8,52	8,47	8,49	15,77	15,77	2,20	2,20	2,03			
		10,00	155,30	125,40	143,40	116,20	25,50	24,80	10,09	10,07	10,08	15,86	15,90	2,22	2,23	2,02			

Tabela A9 – Massa específica aparente seca do CCR usado nos CP's cilíndricos de 1,5 x 30 cm com o decorrer do tempo

Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de cinza pesada (%)	CP's	h (%)	massa compactada em cada CP 15x30 cm				massa específica aparente seca CP 15x30cm							
				na modagem (massa + molde)		7 dias		na modagem		1 dia		3 dias		7 dias	
				1 dia	3 dias	1 dia	3 dias	MEAS	MEAS	MEAS	MEAS	MEAS	MEAS	MEAS	MEAS
80,00	0,00	2	7,14	18,64	12,46	12,46	15,52	2,36	2,21	2,35	2,20	2,35	2,19	2,93	2,73
		3	7,14	17,97	12,46	12,46	12,51	2,36	2,21	2,35	2,20	2,35	2,19	2,36	2,20
		6	7,14	18,75	13,06	13,06	13,12	2,48	2,31	2,47	2,30	2,46	2,30	2,48	2,31
120,00	0,00	1	7,48	19,15	12,52	12,52	12,58	2,37	2,21	2,36	2,20	2,36	2,20	2,37	2,21
		4	7,48	19,25	12,59	12,58	12,64	2,39	2,22	2,38	2,21	2,37	2,21	2,39	2,22
		10	7,48	18,74	12,54	12,54	12,58	2,37	2,21	2,37	2,20	2,37	2,20	2,37	2,21
160,00	0,00	3	7,54	18,04	12,54	12,54	12,63	2,38	2,21	2,37	2,20	2,37	2,20	2,38	2,22
		12	7,54	19,25	12,69	12,55	12,75	2,41	2,24	2,39	2,23	2,37	2,20	2,41	2,24
		2	7,54	18,84	12,67	12,62	12,74	2,40	2,23	2,39	2,22	2,38	2,22	2,40	2,24

Tabela A10 – Massa específica aparente seca do CCR usado nos CP's prismáticos 15 x 15 x 50 cm com o decorrer do tempo

Consumo de cimento (Kg/m <sup>3</sup> )	Teor de cinza pesada (%)	CP's	h (%)	massa compactada em cada CP 15x15x50 cm			massa específica aparente seca 15x15x50 cm								
				na modagem (massa + molde)	1 dia (massa)	3 dias	7 dias	na modagem		1 dia		3 dias		7 dias	
								MEA	MEAS	MEA	MEAS	MEA	MEAS	MEA	MEAS
80,00	0,00	1	7,14	60,28	26,77	26,82	26,86	2,58	2,40	2,38	2,22	2,38	2,23	2,39	2,23
		2	7,14	59,72	26,65	26,66	26,67	2,38	2,23	2,37	2,21	2,37	2,21	2,37	2,21
		3	7,14	59,58	26,5	26,55	26,59	2,37	2,21	2,36	2,20	2,36	2,20	2,36	2,21
120,00	0,00	1	7,48	59,58	26,2	27,11	26,25	2,51	2,34	2,33	2,17	2,41	2,24	2,33	2,17
		2	7,48	59,18	26,24	26,73	26,89	2,34	2,17	2,33	2,17	2,38	2,21	2,39	2,22
		3	7,48	59,8	27,02	27,19	26,28	2,39	2,22	2,40	2,23	2,42	2,25	2,34	2,17
160,00	0,00	1	7,54	59,6	26,2	26,89	26,36	2,51	2,34	2,33	2,17	2,39	2,22	2,34	2,18
		2	7,54	60,06	26,24	26,71	26,38	2,42	2,25	2,33	2,17	2,37	2,21	2,34	2,18
		3	7,54	59,24	27,02	26,9	27,16	2,34	2,18	2,40	2,23	2,39	2,22	2,41	2,24

Tabela A11 – Resistência à compressão do CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento

Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	% de Cinza Pesada	IDADE PARA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (dias)									
		3		7		14		28		90	
80,00	0,00	1,31	1,49	2,85	2,63	3,23	3,35	3,76	3,71	4,25	3,96
		1,59		2,80		3,53		3,43		3,93	
		1,57		2,24		3,28		3,93		3,71	
	25,00	xxx		2,58	2,07	3,18	3,21	4,60	4,52	6,59	7,10
		xxx		1,59		3,11		4,80		6,30	
		xxx		2,03		3,35		4,15		8,20	
	50,00	xxx		3,09	2,87	5,28	4,58	5,43	6,29	7,90	9,07
		xxx		2,74		3,49		6,14		9,54	
		xxx		2,77		4,97		7,31		9,78	
	100,00	xxx		2,99	2,89	4,58	4,40	7,35	7,03	10,62	9,77
		xxx		2,82		4,22		6,49		9,68	
		xxx		2,85		4,40		7,25		9,00	

Tabela A12 – Resistência à compressão do CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento

Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	% de Cinza Pesada	IDADE PARA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (dias)									
		3		7		14		28		90	
120,00	0,00	3,51	3,34	4,91	5,00	6,81	7,06	8,19	7,80	9,68	9,10
		2,97		4,94		7,51		6,90		8,96	
		3,56		5,15		6,85		8,31		8,66	
	25,00	xxx		3,39	3,65	5,79	5,64	8,49	8,30	10,28	10,52
		xxx		3,87		5,51		8,18		10,56	
		xxx		3,70		5,64		8,22		10,71	
	50,00	xxx		8,34	7,26	8,85	8,95	8,84	9,73	13,32	12,97
		xxx		6,74		8,24		10,28		13,51	
		xxx		6,71		9,75		10,06		12,09	
	100,00	xxx		5,15	5,02	6,81	7,09	9,89	10,46	13,25	13,31
		xxx		4,74		6,32		11,02		12,51	
		xxx		5,19		8,15		10,47		14,17	

Tabela A13 – Resistência à compressão do CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento

Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	% de Cinza Pesada	IDADE PARA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (dias)									
		3		7		14		28		90	
160,00	0,00	4,37	4,72	10,23	10,62	11,01	11,51	11,44	11,46	13,01	13,65
		4,91		10,39		10,62		14,19		14,74	
		4,88		11,04		12,90		8,76		13,20	
	25,00	xxx		8,71	9,65	9,43	10,76	13,70	14,05	15,42	15,96
		xxx		11,80		13,75		13,81		16,37	
		xxx		8,44		9,10		14,64		16,09	
	50,00	xxx		10,16	9,66	12,16	12,26	15,40	14,81	19,06	18,73
		xxx		8,99		12,69		13,62		18,96	
		xxx		9,84		11,93		15,42		18,19	
	100,00	xxx		6,61	5,80	8,10	7,39	15,67	15,20	17,64	17,68
		xxx		5,54		6,33		14,34		17,36	
		xxx		5,25		7,76		15,58		18,04	

**Tabela A14 – Módulo de elasticidade do CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento**

CIMENTO (Kg/m <sup>3</sup> )	% DE CINZA PESADA	RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE (IDADE)							
		3		7		28	90		
80,00	0,00	1,03	1,12	1,81	1,72	4,73	4,84	5,32	4,90
		1,57		1,96		6,16		4,50	
		0,77		1,39		3,62		4,87	
	25,00	xxx	xxx	xxx	xxx	11,05	10,62	39,29	17,05
		xxx		xxx		11,27		23,44	
		xxx		xxx		9,55		10,66	
	50,00	xxx	xxx	xxx	xxx	12,35	11,59	8,38	12,56
		xxx		xxx		12,15		20,45	
		xxx		xxx		10,26		8,84	
	100,00	xxx	xxx	xxx	xxx	11,05	10,84	10,20	10,96
		xxx		xxx		11,28		12,43	
		xxx		xxx		10,19		10,24	

**Tabela A15 – Módulo de elasticidade do CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento**

CIMENTO (Kg/m <sup>3</sup> )	% DE CINZA PESADA	RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE - Gpa (IDADE)							
		3		7		28	90		
120,00	0,00	1,39	1,51	3,01	3,50	13,58	13,50	14,45	14,09
		1,90		3,34		13,75		14,49	
		1,24		4,15		13,16		13,34	
	25,00	xxx	xxx	xxx	xxx	13,97	13,75	13,03	13,84
		xxx		xxx		13,39		13,83	
		xxx		xxx		13,88		14,67	
	50,00	xxx	xxx	xxx	xxx	13,19	11,40	10,86	11,44
		xxx		xxx		13,33		11,53	
		xxx		xxx		7,68		11,94	
	100,00	xxx	xxx	xxx	xxx	15,88	14,67	14,79	14,72
		xxx		xxx		15,73		14,75	
		xxx		xxx		12,41		14,62	

**Tabela A16 – Módulo de elasticidade do CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento**

CIMENTO (Kg/m <sup>3</sup> )	% DE CINZA PESADA	RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE (IDADE)							
		3		7		28	90		
160,00	0,00	3,39	3,88	7,44	7,54	18,43	18,81	25,35	24,32
		3,62		6,93		19,24		22,83	
		4,64		8,24		18,75		24,79	
	25,00	xxx	xxx	xxx	xxx	21,48	24,33	26,26	27,12
		xxx		xxx		27,07		26,84	
		xxx		xxx		24,45		28,26	
	50,00	xxx	xxx	xxx	xxx	17,29	20,73	25,51	23,42
		xxx		xxx		22,86		26,37	
		xxx		xxx		22,05		18,38	
	100,00	xxx	xxx	xxx	xxx	20,76	19,36	19,47	21,06
		xxx		xxx		18,58		22,44	
		xxx		xxx		18,75		21,28	



**Tabela A17** – Resistência à tração na flexão do CCR após 3 dias de cura em câmara úmida

IDADE DE 03 DIAS PARA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO							
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de cinza pesada (%)	Carga (N)	Distância entre cutelos (l) - mm	Largura média na seção de ruptura (b) -	Altura média na seção de ruptura	Fctm (MPa)	Fctm médio(MPa)
80	0,00	900	450	150	150	0,12	<b>0,12</b>
		760	450	150	150	0,10	
		940	450	150	150	0,13	
120	0,00	6140	450	150	152	0,80	<b>0,67</b>
		5880	450	151	151	0,77	
		3420	450	149	153	0,44	
160	0,00	10140	450	149	150	1,36	<b>1,39</b>
		10600	450	151	151	1,39	
		10620	450	150	150	1,42	

**Tabela A18** – Resistência à tração na flexão do CCR após 7 dias de cura em câmara úmida

IDADE DE 07 DIAS PARA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO							
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de cinza pesada (%)	Carga (N)	Distância entre cutelos (l) - mm	Largura média na seção de ruptura (b) -	Altura média na seção de ruptura	Fctm (MPa)	Fctm médio(MPa)
80	0,00	2860	450	151	155	0,35	<b>0,36</b>
		2640	450	151	151	0,35	
		2840	450	150	151	0,37	
120	0,00	6220	450	150	150	0,83	<b>0,82</b>
		6400	450	150	152	0,83	
		5960	450	150	150	0,79	
160	0,00	10920	450	149	152	1,43	<b>1,43</b>
		11240	450	151	151	1,47	
		10750	450	151	151	1,41	



**Tabela A19** – Resistência à tração na flexão do CCR após 28 dias de cura em câmara úmida

IDADE DE 28 DIAS PARA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO							
Consumo de cimento (kg/m <sup>2</sup> )	Teor de Cinza Pesada (%)	Carga (N)	Distância entre cutelos (l) - mm	Largura média na seção de ruptura (b) - mm	Altura média na seção de ruptura (d) - mm	Fctm (MPa)	Fctm médio(MPa)
80	0,00	6440	450	150	150	0,86	<b>0,88</b>
		6400	450	150	155	0,80	
		7320	450	150	150	0,98	
	100,00	6720	450	150	150	0,90	<b>0,83</b>
		5560	450	150	154	0,70	
		6760	450	150	151	0,89	
120	0,00	12140	450	151	152	1,57	<b>1,85</b>
		16200	450	150	150	2,16	
		13980	450	149	152	1,83	
	100,00	15260	450	150	151	2,01	<b>2,08</b>
		16320	450	150	152	2,12	
		16020	450	149	151	2,12	
160	0,00	15880	450	149	151	2,10	<b>2,12</b>
		16460	450	150	150	2,19	
		15680	450	149	151	2,08	
	50,00	15209	450	150	152	1,97	<b>2,04</b>
		14662	450	149	151	1,94	
		16888	450	150	152	2,19	

**Tabela A20** – Resistência à tração na flexão do CCR após 90 dias de cura em câmara úmida

IDADE DE 90 DIAS PARA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO							
Consumo de cimento (kg/m <sup>2</sup> )	Teor de cinza pesada (%)	Carga (N)	Distância entre cutelos (l) - mm	Largura média na seção de ruptura (b) - mm	Altura média na seção de ruptura	Fctm (MPa)	Fctm médio(MPa)
80	0,00	6740	450	151	153	0,86	<b>0,91</b>
		7620	450	152	152	0,98	
		6780	450	150	150	0,90	
	100,00	10420	450	150	150	1,39	<b>1,22</b>
		8600	450	150	150	1,15	
		8640	450	151	152	1,11	
120	0,00	17560	450	151	150	2,33	<b>2,34</b>
		18060	450	151	152	2,33	
		17880	450	150	151	2,35	
	100,00	18380	450	154	150	2,39	<b>2,70</b>
		22560	450	152	151	2,93	
		22900	450	154	155	2,79	
160	0,00	18920	450	154	150	2,46	<b>2,58</b>
		20820	450	151	151	2,72	
		19480	450	152	150	2,56	
	50,00	31980	450	150	152	4,15	<b>3,82</b>
		28060	450	150	152	3,64	
		27900	450	150	151	3,67	

**Tabela A21** – Dados experimentais obtidos no ensaio de velocidade de pulso do ultra-som para o CCR com 80 kg/m<sup>3</sup> de cimento

Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de cinza pesada (%)	Idade (dias)	Velocidade de pulso do ultra-som (m/s)		
			vprism-dir	vpris-ind	vcili-dir
80,00	0,00	3	2570	1788	2523
		7	3032	2320	3102
		14	3276	3055	---
		21	3387	3170	---
		28	3392	3220	3551
		56	3504	3498	---
		90	3676	3637	3833
	25,00	3	---	---	---
		7	---	---	---
		14	---	---	---
		21	---	---	---
		28	---	---	---
		56	---	---	---
		90	---	---	---
	50,00	3	---	---	---
		7	---	---	---
		14	---	---	---
		21	---	---	---
		28	---	---	---
		56	---	---	---
		90	---	---	---
	100,00	3	2416	1341	---
		7	2671	2376	---
		14	2958	2976	---
		21	3164	3094	---
		28	3185	3155	3955
		56	3193	3245	---
		90	3460	3343	4124

**Tabela A22** – Dados experimentais obtidos no ensaio de velocidade de pulso do ultra-som para o CCR com 120 kg/m<sup>3</sup> de cimento

Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de cinza pesada (%)	Idade (dias)	Velocidade de pulso do ultra-som (m/s)		
			vprism-dir	vpris-ind	vcili-dir
120,00	0,00	3	3465	3282	3516
		7	3844	3728	3760
		14	4167	3892	---
		21	4222	3977	---
		28	4300	4096	3891
		56	4481	4194	---
		90	4547	4306	4371
	25,00	3	---	---	---
		7	---	---	---
		14	---	---	---
		21	---	---	---
		28	---	---	---
		56	---	---	---
		90	---	---	---
	50,00	3	---	---	---
		7	---	---	---
		14	---	---	---
		21	---	---	---
		28	---	---	---
		56	---	---	---
		90	---	---	---
	100,00	3	3181	2738	---
		7	3402	2905	---
		14	3711	3506	---
		21	3836	3671	---
		28	4013	3660	3952
		56	4083	3963	---
		90	4133	4036	4309

**Tabela A23** – Dados experimentais obtidos no ensaio de velocidade de pulso do ultra-som para o CCR com 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento

Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de cinza pesada (%)	Idade (dias)	Velocidade de pulso do ultra-som (m/s)		
			vprism-dir	vpris-ind	vcili-dir
160,00	0,00	3	3848	3698	3973
		7	3877	3644	3862
		14	4106	3741	---
		21	4142	3901	---
		28	4157	3984	4246
		56	4428	4146	---
		90	4481	4234	4581
	25,00	3	---	---	---
		7	---	---	---
		14	---	---	---
		21	---	---	---
		28	---	---	---
		56	---	---	---
		90	---	---	---
	50,00	3	3303	2857	---
		7	3539	3420	---
		14	4075	3793	---
		21	4084	3870	---
		28	4231	3979	4424
		56	4492	4217	---
		90	4532	4299	4670
	100,00	3	---	---	---
		7	---	---	---
		14	---	---	---
		21	---	---	---
		28	---	---	---
		56	---	---	---
		90	---	---	---