

**ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA EM CAMADAS  
GRANULARES DE PAVIMENTOS –  
ESTUDO LABORATORIAL**

LUCIANA ROHDE

Dissertação apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA.

Porto Alegre  
Março de 2002

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelos Orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação.

---

Prof. Nilo Cesar Consoli  
ORIENTADOR

---

Prof. Washington Peres Núñez  
ORIENTADOR

---

Prof. Francisco P. F. L. Gastal  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

BANCA EXAMINADORA

Prof. Antônio Fortunato Marcon  
Dr. pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Brasil

Prof. Antônio Cezar Faria Vilela  
Dr. Ing. pela Aachen University of Technology, Alemanha

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti  
D.Sc. pela Coordenadoria de Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Brasil

*Aos meus pais, Otávio e Arlete  
e aos meus irmãos,  
Fernando, Miriam e Cristiane.*

## AGRADECIMENTOS

Com muito carinho gostaria de agradecer:

Ao professor Nilo Cesar Consoli, orientador desta dissertação, pela confiança em meu trabalho, pelo apoio incondicional e principalmente pela amizade.

Ao professor Washington Peres Núñez, também orientador desta dissertação, pela extrema doação aos seus orientandos, estando presente em todos os momentos e para todas as dificuldades. Obrigada pelo carinho e respeito e por, às vezes, colocar meus pés no chão. Espero poder contar com tua amizade por muito tempo.

Ao professor Jorge Augusto Pereira Ceratti por ter acreditado na minha capacidade e apostado no meu trabalho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil que, através de seus professores e funcionários, tornam possível o desenvolvimento de pesquisas no CPGEC/UFRGS.

Às equipes do LAPAV e LMS que sempre me apoiaram e deram todo o auxílio necessário, em especial ao Ivan, Croaci, João Diniz e Jair.

Aos amigos da Unidade de Normas e Pesquisas do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul, em especial ao Engenheiro José Augusto de Oliveira e aos técnicos Francisco Almeida e João Marcos, por terem tornado viável a realização de alguns ensaios realizados durante esta pesquisa e, principalmente, pela acolhida maravilhosa que recebi.

Aos colegas do NORIE e do LASID pelo apoio e participação fundamentais ao desenvolvimento desta pesquisa.

Aos bolsistas Letícia Rezende e João Marques pela “força”, carinho e amizade. Espero que em seus caminhos encontrem pessoas tão especiais quanto vocês.

Aos amigos do CPGEC pelo carinho, estímulo e compreensão.

À CAPES, LAPAV e CPGEC-UFRGS pelo apoio financeiro.

À Gerdau Riograndense, à White Martins Gases Industriais S.A. e à Termelétrica de Charqueadas pelo fornecimento dos resíduos industriais.

Às famílias Pecker e Pureur por sempre estarem de braços abertos para me acolher, pelo carinho, pela amizade e pelo convívio familiar. Carol e Márcia: valeu a torcida!

A minha família, por todo o incentivo e apoio. Aos meus pais, Otavio e Arlete, por tudo! Pelo amor, pela dedicação, por me ensinar a buscar meus objetivos e por me ajudar a alcançar meus sonhos. Aos meus irmãos, Fernando, Miriam e Cristiane, pelo carinho, pela paciência, pelo estímulo e pela torcida. Amo muito todos vocês! Vocês são essenciais a minha felicidade.

## SUMÁRIO

Lista de figuras .....	x
Lista de quadros .....	xiii
Lista de tabelas .....	xiv
Resumo .....	xvi
Abstract .....	xvii
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 O PROBLEMA DE PESQUISA .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	4
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	4
2 PROGRAMA DE PESQUISA .....	6
2.1 ETAPAS DA PESQUISA.....	6
2.2 ESQUEMAS DOS ENSAIOS.....	7
2.3 QUADRO DE ENSAIOS.....	8
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	10
3.1 A ESCÓRIA DE ACIARIA.....	10
3.2 A EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA.....	14
3.3 AS PRINCIPAIS APLICAÇÕES DA ESCÓRIA DE ACIARIA.....	17
3.3.1 A escória de aciaria como agregado para pavimentação.....	17
3.3.2 Outras possíveis utilizações.....	24

3.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS .....	26
3.5 A ESTABILIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA .....	29
3.6 IMPACTO AMBIENTAL .....	30
4 MÉTODOS UTILIZADOS .....	32
4.1 AMOSTRAGEM .....	32
4.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....	34
4.3 RESISTÊNCIA À ABRASÃO .....	34
4.4 DENSIDADE REAL DOS GRÃOS .....	35
4.5 ENSAIOS DE DURABILIDADE .....	35
4.6 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO .....	35
4.7 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA .....	35
4.8 ENSAIOS DE EXPANSÃO .....	36
4.9 DOSAGEM DAS MISTURAS DE ESCÓRIA E CINZA .....	37
4.10 DOSAGEM DAS MISTURAS DE ESCÓRIA E CAL .....	37
4.11 DOSAGEM DAS MISTURAS DE ESCÓRIA, CINZA E CAL .....	38
4.12 ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES .....	38
4.13 ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	39
4.14 ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....	39
4.15 ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO .....	40
5 ADITIVOS UTILIZADOS .....	41
5.1 A CAL DE CARBURETO .....	41
5.1.1 Forma de obtenção .....	41
5.1.2 Propriedades físicas .....	42
5.1.3 Propriedades químicas .....	42
5.2 A CINZA PESADA .....	43
5.2.1 Forma de obtenção .....	43

5.2.2 Propriedades físicas .....	45
5.2.3 Propriedades químicas .....	45
5.3 A ÁGUA .....	46
6 ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA COMO AGREGADO PARA PAVIMENTAÇÃO – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	47
6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	47
6.2 GRANULOMETRIA .....	48
6.3 COMPACTAÇÃO E CAPACIDADE DE SUPORTE DA ESCÓRIA ORIGINAL .....	49
6.4 CORREÇÃO GRANULOMÉTRICA .....	51
6.5 COMPACTAÇÃO E CAPACIDADE DE SUPORTE DA EGC .....	53
6.6 DURABILIDADE .....	57
6.7 DENSIDADE E ABSORÇÃO DE ÁGUA .....	58
6.8 RESISTÊNCIA À ABRASÃO .....	59
6.9 EXPANSÃO .....	60
6.10 DEFORMABILIDADE ELÁSTICA .....	64
6.10.1 Comparação entre comportamentos da EGC e de Materiais granulares convencionais .....	69
6.10.2 Análise paramétrica .....	70
7 UTILIZAÇÃO DE ADITIVOS – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	72
7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	72
7.2 GRANULOMETRIA .....	72
7.3 MODIFICAÇÃO COM CAL DE CARBURETO .....	73
7.3.1 Características de compactação da mistura .....	74
7.3.2 Capacidade de suporte .....	75
7.3.3 Resistência à compressão simples .....	75



7.4 MODIFICAÇÃO COM CINZA PESADA .....	76
7.4.1 Características de compactação da mistura .....	76
7.4.2 Capacidade de suporte .....	77
7.4.3 Resistência à compressão simples .....	78
7.5 MODIFICAÇÃO COM CINZA PESADA E CAL DE CARBURETO .....	79
7.5.1 Resistência à compressão simples .....	79
7.5.2 Resistência à tração por compressão diametral .....	82
7.6 DETERMINAÇÃO DA MISTURA ÓTIMA .....	84
7.7 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL .....	86
8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	90
8.1 CONCLUSÕES DA PESQUISA .....	90
8.2 ALGUMAS SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	94

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ensaio com a escória de aciaria .....	7
Figura 2.2 – Ensaio com a misturas escória-cal e escória-cinza .....	8
Figura 2.3 – Ensaio com as misturas contendo escória, cinza pesada e cal de carbureto .....	8
Figura 3.1 – Esquema simplificado da geração de escórias na aciaria elétrica (Geyer, 2000) .....	10
Figura 3.2 – Variação da composição química da escória de aciaria oxidada em função da corrida de produção (Machado, 2000) .....	13
Figura 3.3 – Estruturas dos pavimentos avaliados pelo DER-MG .....	22
Figura 4.1 – Amostragem na pilha de estocagem de escória .....	34
Figura 5.1 – Organograma da forma de obtenção da cal de carbureto (Thomé, 1999) .....	42
Figura 5.2 – Processo de obtenção da cinza pesada e da cinza volante na Usina Termelétrica de Charqueadas (Thomé, 1999) .....	44
Figura 6.1 – Distribuição granulométrica da escória de aciaria em comparação aos limites da Faixa C do DNER .....	48
Figura 6.2 – Curva de compactação típica da escória de aciaria (amostra do Forno, mês 2) .....	49
Figura 6.3 – Variação do ISC com a umidade de compactação (amostra do Forno, mês 2).....	50
Figura 6.4 – Distribuição granulométrica da EGC em comparação aos limites da Faixa C do DNER .....	52
Figura 6.5 – Curvas de compactação das amostras de EGC Misturada estocadas por 4, 5 e 6 meses .....	54
Figura 6.6 – Curvas de compactação das amostras de EGC do Forno estocadas por 4, 5 e 6 meses .....	55

Figura 6.7 – Variação do ISC com a umidade de compactação (amostra do Forno, mês 6) .....	56
Figura 6.8 – Perda de peso por abrasão Los Angeles em função do tempo de estocagem .....	59
Figura 6.9 – Variação da expansão média em função do tempo de ensaio para escória Misturada sem período de cura com granulometrias original e corrigida .....	61
Figura 6.10 – Resultados dos ensaios de expansão para as amostras da EGC do Forno dos meses 4 a 6 .....	62
Figura 6.11 – Resultados dos ensaios de expansão para as amostras da EGC Misturada dos meses 4 a 6 .....	63
Figura 6.12 – Módulo de resiliência de amostras de EGC do Forno .....	65
Figura 6.13 – Módulo de resiliência de amostras de EGC Misturada .....	66
Figura 6.14 – Variação do módulo de resiliência das amostras de EGC do Forno para diferentes tempos de estocagem .....	67
Figura 6.15 – Variação do módulo de resiliência das amostras de EGC Misturada para diferentes tempos de estocagem .....	68
Figura 6.16 – Faixa de variação dos módulos de resiliência da EGC .....	68
Figura 6.17 – Comparação dos módulos de resiliência da EGC e de materiais granulares convencionais .....	69
Figura 7.1 – Distribuição granulométrica da escória de aciaria em comparação aos limites da Faixa C do DNER .....	73
Figura 7.2 – Determinação do teor mínimo de cal obtido pelo método do ICL .....	74
Figura 7.3 – Variação da umidade ótima com o teor de cinza pesada das misturas .....	77
Figura 7.4 – Massa específica aparente seca máxima em função do teor de cinza pesada nas misturas .....	77
Figura 7.5 – Variação da resistência à compressão simples (RCS) com o teor de cinza pesada .....	79
Figura 7.6 – Variação da resistência à compressão simples (RCS) com o teor de cal de carbureto adicionado à mistura contendo 20% de cinza pesada .....	80
Figura 7.7 - Variação da resistência à compressão simples (RCS) com o teor de cal de carbureto adicionado à mistura contendo 33% de cinza pesada .....	81

Figura 7.8 – Variação da resistência à compressão diametral (RCD) em função da resistência à compressão simples (RCS) .....	84
Figura 7.9 – Variação do módulo de resiliência em função do tempo de cura .....	85
Figura 7.10 – Módulos de resiliência da mistura ótima curada por 28 dias e da EGC .....	86

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 – Tipos de fornos utilizados pelas siderúrgicas brasileiras (IBS, 2002) .....	2
Quadro 2.1 – Relação de ensaios a serem realizados .....	9
Quadro 3.1 – Parâmetros que influenciam a expansão das escórias .....	16
Quadro 4.1 – Identificação das pilhas de estocagem .....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Composições químicas típicas de escórias de aciaria elétrica (Pereira, 1994; Geyer <i>et al</i> , 1994) .....	12
Tabela 3.2 – Composições químicas típicas de escórias de refino oxidante e redutor no Brasil (Geyer, 2000) .....	12
Tabela 3.3 – Ensaio usuais em agregados para construção de estradas .....	18
Tabela 3.4 – Resultados dos principais ensaios realizados com escória de aciaria (Lima <i>et al</i> , 2000) .....	23
Tabela 5.1 – Propriedades químicas da cal de carbureto (Thomé, 1999) .....	43
Tabela 5.2 – Características químicas da cinza pesada de Charqueadas (Sánchez <i>et al</i> , 1998) .....	46
Tabela 6.1 - Análise química elementar via ICP/AES das escórias Misturada e do Forno .....	47
Tabela 6.2 – ISC e $\gamma_d$ obtidos para as umidades ótimas .....	50
Tabela 6.3 – ISC e $\gamma_d$ obtidos para as umidades de moldagem .....	57
Tabela 6.4 – Perdas de massa totais decorrentes do ensaio de durabilidade ao sulfato de sódio .....	58
Tabela 6.5 – Absorção de água do agregado graúdo e densidade da escória .....	59
Tabela 6.6 – Comparação das deformações elásticas em pavimentos com EGC e BG .....	71
Tabela 7.1 – Variação dos parâmetros de compactação com a adição da cal .....	74
Tabela 7.2 – Variação do ISC em função da adição de cal .....	75
Tabela 7.3 – Resistência à compressão simples da mistura e da EGC .....	75
Tabela 7.4 – ISC das misturas com cinza pesada .....	78
Tabela 7.5 – Relação $RCS_{28}/RCS_3$ para misturas contendo 20% de cinza pesada e diferentes teores de cal de carbureto .....	81

Tabela 7.6 - Relação $RCS_{28}/RCS_3$ para misturas contendo 33% de cinza pesada e diferentes teores de cal de carbureto .....	82
Tabela 7.7 – Variação da resistência à compressão diametral (RCD) para misturas contendo 20% de cinza pesada e diferentes teores de cal de carbureto .....	83
Tabela 7.8 – Variação da resistência à compressão diametral (RCD) para misturas contendo 33% de cinza pesada e diferentes teores de cal de carbureto .....	83
Tabela 7.9 – Análise química do extrato do lixiviado .....	87
Tabela 7.10 – Análise química do extrato do solubilizado .....	88

## RESUMO

Esta dissertação apresenta os resultados de um estudo sobre o emprego da escória de aciaria elétrica como agregado para pavimentação. Este tipo de resíduo é gerado durante o processo de produção do aço em siderúrgicas que utilizam fornos elétricos a arco. As características mecânicas do agregado foram determinadas através de ensaios de granulometria, durabilidade ao sulfato de sódio, abrasão no equipamento de Los Angeles, compactação, índice de suporte Califórnia e módulo de resiliência. Constatou-se a necessidade de corrigir a granulometria da escória, procedimento que melhorou significativamente a capacidade de suporte e a trabalhabilidade do material. Através da avaliação do potencial expansivo do material concluiu-se que o tempo de estocagem mínimo para liberação do agregado é 4 meses. Após a correção granulométrica, a escória apresentou módulos de resiliência superiores aos de materiais granulares tradicionais, resultando em pavimentos mais esbeltos e econômicos. As características ambientais foram avaliadas através de ensaios de lixiviação e solubilização e o resíduo classificado como classe II, ou seja, não-inerte. Adicionalmente analisou-se a possibilidade de melhorar as características de resistência e trabalhabilidade do agregado através da adição de outros resíduos industriais (cinza pesada e cal de carbureto). Determinou-se a mistura ótima e avaliaram-se as características ambientais e de deformabilidade elástica. Os resultados do estudo permitem concluir que a escória de aciaria elétrica pode ser empregada como material de pavimentação, seja por meio de estabilização granulométrica ou pela modificação com cinza pesada e cal de carbureto, não provocando riscos ao meio ambiente e à saúde pública e proporcionando boa qualidade técnica e notáveis benefícios ambientais e econômicos.



## ABSTRACT

This thesis presents the results of a study of the use of electric furnace slag as pavement aggregates. This kind of waste is generated during steel production in industrial plants using electric arc furnace. The following tests were carried out in order to determine the aggregate physical and mechanical characteristics such as grain size distribution, soundness, Los Angeles abrasion, compaction, CBR and resilient modulus. It was shown that in order to use the slag as granular layer, its grain size distribution must be corrected. This procedure remarkably increased the materials bearing capacity and workability. The evaluation of expansion potential allowed concluding that the slag must be open-air stocked for at least four months before being used in pavement construction. After gradation correction, the slag presented resilient modulus that exceeded those of traditional granular materials; its use resulting in thinner and cheaper pavements. Environmental characteristics were evaluated by means of leaching and solubility tests, the slag being classified according to Brazilian standards as a waste Class II, active but not dangerous. Complementary, the improvement of the aggregate strength and workability by adding other industrial wastes (bottom ash and carbide lime) was analyzed. An optimum mix proportion was determined and environmental and resilient characteristics were evaluated. The study results led to the conclusion that either gradation correction or stabilization with bottom ash and carbide lime makes possible the use of electric furnace slag as base and sub-base aggregate with remarkably good technical quality and economic advantages.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 O PROBLEMA DE PESQUISA

O crescimento econômico tem levado ao aumento da demanda por agregados para o uso na construção civil. Nesse contexto, a construção de estradas tem significativa importância, visto que pode representar um terço desta demanda (Sherwood, 1995).

A preocupação com a possibilidade de esgotamento dos recursos naturais e com os efeitos que a extração de agregados pode causar sobre o meio ambiente tem tornado imperativa a investigação cuidadosa de alternativas aos materiais naturais tradicionalmente empregados na pavimentação de vias.

Paralelamente à produção de agregados, grandes quantidades de resíduos e subprodutos são gerados pelas indústrias e pelo uso doméstico. O total de resíduos gerados por uma usina siderúrgica integrada a coque, por exemplo, gira em torno de 700 kg/t de aço líquido produzido (Pereira, 1995). A produção mundial de aço atingiu cerca de 850 milhões de toneladas no ano 2000, sendo o Brasil responsável por 3,3% do total (IBS, 2001). Portanto, pode-se concluir que a geração de resíduos chegou a 487 milhões de toneladas. As escórias de alto-forno e aciaria são os resíduos produzidos em maior quantidade, constituindo pouco mais de metade do total.

A produção de aço se dá por diferentes processos, os principais utilizam conversores a oxigênio e fornos elétricos. O Quadro 1.1 apresenta os tipos de fornos utilizados pelas siderúrgicas brasileiras na produção do aço. O Brasil produziu no ano 2000 aproximadamente 28 milhões de toneladas de aço. Deste total 21% foi produzido por siderúrgicas que utilizam fornos elétricos (IBS, 2001). Dessa forma, por ser produzida em menor escala e em áreas concentradas, a escória de aciaria elétrica é pouco conhecida, restringindo-se os estudos às

áreas onde é gerada. Além disso, grande parte dos relatos técnicos e normas não diferenciam as escórias de aciaria elétrica das demais, denominando *escória de aciaria* todas as escórias geradas durante o processo de produção de aço.

QUADRO 1.1 – Tipos de fornos utilizados pelas siderúrgicas brasileiras (IBS, 2002).

EMPRESA	Estado	Tipo de forno		
		EOF	LD/BOF	Elétrico
Acesita S.A.	MG		X	X
Aço Minas Gerais S.A. – AÇOMINAS	*		X	
Aços Villares S.A.	SP			X
Cia. Siderúrgica Belgo Mineira	**		X	X
Cia. Siderúrgica Nacional – CSN	RJ		X	
Cia. Siderúrgica Paulista – COSIPA	SP		X	
Cia. Siderúrgica Tubarão – CST	ES		X	
Gerdau S.A.	***	X	X	X
Siderúrgica Barra Mansa S.A.	RJ			X
Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A. – USIMINAS	MG		X	
Vallourec & Mannesman Tubes – V & M do Brasil S.A.	MG		X	
Villares Metais S.A.	SP			X

\*Aço Minas Gerais S.A. – AÇOMINAS possui usinas em Minas Gerais (MG) e São Paulo (SP).

\*\* Cia. Siderúrgica Belgo Mineira possui usinas em MG, SP e Espírito Santo (ES).

\*\*\* Gerdau S.A. possui usinas em MG, Pernambuco (PE), Rio Grande do Sul (RS), Paraná (PR), Ceará (CE) e Bahia (BA).

Duas siderúrgicas brasileiras que utilizam o forno elétrico na produção do aço situam-se na região metropolitana de Porto Alegre. Por esta razão, o estudo da escória de aciaria elétrica nesta região torna-se interessante em termos econômico, técnico e ambiental.

Sob os pontos de vista técnico e econômico, a utilização da escória de aciaria elétrica como material de pavimentação representa redução de custos se comparada a agregados convencionais, podendo ser usada nas diferentes camadas do pavimento, desde o reforço do subleito até o revestimento betuminoso, muitas vezes apresentando características superiores aos agregados naturais. Além disso, diminui os custos com disposição final de resíduos da usina.

A reciclagem ou a utilização de subprodutos traz benefícios ambientais representados pela redução das agressões ao meio ambiente, como as causadas pela deposição de resíduos em aterros e a emissão de gases poluentes como o CO<sub>2</sub>, sendo responsável também pela diminuição da extração predatória de recursos naturais, como a exploração de jazidas de agregados.

Entretanto, a possibilidade de ocorrência de expansão volumétrica quando na presença de umidade, limita a utilização da escória de aciaria como agregado para pavimentação, visto que, esta “instabilidade” volumétrica é característica indesejável. Tal expansão ocorre, entre outros processos, devido à hidratação da cal, que participa do processo de produção do aço e pode permanecer na escória como matéria-prima não reagida ou surgir durante a estocagem, formando compostos expansivos.

A utilização de agregado de escória de aciaria como material de pavimentação não é recente, já existindo trechos executados utilizando este tipo de agregado como base, sub-base e também na mistura asfáltica. No Brasil os níveis de utilização e o valor comercial da escória de aciaria ainda são baixos, visto que entre 56% e 65% da produção é destinada a depósitos, enquanto que em alguns países esse valor não ultrapassa os 10% (Mancio, 2001). Porém, em qualquer situação de reciclagem da escória, é necessário um período de “cura” variando de um até 18 meses de estocagem (Chesner et al, 2001 b), que visa a redução do potencial de expansão da escória em níveis não prejudiciais à qualidade do agregado. Este período de “cura” pode diminuir a competitividade deste material em certas regiões em comparação com os materiais tradicionais.

O tempo mínimo de estocagem da escória a céu aberto varia em função da sua composição química e das condições ambientais. Portanto, para empregar a escória em pavimentação, além de determinar suas propriedades mecânicas, como ISC e módulo de resiliência, é fundamental estabelecer o período mínimo de cura. Nesse contexto esta dissertação enfoca a escória de aciaria elétrica produzida por uma siderúrgica da região

metropolitana de Porto Alegre. Cabe esclarecer que este trabalho faz parte de um projeto multidisciplinar amplo que visa caracterizar a escória de aciaria elétrica bem como verificar a possibilidade de utilização deste resíduo como agregado para pavimentação. O projeto é coordenado pelo professor Antônio Cezar Faria Vilela do Laboratório de Siderurgia (LASID) e conta ainda com a participação do Núcleo Orientado à Inovação na Edificação (NORIE) e do Laboratório de Pavimentação (LAPAV).

## **1.2 OBJETIVOS**

Esta pesquisa teve como objetivos verificar a viabilidade técnica da utilização da escória de aciaria como agregado para base e sub-base de pavimentos através de ensaios consagrados, bem como avaliar a variação do potencial expansivo do material em função do tempo de estocagem, estabelecendo o período de “cura” mínimo para liberar a utilização como agregado para pavimentação.

Adicionalmente, estudou-se a possibilidade de melhorar as características de resistência e trabalhabilidade do agregado através da adição de cinza pesada e cal de carbureto, ambos resíduos industriais, buscando gerar um material com características de deformabilidade e resistência que contemple as especificações para materiais rodoviários.

Por fim, avaliou-se o risco de danos ao meio ambiente e à saúde pública ocasionados pela utilização do material, puro ou com aditivos, através dos ensaios de lixiviação e solubilização.

## **1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Esta dissertação está organizada, além deste capítulo intitulado INTRODUÇÃO, em mais sete capítulos.

A descrição do programa de pesquisa é apresentada no Capítulo 2, sendo indicados os ensaios adotados para avaliar a escória de aciaria e as misturas contendo escória, cinza e cal de carbureto.

No Capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica que expõe o processo de geração da escória de aciaria elétrica, buscando também informar sobre o fenômeno da expansibilidade, bem como as possibilidades de utilização do material. Apresenta-se ainda uma pequena revisão sobre a avaliação dos possíveis impactos ambientais decorrentes da utilização de resíduos industriais como a cinza pesada e a cal de carbureto.

O Capítulo 4 apresenta os métodos utilizados na fase experimental.

As características dos outros materiais (cinza pesada, cal de carbureto e água) utilizados nesta pesquisa são descritas no Capítulo 5.

No Capítulo 6 são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados com a escória de aciaria elétrica com vistas à utilização como agregado de pavimentação.

O Capítulo 7 destina-se a apresentar e analisar os resultados realizados com as misturas da escória de aciaria com cinza pesada e/ou cal de carbureto.

No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões obtidas a partir da pesquisa e sugestões para futuros trabalhos.

## **2 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **2.1 ETAPAS DA PESQUISA**

A pesquisa foi desenvolvida em três etapas:

I) A primeira etapa consistiu na revisão da literatura existente sobre a escória de aciaria, a característica expansiva do material, métodos para avaliação da expansão volumétrica, a estabilização volumétrica, as aplicações da escória de aciaria, em especial o uso como agregado para pavimentação. Nesta etapa é também revisada a literatura existente sobre a avaliação dos impactos ambientais consequentes da utilização de resíduos industriais.

II) Na segunda etapa desenvolveu-se o estudo experimental que pode ser dividido, por sua vez, em três fases.

II.1) A primeira fase constitui-se na realização dos ensaios para caracterização da escória de aciaria, através de análise granulométrica, da determinação da resistência à abrasão na máquina de Los Angeles, da durabilidade ao sulfato de sódio, da densidade real e do potencial expansivo. Visando à pavimentação, foi avaliado o comportamento mecânico da escória como material granular através de ensaios de ISC, sendo também avaliada a deformabilidade elástica do material através de ensaios de módulo de resiliência.

II.2) A segunda fase da etapa experimental consistiu na realização de ensaios para avaliar a possibilidade de melhoria das características do agregado de escória de aciaria através da sua mistura com resíduos industriais (cinza pesada e cal de carbureto). Nesta fase foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral.

II.3) A terceira fase destinou-se à verificação do potencial poluente das misturas através da realização de ensaios de lixiviação e solubilização.

III) A última etapa da pesquisa consistiu na análise dos resultados obtidos na etapa experimental, avaliando-se a viabilidade da utilização da escória de aciaria como agregado para base e sub-base de pavimentos após a correção granulométrica ou a adição de outros resíduos.

## 2.2 ESQUEMAS DOS ENSAIOS

As Figuras 2.1 a 2.3 apresentam os ensaios realizados no agregado não modificado e nas misturas escória-cinza, escória-cal e escória-cinza-cal.

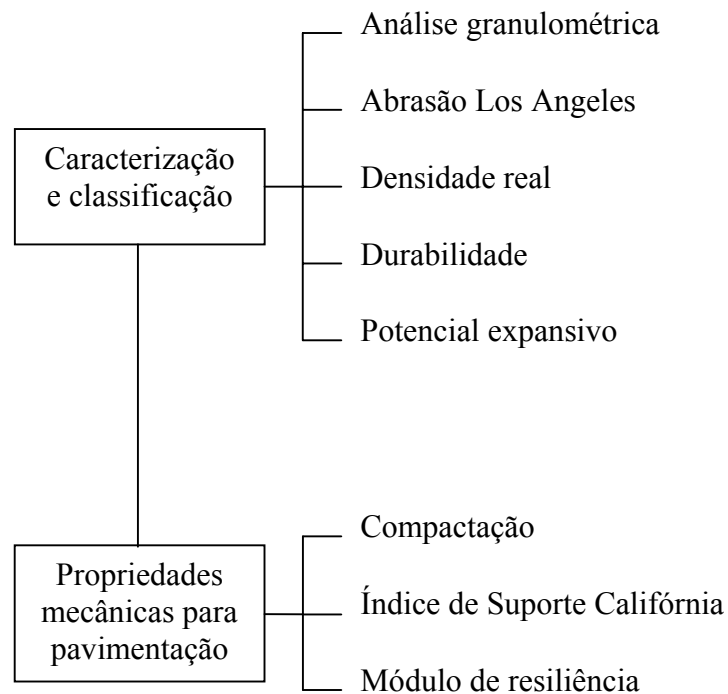


FIGURA 2.1 - Ensaio com a escória de aciaria.



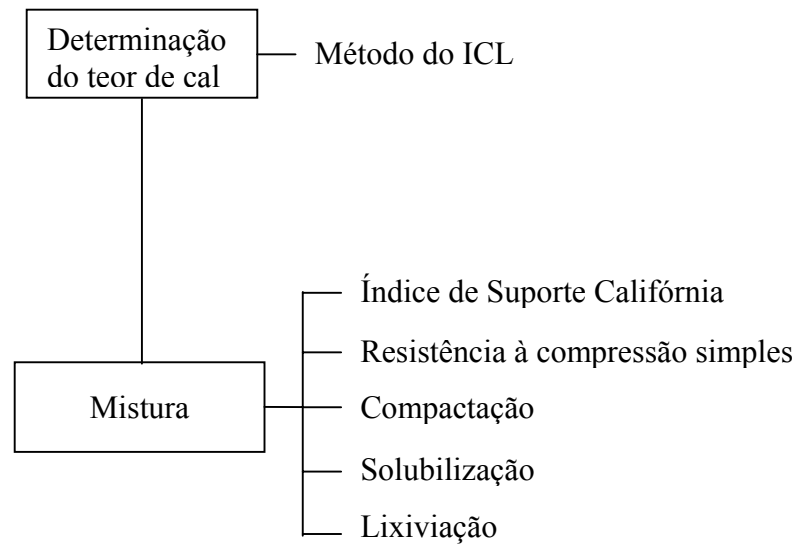


FIGURA 2.2 - Ensaio com as misturas escória-cal e escória-cinza.

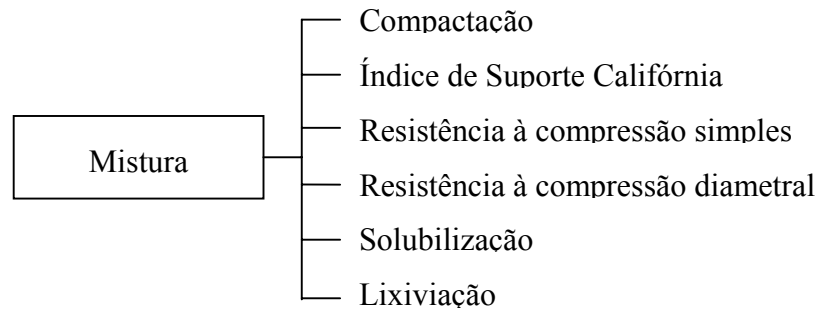


FIGURA 2.3 - Ensaio com as misturas contendo escória, cinza pesada e cal de carbureto.

### 2.3 QUADRO DE ENSAIOS

O Quadro 2.1 apresenta os tipos e o número de ensaios realizados com a escória e com as misturas escória-cinza, escória-cal e escória-cinza-cal.

QUADRO 2.1 - Relação de ensaios realizados.

	Escória	Escória- cinza	Escória-cal	Escória- cinza-cal	Total
Análise granulométrica	13	---	---	---	13
Densidade real	12	---	---	---	12
Durabilidade	6	---	---	---	6
Abrasão Los Angeles	14	---	---	---	14
Compactação	14	04	01	---	19
Índice de Suporte Califórnia	90	22	06	---	118
Resistência à compressão simples	---	16	04	16	36
Resistência à compressão diametral	---	---	---	16	16
Módulo de resiliência	22	04	01	04	31
Lixiviação	---	01	01	---	02
Solubilização	---	01	01	---	02
Potencial de expansão	12	---	---	---	12

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 A ESCÓRIA DE ACIARIA

Nos processos de produção do aço são gerados diversos tipos de escória. Basicamente existem três processos, caracterizados pelo emprego de diferentes fornos de refino: o Siemens-Martin (Open Heart – OH), o conversor a oxigênio (Linz e Donawitz – LD ou Blast Oxygen Furnace - BOF) e o forno elétrico a arco (Electric Arc Furnace). Os dois processos mais utilizados mundialmente são o de fusão e refino de sucata em fornos elétricos a arco e o de refino do ferro-gusa líquido em conversores a oxigênio. A utilização de fornos do tipo Siemens-Martin está em declínio, não ocorrendo no Brasil.

A Figura 3.1 apresenta um típico esquema simplificado da geração de escórias na aciaria elétrica, com a geração específica aproximada em cada etapa. Ao sair do forno elétrico o aço ainda apresenta impurezas indesejáveis. Um dos métodos para levar o metal à composição desejada é a combinação de um refino oxidante (que ocorre no forno elétrico) e de um refino redutor (que ocorre normalmente na panela ou no forno-panela) (Lúcio, 1981).

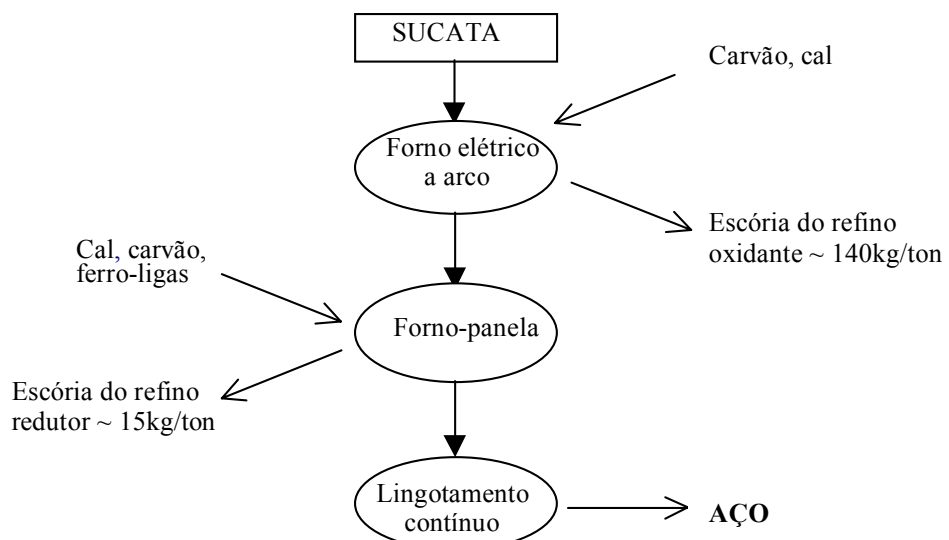


FIGURA 3.1 - Esquema simplificado da geração de escórias na aciaria elétrica (Geyer, 2000).

O processo de produção de aço em forno elétrico consiste na fusão de sucata de aço, gerada por um arco elétrico, formado entre o aço e os eletrodos de grafita ou carvão amorfo. No processo de fusão são adicionadas cal calcítica e cal dolomítica com consumo médio de 40 kg/t de aço. As cales juntamente com o oxigênio, atuam como agentes que removem as impurezas como carbono (C), silício (Si) e fósforo (P), através das reações de oxidação mostradas nas equações [3.1], [3.2] e [3.3] (Nehmi,1980 *apud* Machado, 2000).

A adição da cal dolomítica visa proteger o recobrimento refratário do forno. Portanto, a escória de aciaria elétrica é o produto resultante da combinação de CaO e MgO com os elementos a serem retirados por oxidação da sucata metálica, formando silicatos e óxidos. Nessas escórias, devido ao elevado teor dos elementos de liga presentes na sucata de aço, outros óxidos também podem ser encontrados, tais como TiO<sub>2</sub> e Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Machado, 2000).



No final do processo de refino, após a oxidação do fósforo e do silício, quando a cal adicionada ao processo de refino ultrapassa os limites de solubilidade da escória fundida, ocorre a precipitação de cal e magnésio. Isto causa elevados teores de CaO e MgO reativos na escória. Do ponto de vista mineralógico, as escórias de aciaria são compostas por wüstita (FeO), larnita ( $\beta$ -2CaO\*SiO<sub>2</sub>), cal livre (CaO), periclásio (MgO), entre outros compostos químicos (Machado, 2000). A Tabela 3.1 apresenta composições químicas típicas de escória de aciaria elétrica, bem como algumas gerações específicas.

Além das fases não metálicas, a escória de aciaria pode conter partículas de aço e ou ferro metálico. Estas partículas podem contribuir para a instabilidade volumétrica das escórias, através da geração de produtos de corrosão e oxidação, além de reduzirem o processo de produção do aço (Burgos *et al*, 1999).

TABELA 3.1 - Composições químicas típicas de escórias de aciaria elétrica (Pereira, 1994; Geyer *et al*, 1994).

País	Geração (kg/t)	CaO (%)	MgO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	FeO (%)	MnO (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	S (%)
Japão	127	40	4	25	5	19	7	-	0,006
Suécia	100	46	5	11	5	28	4	0,7	-
EUA	160	41	10	17	8	18	4	0,6	0,2
Alemanha	120	32	10	15	4	31	4	1,4	0,1
Brasil	150	33	10	18	6	30	5	-	-
Itália	120	41	8	14	7	20	6	0,9	0,1
Faixa	100-160	32-46	4-10	11-25	4-8	18-31	4-7	0,6-1,4	0,1-0,2

A escória de aciaria, tanto de refino oxidante (forno elétrico a arco) quanto redutor (forno-panela), é normalmente vazada em um pote de escória e/ou descarregada em locais onde sofre solidificação em forma cristalina. Após o processo de resfriamento, a escória é britada, sendo então separada em diferentes faixas granulométricas (bitolas), por meio de correias rolantes. Durante esta separação o resíduo passa por um eletroímã que tem a função de separar a escória rica em ferro que poderá voltar para o forno. Esta escória é conhecida como sucata recuperada (Geyer, 2000).

A Tabela 3.2 mostra as composições típicas das escórias de refino oxidante e escórias de refino redutor no Brasil.

TABELA 3.2 - Composições químicas típicas de escórias de refino oxidante e refino redutor no Brasil (Geyer, 2000).

	CaO (%)	MgO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	FeO (%)	MnO (%)	SO <sub>3</sub> (%)
Refino oxidante	30-35	8-12	15-20	3-9	25-35	3-6	-
Refino redutor	45-55	8-12	20-25	3-9	0,5-3,5	0,5-3,5	0,5

A composição química das escórias de aciaria é função do tipo de processo de produção e da matéria-prima utilizada em cada corrida. A Figura 3.2 mostra um exemplo de intervalo de variação da composição química da escória de aciaria produzida em forno elétrico a arco pela Usina Siderúrgica da Bahia (USIBA-BA). Os dados, referentes a uma seqüência de 12 corridas em um dia típico de produção, demonstram a variação na composição química, em especial com relação aos teores de CaO, SiO<sub>2</sub> e FeO.

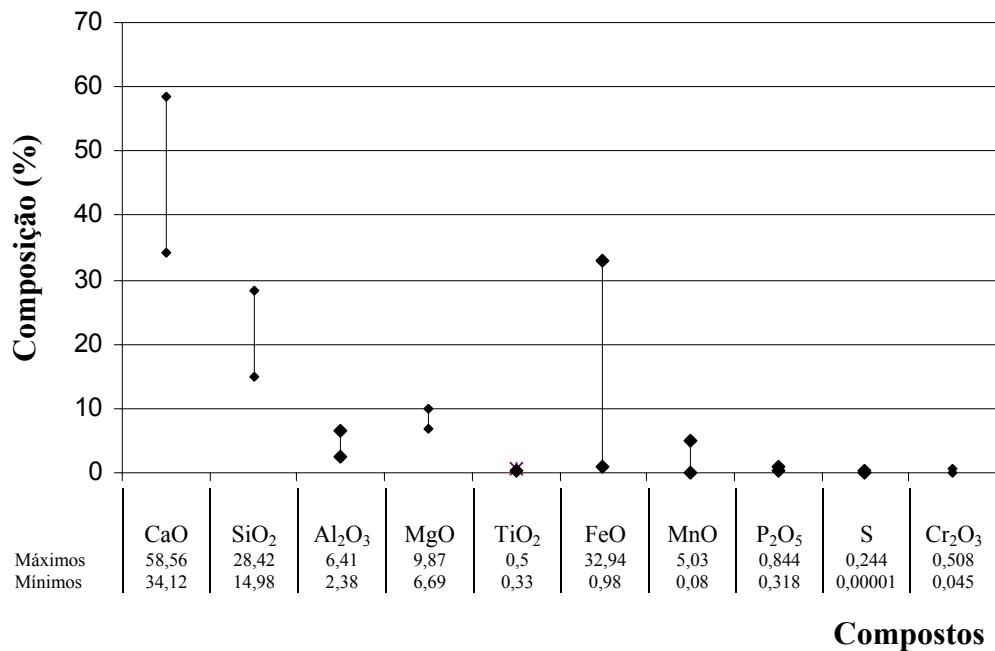


FIGURA 3.2 - Variação da composição química da escória de aciaria elétrica oxidada em função da corrida de produção (Machado, 2000).

As propriedades físicas características das escórias de aciaria - densidade, granulometria e propriedades estruturais - variam com a maneira como é feito o resfriamento deste resíduo. Pode ocorrer grande variação na composição das escórias, mesmo sendo produzidas em uma mesma indústria (Rubio e Carretero, 1991).

Ao sair do forno à temperatura próxima de 1500°C a escória fundida pode ser submetida a diferentes processos de resfriamento.

A escória pode ser resfriada naturalmente ao ar, dessa forma os óxidos componentes da escória se cristalizam e perdem as características hidráulicas, podendo-se considerar inerte. A escória solidificada apresenta estrutura vesicular, textura superficial rugosa, maior

superfície específica quando comparada com agregados mais lisos, favorecendo a aderência com material betuminoso e cimento (Masuero, 2001).

Caso sofra resfriamento rápido, é previamente expandida através da aplicação de uma quantidade controlada de água. Decorrente da ação da água e do vapor gerado, a escória incorpora ar e expande, apresentando uma estrutura alveolar e baixa massa específica, sendo denominada escória expandida. Apresenta maior porosidade e densidade que a escória resfriada ao ar (Masuero, 2001).

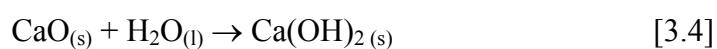
Outra forma de resfriamento gera a escória granulada, que é obtida por resfriamento brusco, através de fragmentação por jato d'água seguido por resfriamento em tanque com água onde se granula. Dessa maneira, obtém-se uma escória vítrea, com estrutura porosa, textura áspera e granulometria semelhante à da areia de rio, ocorrendo pouca ou nenhuma cristalização (Machado, 2000).

As escórias de aciaria no Brasil são resfriadas ao ar em um processo lento, recebendo pequenos jatos d'água para auxiliar no processo logo que chegam nos pátios de escória.

### 3.2 A EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA

A característica expansiva da escória de aciaria está associada, principalmente, à hidratação da cal livre (CaO) e do periclásio (MgO) e à corrosão e oxidação do ferro metálico residual. Tais reações são responsáveis por um considerável aumento de volume em relação às dimensões originais do cristal, podendo causar expansão destrutiva na escória de aciaria (Machado, 2000).

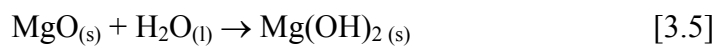
O óxido de cálcio livre (CaO) presente na escória de aciaria constitui um fator de instabilidade pela sua transformação em hidróxido de cálcio, que pode causar expansão volumétrica e ao mesmo tempo desagregação do material (Mathur *et al*, 1999; Emery, 1977). O processo de hidratação deste óxido se dá de acordo com a equação [3.4], onde os índices subscritos indicam o estado físico do composto: s = sólido e l = líquido.



Uma vez que o elevado teor de cal livre é o principal responsável pela ocorrência de expansão das escórias de aciaria, existem diversos estudos visando limitar o seu teor como

critério de classificação e aplicação das escórias. Tem-se mostrado que, em teores menores que 7% a cal livre não é prejudicial à durabilidade de pavimentos que utilizam a escória de aciaria (Duda, 1989 *apud* Machado, 2000). Outros autores ainda limitam o teor de cal livre presente na escória de aciaria entre 4 e 5% (Conjeaud *et al*, 1981 *apud* Machado, 2000).

A utilização da cal dolomítica e o desgaste do revestimento refratário do forno no processo de refino do aço são responsáveis pela presença do óxido de magnésio (MgO) na escória que, na presença de umidade, hidrata-se lentamente formando o hidróxido de magnésio ou brucita (Mg(OH)<sub>2</sub>), conforme a equação [3.5] (Machado, 2000).



O teor de magnésio presente na escória de aciaria pode variar até 10%. Podendo se apresentar na forma livre, como periclásio (MgO), propício à expansão, ou quimicamente combinado em solução sólida com outros elementos, em geral apresentando comportamento estável.

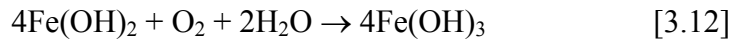
A cal utilizada no processo de aciaria deve possuir granulometria o mais fina possível, possibilitando a dissolução e completa reação, reduzindo assim a instabilidade da escória devida a presença de CaO e MgO instáveis (Luo *apud* Montgomery e Wang, 1991).

A maior parte da expansão volumétrica que ocorre a curto prazo é devida às reações de hidratação do óxido de cálcio, fenômeno rápido, enquanto que o óxido de magnésio hidrata-se lentamente, expandindo por um longo período de tempo. A taxa de hidratação pode ser acelerada pela moagem da escória (Emery, 1977; Akinmusuru, 1991; Crawford & Burn, 1969).

A escória de aciaria possui em sua composição uma grande quantidade de partículas ferrosas. O ferro metálico (Fe<sup>0</sup>) após sofrer processos de corrosão e oxidação pode aparecer sob a forma dos íons Fe<sup>+2</sup> e Fe<sup>+3</sup> (Lee e Lee, 1995), sendo estes os estados de corrosão e oxidação mais comuns. As equações [3.8] a [3.10] descrevem as principais reações de oxidação e as equações [3.11] e [3.12] as de corrosão (Machado, 2000).







O silicato dicálcico ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) ou  $\text{C}_2\text{S}$  (onde  $\text{C}=\text{CaO}$  e  $\text{S}=\text{SiO}_2$ ) também apresenta uma grande importância no fenômeno da instabilidade da escória. Na forma  $\beta$  (larnita) pode sofrer reações de hidratação, passando para a fase  $\gamma$  (calco-olivina). Esta transformação é problemática uma vez que a transição da fase  $\beta$  para  $\gamma$  durante o resfriamento ou mesmo a temperaturas ambientes, produz um aumento de volume, causando o fenômeno de esfarelamento (Lee, 1974; Bensted *et al*, 1974 *apud* Masuero, 2001)

Em resumo, a expansibilidade das escórias de aciaria é resultante do processo de hidratação do óxido de cálcio livre, do óxido de magnésio reativo e do  $\beta$ -silicato dicálcico. Podendo ocorrer ainda a expansão das escórias devido aos processos de corrosão e oxidação do ferro metálico. Tais processos geram uma instabilidade volumétrica, podendo provocar expansões de até 14% do volume inicial da escória. Pode-se concluir portanto, que a expansão da escória de aciaria é influenciada por alguns fatores e mecanismos, apresentados no Quadro 3.1. Os símbolos  $\uparrow$  e  $\downarrow$  indicam se o parâmetro influencia positivamente ou negativamente as reações que provocam a expansão.

QUADRO 3.1 - Parâmetros que influenciam a expansão das escórias (Machado, 2000).

<b>Espécies químicas</b>	<b>Parâmetros que influenciam a expansão</b>	<b>Mecanismo</b>
<b>CaO, MgO e C<sub>2</sub>S</b>	Teor da espécie no estado livre ( $\uparrow$ ) Umidade ( $\uparrow$ ) Temperatura ( $\uparrow$ ) Teor de CO <sub>2</sub> ( $\uparrow$ ) Tamanho dos grão de escória ( $\downarrow$ )	<b>Hidratação</b>
<b>Fe<sup>0</sup>, Fe<sup>+2</sup> e Fe<sup>+3</sup></b>	Teor de Fe <sup>0</sup> ( $\uparrow$ ) Umidade ( $\uparrow$ ) Tempo de exposição ao ar ( $\uparrow$ ) Teor de oxigênio no resfriamento ( $\downarrow$ ) Tamanho dos grãos de escória ( $\downarrow$ )	<b>Corrosão e Oxidação</b>

### 3.3 AS PRINCIPAIS APLICAÇÕES DA ESCÓRIA DE ACIARIA

A escória de aciaria tem sido utilizada em um número crescente de aplicações nos últimos tempos. Entre as diversas aplicações da escória de aciaria destacam-se o emprego como agregado para pavimentação, tanto participando da mistura asfáltica como para base e sub-base, agregado para construção de leito para estrada de ferro, estabilização de solos, fertilizante e matéria-prima para produção de cimentos.

Atualmente, no Brasil, apenas 35% da escória de aciaria elétrica gerada é utilizada, especialmente como agregado para construção de estradas, sendo o restante estocado (IBS, 1998).

#### 3.3.1 A escória de aciaria como agregado para pavimentação

No Brasil o uso da escória de aciaria em pavimentação não é recente, havendo vários trechos executados há mais de 20 anos (Lima *et al*, 2000). A escória compete principalmente com areia e brita nesta aplicação, sendo particularmente adequada por sua dureza, durabilidade e drenagem livre. Apresenta também elevada resistência ao esmagamento, que permite sua utilização por longos períodos com mínima manutenção. Existem muitas especificações relacionados à utilização da escória como agregado para base de estradas. A Tabela 3.3 apresenta requisitos típicos para agregados para construção de estradas e os valores típicos para escórias de aciaria, segundo a British Standards Institution (BS) e a American Society for Testing and Materials (ASTM).

A norma japonesa JIS A-5015 (1992), que trata da utilização de escória de aciaria como agregado para construção de estradas, limita o índice de expansão em água para a escória de aciaria de granulometria simples em 2% aos 10 dias (240 horas), fixando ainda outras condições como a massa específica, que deve ser superior a  $2,45 \text{ kg/dm}^3$ , o índice de absorção de água, inferior a 3% e o índice de abrasão, inferior a 30%. Esta norma define também a cura para o caso da escória de aciaria, que consiste no tratamento de estabilização química da escória com ar e água através da reação de hidratação e carbonatação de substâncias expansíveis, como a cal livre. Durante a cura, estas substâncias reagem,

transformando-se em hidróxidos e carbonatos estáveis. O tempo de cura normal deve ser superior a seis meses, podendo ser reduzido desde que após a cura acelerada a expansão esteja confirmadamente estabilizada.

TABELA 3.3 - Ensaio usuais em agregados para construção de estradas.

Ensaio	BS/ASTM AASHTO	Requisitos Típicos	Escória de Aciaria Típica
Valor de britagem do agregado	BS 812	30% máx.	20%
Valor de impacto do agregado	BS 812	25% máx.	14%
Valor de abrasão do agregado	BS 812	10% máx.	3%
Valor de polimento	BS 812	>60 muito bom	60-65
Massa específica aparente	BS 812	1700-1900	>1900 kg/m <sup>3</sup>
Densidade relativa	BS 812	---	3-5
Absorção de água	BS 812	4% máx.	0-2%
Sulfato de magnésio	BS 812	12% máx.	0-5%
Expansão devido a hidratação	ASTM 4792	---	0-5%
Abrasão Los Angeles	ASTM C 131	---	14%
Adesão	ASTM D 3625	---	90-100%
Índice de Suporte Califórnia	ASTM D 1883	Variável	>200%

A escória de aciaria pode ser usada nas diversas camadas do pavimento, desde reforço do subleito até no revestimento betuminoso em substituição dos agregados pétreos, desde que a estabilidade volumétrica seja assegurada (Cerjan-Stefanovic *et al*, 1997). Isto é possível em função de tratar-se de um material que pode atender a todas as granulometrias, apresentar alto Índice de Suporte Califórnia, baixa abrasão Los Angeles, boa adesividade para emulsões e CAPs e excelente poder hidráulico (Silva, 1994). Porém, deve-se considerar a alcalinidade da escória de aciaria, tendo em vista seu potencial de influência no meio ambiente. O pH da escória de aciaria pode atingir valores que variam entre 10 e 14. Em

conseqüência, a escória de aciaria não deve ser usada próximo a águas paradas como poços, lagos ou terrenos alagadiços.

A principal opção de reciclagem da escória de aciaria é como agregado para as camadas inferiores de pavimentos. Sua utilização como agregado em misturas asfálticas se dá em menor escala.

Algumas vantagens da utilização do agregado graúdo de escória de aciaria sobre o agregado pétreo são as seguintes (Brun e Yuan, 1994):

- menor custo, já que não requer explosivos para desmonte;
- maior resistência à abrasão;
- estrutura vesicular, permitindo perfeita drenagem quando utilizados em drenos e lastros ferroviários;
- forma de grão (cúbica), que confere ótima rigidez e adesividade às misturas asfálticas;
- maior peso específico, resultando em economia de material no dimensionamento de contenções e lastros, assegurando grande estabilidade.

Além destas características, as escórias de aciaria possuem as vantagens de poderem ser 100% trituradas atingindo a composição granulométrica desejada, e permitirem melhor trabalhabilidade e compacidade, favorecendo assim a durabilidade do pavimento (Nouman *et al*, 1992).

As escórias de aciaria também apresentam como característica a hidraulicidade, que é o processo pelo qual o material endurece através da reação com a água. Na prática rodoviária recebe o nome de cimentação ou concrecionamento. Esta propriedade é importantíssima, pois além de melhorar as demais características mecânicas da camada compactada, propicia um comportamento estrutural semelhante ao das estruturas rígidas ou semi-rígidas. Quimicamente, a hidraulicidade é o fenômeno que ocorre quando a água, em contato com a escória, reage com pequeníssima quantidade de CaO e SiO<sub>2</sub>, formando uma película de hidratos na superfície da escória. Em atmosfera alcalina, ocorre a formação de hidratos contendo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, cuja combinação transforma a escória num material de alta dureza (Lima *et al*, 2000).

Para serem utilizadas como agregado para pavimentação, as escórias de aciaria devem atender aos requisitos estipulados na especificação de materiais DNER – EM 262/94, quais sejam:

- Potencial de expansão determinado pelo Método PTM 130 (Pennsylvania Testing Method), adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais: máximo de 3% de expansão ou o valor determinado pela especificação particular de projeto;
- Teor de impurezas: as escórias de aciaria devem estar isentas de impurezas orgânicas, de contaminação com escórias de alto-forno, solos e outros materiais que possam prejudicar os valores especificados em projeto;
- Granulometria: a composição granulométrica da escória de aciaria deve se manter na proporção de 40% na faixa de até 1,27 cm (1/2”) e 60% na faixa de 1,27 cm a 5,08 cm (2”) de abertura nominal e deve atender à granulometria de projeto. A granulometria da escória de aciaria destinada a revestimento deverá ser função de estudo em laboratório para atendimento das características exigidas em projeto;
- Condições específicas: a escória de aciaria deve, ainda, obedecer aos seguintes limites:
  - a) Absorção de água determinada pelo método ABNT MB-2698, de 1987: máximo de 1% a 2% em peso;
  - b) Massa específica determinada pelo método ABNT MB-2698, de 1987: de 3 g/cm<sup>3</sup> a 3,5 g/cm<sup>3</sup>;
  - c) Massa unitária determinada pelo método ABNT MB-1665, de 1982: de 1,5 kg/dm<sup>3</sup> a 1,7 kg/dm<sup>3</sup>;
  - d) Desgaste por abrasão Los Angeles determinado pelo método ABNT MB-170, de 1983: máximo igual a 25% para sub-base e revestimento;
  - e) Durabilidade ao sulfato de sódio determinada pelo método ASTM C88-76, cinco ciclos: máximo de 5%.

Silva (1994), relata que no estado do Espírito Santo a escória de aciaria tem sido empregada há mais de 10 anos nas diversas camadas do pavimento, a um custo bem reduzido

em relação a utilização de agregado pétreo. A escória de aciaria tem sido usada com sucesso sem cura prévia, sendo o fenômeno de expansão combatido executando camadas do pavimento com materiais de absorção, podendo ser oriundos da própria terraplenagem, independente do seu ISC. Quando empregada como agregado componente da mistura asfáltica mistura-se com areia natural. A massa específica real do agregado empregado é de cerca de  $3,2 \text{ g/cm}^3$  e o desgaste por abrasão Los Angeles na graduação A é de 19%. A escória analisada apresenta adesividade satisfatória com a emulsão empregada na mistura usinada a frio (PMF). As misturas assim obtidas apresentaram fluência variando entre 12 e 24 ( $1/100''$ ), o teor de emulsão empregada variou entre 4% e 8% e os vazios da mistura variaram entre 14% e 22%.

No Estado de Minas Gerais o Departamento de Estradas de Rodagem (DER-MG) tem estudado e aplicado escórias de aciaria de diversas fontes e com características físicas e mecânicas distintas. Na maioria das vezes o uso dessas escórias foi bem sucedido, consistindo em ótimas soluções técnicas e econômicas.

Lima *et al* (2000) relatam que, com a finalidade de avaliar o comportamento em serviço e a capacidade estrutural de pavimentos executados com escória de aciaria, o DER-MG realizou inspeções visuais e levantamentos defletométricos através da determinação das bacias de deformação com a Viga Benkelman em dois pavimentos executados recentemente na região de Ipatinga-MG. Tornou-se possível a comparação do comportamento em serviço e a capacidade estrutural de dois pavimentos com estruturas diferentes. A Figura 3.3 apresenta as estruturas dos pavimentos avaliados, onde TSD designa tratamento superficial simples, CBUQ é a sigla para concreto betuminoso usinado a quente, BGS equivale à brita graduada simples e BGTC à brita graduada tratada com cimento.

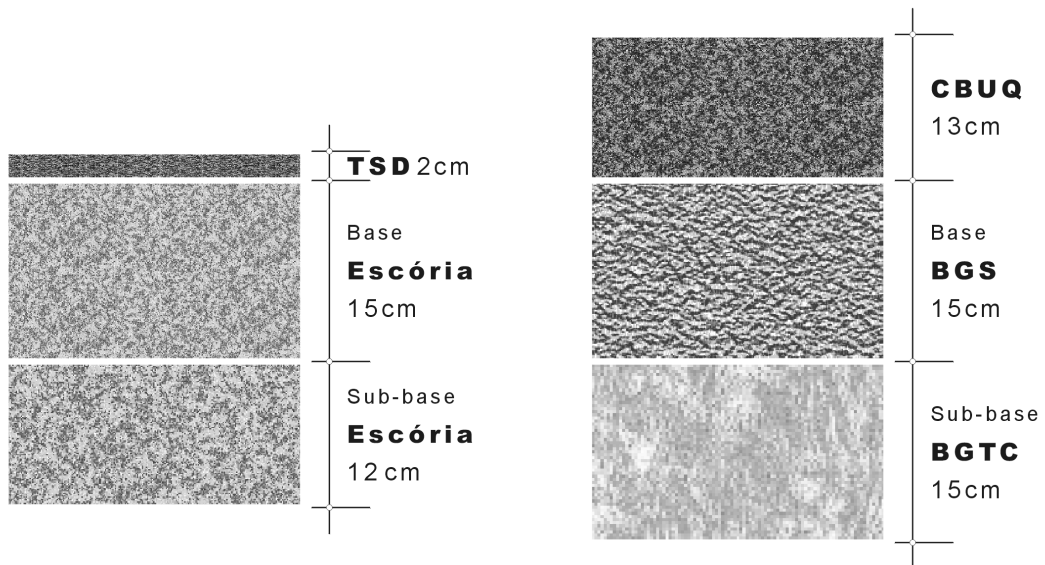


FIGURA 3.3 – Estruturas dos pavimentos avaliados pelo DER-MG.

Em termos de equivalência estrutural, o pavimento executado com escória de aciaria equivale a 30 cm e o executado com material convencional 66 cm de material granular padrão. Ou seja, adotando os coeficientes de equivalência estrutural do DNER, o pavimento executado com materiais tradicionais apresenta capacidade estrutural quase 2 vezes superior ao pavimento com escória. Contudo, a média das deflexões máximas do pavimento com escória é apenas 37% superior à média das deflexões máximas do pavimento de comparação.

Quanto aos raios de curvatura, os do pavimento executado com camadas de escória de aciaria são superiores aos do executado com material convencional, significando que o primeiro apresenta uma capacidade maior de distribuição de carga. Além disso, os módulos de resiliência obtidos por retroanálise das camadas granulares executadas com escória de aciaria, são três a quatro vezes mais elevados que o valor médio do módulo da camada de brita graduada do pavimento de comparação, que é da ordem de  $895 \text{ kgf/cm}^2$ , aproximadamente 90 MPa (muito baixo em função da pequena tensão de confinamento). Sendo assim, verificou-se que pavimentos delgados executados com escórias de aciaria são equivalentes quanto à deformabilidade elástica a pavimentos espessos executados com materiais convencionais como brita graduada simples e brita graduada tratada com cimento, nos chamados pavimentos invertidos (Lima *et al*, 2000). Na Tabela 3.4 apresenta-se um resumo dos principais ensaios realizados com a escória de aciaria do pavimento de Minas Gerais.

TABELA 3.4 - Resultados dos principais ensaios realizados com escória de aciaria (Lima *et al*, 2000).

Parâmetro	Resultado
Abrasão Los Angeles (%)	14
Densidade	3,358
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,947
Densidade real dos grãos finos	3,190
Índice de Lamelaridade (%)	5,5
Permeabilidade (cm/seg)	4,6×10 <sup>-4</sup>
Limite de Liquidez	NL
Índice de Plasticidade	NP
Expansibilidade volumétrica (%)	1,97
Peso específico aparente seco máximo da camada compactada (gf/cm <sup>3</sup> )	2,510
Expansão no ensaio de ISC (%)	Zero
Índice de Suporte Califórnia (%)	140

Na França, têm sido desenvolvidas especificações para o uso de escórias de aciaria, conhecidas como *Grave-Laitier* - mistura de agregado pétreo e escória ou somente escória com adição de cal hidratada apresentando comportamento similar a de materiais semi-rígidos e podendo ser usada como base ou sub-base de pavimentos. A *Grave-Laitier* é produzida em usina consistindo da mistura de agregado com 15 a 20% de escória granulada com adição de 1% de cal hidratada e porcentagem de umidade de 10%. Esta técnica é a mais utilizada na execução de bases de pavimentos na França e estima-se que cerca de 65% das rodovias francesas tenham uma camada do pavimento constituída de *grave-laitier*. Uma técnica similar ao processo francês é usada também na África do Sul, onde utiliza-se uma relação de 4:1 para a mistura de escória com cal (Sherwood, 1995).

Outros países como a Austrália, Japão, Estados Unidos, Canadá, Holanda, Bélgica, Alemanha, Índia e Reino Unido também têm desenvolvido pesquisas nesta direção e têm empregado escórias de aciaria na construção de pavimentos ( Mathur *et al*, 1999).



Um problema a ser considerado quando se emprega escória em pavimentos é a ocorrência de tufa.

A tufa, uma forma do carbonato de cálcio precipitado, tem sido observada obstruindo os sistemas de drenagem em rodovias construídas com a utilização de agregado de escória como base ou sub-base. O bloqueio do sistema de drenagem da rodovia impede a drenagem correta da estrutura do pavimento, resultando na deterioração acelerada do pavimento e custos de manutenção. Estudos têm indicado que a cal livre presente nas escórias é responsável pela precipitação da tufa (Hurd, 1988).

As reações químicas entre a cal livre e a água da chuva ocorrem sobre a superfície do pavimento formando hidróxido de cálcio que vai se depositar nos drenos, elevando o pH a valores acima de 11. Além disso, altas concentrações de dióxido de carbono provenientes da atmosfera e dos escapamentos dos automóveis reagem com a água da chuva formando ácido carbônico que, reagindo com o hidróxido de cálcio, forma o bicarbonato de cálcio que é mais solúvel em água que a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ).

Nas saídas dos sistemas de drenagem, a água contendo a solução de bicarbonato de cálcio [ $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ] evapora quando em condições de alta temperatura e o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) evapora para a atmosfera, ocorrendo então a deposição do carbonato de cálcio e a formação da tufa. Temperaturas elevadas tendem a aumentar os níveis de deposição de tufa nas saídas dos sistemas de drenagem, enquanto que em baixas temperaturas o dióxido de carbono mantém-se em solução favorecendo a dissolução. Sendo assim, existe uma tendência de que maior quantidade de tufa se forme durante os meses de verão. A concentração de cal livre, água, dióxido de carbono, temperatura e a umidade são os principais fatores controladores da deposição de tufa nos drenos e vasos coletores de rodovias (Gupta *et al*, 1994).

### **3.3.2 Outras Possíveis Utilizações**

As escórias de aciaria têm sido usadas em pequenas quantidades para produção do cimento, pois suas propriedades hidráulicas são mais pobres se comparadas à escória granulada de alto-forno. Também pode ser usada na indústria de cimento como matéria-prima

para produção do clínquer, tendo em vista que a composição das escórias de aciaria, quando expressa em óxidos, é semelhante à encontrada no cimento Portland permitindo temperatura de queima mais baixa, uma redução no consumo de energia (Geiseler, 1996), diminuição do consumo de matérias-primas naturais e da emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Essa utilização tem sido pouco explorada devido a falta de tecnologia desenvolvida para esta finalidade. A variação na composição química e o baixo controle de qualidade da escória de aciaria geram dificuldades para este emprego.

Entretanto, Montgomery e Wang (1991) e Taylor (1997) afirmam que, mesmo apresentando os mesmos elementos presentes no clínquer de cimento Portland, ou seja, Si<sup>+2</sup>, Al<sup>+3</sup>, Fe<sup>+2</sup> e Ca<sup>+2</sup>, os teores desses elementos, expressos em óxidos, são consideravelmente diferentes. Uma importante diferença é o teor de ferro muito superior ao desejável na sua composição, nas formas bivalente (FeO) e trivalente (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e, principalmente, por encontrar-se também no estado elementar (Fe<sup>0</sup>).

Buscando minimizar os problemas gerados pela grande variação química e mineralógica da escória de aciaria na fabricação do clínquer, estudou-se o ajuste da composição química da fase não metálica, por adição de outras espécies químicas como o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e o SiO<sub>2</sub> (Dziarmagowski et al, 1992; Piret e Dralants, 1984).

A utilização da escória de aciaria, na produção do clínquer, depende, de modo geral, da redução da quantidade de ferro metálico existente e do ajuste da composição química, da basicidade expressa pela relação CaO/SiO<sub>2</sub> e da dissolução do MgO, tal que o teor livre remanescente na forma de periclásio não ultrapasse 5%.

Na década de 70 mais de 30% do cimento produzido em países como a Polônia, Holanda, Bélgica, Romênia, França e Ex-URSS continha escória, em teores entre 5% e 95% (Geyer, 2000).

A escória de aciaria também pode ser utilizada como matéria-prima na fabricação de cimento alternativo. A fabricação de cimento de escória de aciaria já possui uma história de mais de 10 anos. É necessário o equilíbrio químico da escória de aciaria, a fim de agregar a este resíduo propriedades cimentícias. Na década de 70, foram realizados estudos preliminares com esta finalidade e concluiu-se que a estabilidade do cimento de escória é função da estabilidade dos constituintes expansivos, a cal livre (CaO livre) e o periclásio (MgO livre). A estabilização do MgO seria alcançada através da adição de uma quantidade de escória de alto-

forno ou outro material silicoso semelhante (Shousun, 1980 *apud* Masuero, 2001). Masuero (2001) avaliou a viabilidade técnica do uso de escória de aciaria elétrica estabilizada por resfriamento brusco como substituição ao cimento e verificou que o desempenho apresentado pelas argamassas com escória é igual ou superior ao de argamassas com cimento.

As escórias de aciaria também podem ser utilizadas como agregado pétreo ou como aditivo na estabilização de solos, visando ganho de resistência. Na Argentina, em especial na província de Santa Fe, é muito empregada como agregado, devido à carência deste tipo de material, podendo ser utilizada tanto a escória de alto-forno quanto a de aciaria. A escória de aciaria é considerada adequada à estabilização de solos devido às seguintes características (López et al, 1989): elevada rugosidade superficial, excelente coeficiente de forma, elevada angulosidade e elevada resistência ao desgaste. Porém, a utilização das escórias de aciaria na estabilização de solos ainda é bastante limitada, visto que a sua baixa estabilidade volumétrica impede a aplicação em solos que necessitam de controle da deformabilidade.

Por apresentar elevados teores de CaO e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, as escórias de aciaria também podem ser empregadas como fertilizantes ou aditivo no cultivo de plantas ou algas. No entanto, a presença de álcalis e de chumbo (Pb) tem limitado o seu uso devido a problemas de toxicidade (López et al, 1989).

Nas próprias siderúrgicas, parte da escória de aciaria tem sido empregada como fundente e proteção do revestimento refratário dos fornos, substituindo parte da cal e do calcário utilizados nos processos de produção do aço e do ferro (von Krüger, 1995).

Outra forma de reciclagem da escória de aciaria é como agregado para lastro ferroviário. Assim como para utilização como agregado para pavimentação, a escória de aciaria deve passar por um período de cura para poder ser empregada como agregado para construção de leito de ferrovias, visto que a característica expansiva também é indesejável para este emprego.

### **3.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS**

As limitações do uso da escória de aciaria devido ao seu elevado potencial de expansão, têm levado ao desenvolvimento de diversos métodos de avaliação e quantificação

deste fenômeno. Os métodos tradicionalmente empregados são adaptados para atender aos requisitos de compacidade e estabilidade volumétrica em materiais para pavimentação. Tal fato é justificado, visto que a principal utilização da escória de aciaria é como agregado para base e sub-base de rodovias.

Devido ao surgimento de novas aplicações para a escória de aciaria, nas quais é exigido um controle mais rigoroso da expansão, deve-se considerar que esta ocorre em função da elevada reatividade da cal livre e do periclásio com a água, existindo, então, a necessidade de um método que considere este efeito.

A base para os métodos tradicionais é a norma ASTM D 698, que especifica o ensaio de compactação de solos. Utilizam-se corpos de prova cilíndricos e as medidas de expansão são feitas com o material em imersão e estimadas em função do aumento da altura. A partir da norma japonesa JIS A 5015/92 foram feitas adaptações, gerando os métodos ASTM D 4792/95 e PTM 130/78. No Brasil, este método é adaptado pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) nas normas ME 228/89 e ME 192/89.

Entre os métodos tradicionalmente utilizados destacam-se:

- a norma JIS A 5015/92 - especifica um método de ensaio e critérios de expansão para escórias de aciaria. O ensaio consiste na moldagem de três corpos de prova cilíndricos de escória, compactados em três camadas na umidade ótima estabelecida através do ensaio de compactação. Durante o ensaio os corpos de prova são submersos em água e sujeitos a ciclos de aquecimento a uma temperatura de 80°C, medindo-se diariamente a variação da altura do corpo de prova;
- o método de ensaio PTM 130/78 do Departamento de Transportes da Pensilvania, adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG) – consiste na imersão de corpos de prova cilíndricos em água à temperatura de  $(71 \pm 3)^\circ\text{C}$  por um período de 7 dias, sendo feitas leituras diárias da variação volumétrica em função do aumento de altura do corpo de prova. Após 7 dias, o corpo de prova é removido da água mas mantido na condição saturada por adição de água. As medidas de expansão são feitas por mais 7 dias nesta condição. A percentagem de expansão volumétrica total é igual a variação volumétrica específica após os 14 dias. Este método considera que alguns materiais podem

expandir mais rapidamente na condição saturada que em submersão (Kandhal e Hoffman, 1997);

- o método ASTM D 4792/95 (Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions) – consiste na imersão de corpos de prova cilíndricos em água à temperatura de  $(71 \pm 2)^{\circ}\text{C}$  e na leitura da variação volumétrica dos mesmos em função do aumento de altura do corpo de prova. Este método será melhor detalhado no Capítulo 4 – Métodos Utilizados.

Grande dispersão de resultados de expansão da escória de aciaria pode ser obtida devido às diferenças nos procedimentos apresentados pelos métodos de ensaio.

Observou-se, através do método ASTM D 4792/95, que escórias de aciaria com densidade entre 3,53 e 3,58, teores de CaO total de 41,5% e 45,3% e com teores de cal livre entre 3% e 4,7%, apresentam um grau de expansão de 1%, em 168 horas de ensaio (Coomarasamy e Walzak, 1995).

Através do método de ensaio JIS A 5015/92, verificou-se que escórias de aciaria do tipo LD, com densidade de 3,57, teores de CaO total de 40,9% e um teor de cal livre de 5,8%, apresentaram níveis de expansão de 1,5% em 240 horas e 2,0% em 720 horas (Gumieri *et al*, 1999).

Emery (1978), através de um procedimento baseado no método do ensaio de compactação (ASTM C 698/91), verificou que o grau de expansão da escória de aciaria com densidade entre 3,2 e 3,5 e 3,3% de cal livre foi dos mais elevados, variando entre 5% e 9% e entre 1,5% e 4%, a  $60^{\circ}\text{C}$ , em 168 horas.

As diferenças nos valores de expansão encontrados são decorrentes da diversidade de condições experimentais dos métodos de ensaio e da heterogeneidade do material. No entanto, todas as técnicas utilizadas comprovam a instabilidade dimensional das escórias e a necessidade de critérios mais rígidos de avaliação do fenômeno.

### 3.5 A ESTABILIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA

A estabilização da escória de aciaria está associada à formação de produtos estáveis, seja por hidratação da cal livre e do periclásio ou carbonatação dos produtos hidratados gerados por estes óxidos. Os compostos gerados através destas reações são estáveis volumetricamente, devido ao tempo de estocagem e ao grau de exposição do material à umidade, temperatura e teor de CO<sub>2</sub>. Por esta razão, durante a cura o agregado deve estar sujeito a condições que possibilitem a hidratação ou carbonatação completa dessas espécies químicas ao longo do tempo (Thomas, 1978).

O procedimento mais empregado para reduzir ao mínimo o fenômeno de expansão é o de envelhecer ou “curar” a escória no pátio, regando-a com água natural ou aquecida buscando a hidratação dos elementos instáveis, em especial a cal virgem e o periclásio. O período de estocagem é função do conteúdo de cal livre, podendo oscilar entre 3 meses e um ano, ainda que alguns países utilizam escória fresca para algumas aplicações.

Pode-se sugerir dois procedimentos para aumentar a velocidade de cura da escória de aciaria: reduzir a granulometria do material, visando aumentar a superfície de contato da escória com a água e facilitar as reações de hidratação, e aumentar o teor de umidade do meio até a saturação (Machado, 2000).

No processo de cura normalmente empregado, a escória de aciaria é solidificada por resfriamento, britada e empilhada ao ar livre, mantendo-a nesta situação até a sua estabilização. Este processo de cura requer um tempo de exposição de pelo menos um ano e necessita de um pátio espaçoso (Lima, 1999). Porém, de acordo com Seki *et al* (1986), as escórias de aciaria, quando expostas à ação das intempéries, estabilizam-se em um período mínimo de 3 meses. O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem determina que o tempo de exposição ao ar livre das escórias de aciaria deve ser de no mínimo 6 meses – mesmo tempo exigido pelo ODOT (Ohio Department of Transportation). Após este período, as características expansivas das escórias devem ser analisadas levando em consideração a aplicação do material (Geyer, 2000).

Após a solidificação e britagem, no processo de cura acelerada, a escória de aciaria é submetida à cura por água quente, através de aspersão, ou cura por vapor, através da injeção

de vapor ou passagem por zona de vapor. Tais processos permitem acelerar a estabilização da escória, podendo reduzir o tempo de cura para até algumas semanas.

A siderúrgica japonesa DAIDO STEEL tem realizado pesquisas por meio de testes de campo, no intuito de caracterizar o comportamento da escória de aciaria elétrica buscando a estabilização da expansibilidade. Com esta finalidade estão sendo desenvolvidas técnicas de envelhecimento a vapor, através da adoção de um sistema de sopro de vapor a uma temperatura de 110°C no fundo da pilha de escória com altura de 3 metros. O processo de envelhecimento é agilizado através da utilização de uma lona de borracha que reveste o topo da pilha, minimizando a perda do vapor injetado. Por este processo a expansibilidade exigida pela norma japonesa (1,5%) é atingida com 18 dias de envelhecimento. O procedimento padrão é de 20 dias, após os quais a escória é liberada para uso (Geyer, 2000).

### **3.6 IMPACTO AMBIENTAL**

Uma das maneiras mais convenientes para a utilização de resíduos industriais é a produção de agregados. O uso de resíduos como agregados para pavimentação apresenta diversos benefícios, pois além de minimizar as agressões ao meio ambiente, como as causadas pela deposição de resíduos em aterros e a emissão de gases poluentes, como o CO<sub>2</sub>, a reciclagem ou a utilização de subprodutos também é responsável pela redução da extração predatória de recursos naturais, como a exploração de jazidas de agregados. No entanto é necessário avaliar a possibilidade da ocorrência de danos ao meio ambiente devidos à utilização destes materiais alternativos.

O principal impacto ambiental devido à utilização de um resíduo como base e sub-base de pavimentos é a solubilização de substâncias nocivas presentes em sua composição, para a água e o solo (Gidley e Sack, 1984).

Para determinar as conseqüências ambientais do armazenamento e utilização dos resíduos, é necessário o entendimento das características de lixiviação e solubilização dos mesmos. Conhecer a morfologia e a composição química do resíduo pode dar uma indicação do comportamento do mesmo quando lixiviado. Mas, ensaios de lixiviação e solubilização são

indicativos mais seguros deste comportamento, podendo indicar quais elementos serão realmente liberados e as conseqüências desta liberação para a qualidade das águas.

Ao avaliar o impacto ambiental causado pela utilização da escória de aciaria, Mâncio (2001) observou que quando submetida ao ensaio de lixiviação nenhum elemento presente na composição química do material foi lixiviado. Entretanto, avaliando os resultados obtidos através da análise do extrato solubilizado, verificou que o teor de fluoreto (F<sup>-</sup>) ultrapassou o padrão de potabilidade da água, estabelecido pela NBR 10004 (ABNT, 1987), classificando a escória de aciaria como um resíduo classe II – não-inerte.

Tessari (1998) realizou ensaios de lixiviação e solubilização da cinza pesada proveniente da Usina Termelétrica de Charqueadas e verificou que nenhum dos metais presentes na composição química da cinza pesada foi lixiviado ou solubilizado em proporção maior do que os limites estipulados pela NBR 10004 (ABNT, 1987), portanto a cinza pesada trata-se de um resíduo inerte. Quando realizou ensaios de lixiviação e solubilização de amostras de misturas contendo solo residual de arenito botucatu, cinza pesada e cal de carbureto, Thomé (1999) classificou esta mistura como material inerte.



## 4 MÉTODOS UTILIZADOS

### 4.1 AMOSTRAGEM

Para a execução desta pesquisa, formaram-se duas pilhas de estocagem de escória de aciaria elétrica, buscando estudar os agregados produzidos com diferentes composições. Tendo em vista o volume de escória gerado mensalmente e a área disponível no pátio da siderúrgica para a estocagem, definiu-se as dimensões das pilhas a serem formadas. É importante salientar que as pilhas foram formadas com a escória gerada durante o período de um mês, visando garantir que estas fossem representativas do resíduo gerado pela siderúrgica estudada. As pilhas foram identificadas como descreve o Quadro 4.1.

QUADRO 4.1 - Identificação das pilhas de estocagem.

	Misturada	Forno
Composição	Escória oxidante + redutora	Escória oxidante
Granulometria	0 a 1” (0 a 25,4 mm)	0 a 1” (0 a 25,4 mm)
Dimensões aproximadas	20 x 25 x 3 (m)	5 x 13 x 3 (m)
Quantidade aproximada	2500 toneladas	330 toneladas

Denominou-se “Misturada” a mistura das escórias provenientes do forno elétrico (oxidante) e do forno-panela (redutora). Normalmente não é realizada a separação das escórias, porém a fim de verificar qual a influência da mistura da escória do forno-panela (com maior teor de CaO e menor teor de FeO em relação à escória oxidante) à escória do forno elétrico, foi formada uma pilha de estocagem experimental somente com a escória do forno elétrico.

A partir do término da formação das pilhas de estocagem, foram realizadas amostragens mensais, visando avaliar o comportamento do material quando exposto a diferentes períodos de envelhecimento ao ar livre. Neste trabalho são analisadas amostras coletadas durante os seis primeiros meses de exposição.

Para a realização da amostragem, primeiramente foram selecionados dois procedimentos recomendados por órgãos de normalização. A primeira opção foi a norma NBR 10.007 – Amostragem de Resíduos (ABNT, 1987) que define uma amostra representativa como uma parcela do resíduo a ser estudado, obtida por um processo de amostragem, apresentando as mesmas características e propriedades da massa total de resíduos. Quando da realização da primeira amostragem este procedimento mostrou-se ineficiente para a amostragem em pilhas de escória de aciaria elétrica. Em função da grande dimensão das pilhas de estocagem, das grandes quantidades coletadas a cada mês – necessárias para a garantia da representatividade da amostra e para a execução dos ensaios propostos – e das características dos grãos de escória, tornou-se inviável a utilização do *amostrador padrão para montes ou pilhas* recomendado (Mancio, 2001).

A segunda opção foi o procedimento recomendado pelo DNER (1990), específico para amostragem de pilhas de escória, que sugere a coleta de amostras de diferentes pontos do lote com o auxílio de uma pá, até atingir um total de aproximadamente 400 litros. No entanto este método mostrou-se limitado, visto que com o auxílio de uma pá somente é possível coletar amostras da superfície do monte de escória, deixando-se de obter amostras da zona central e inferior da pilha. Além disso, a forma granular e o tamanho dos grãos do material torna a escavação manual bastante difícil, além de ocorrer facilmente o desmoronamento das paredes laterais da escavação (Mancio, 2001).

Tendo em vista as limitações dos métodos recomendados para amostragem, optou-se por dividir horizontalmente a pilha em seis quadrantes e verticalmente em duas profundidades. A cada amostragem, com o auxílio de uma máquina retro-escavadeira com pá pequena, foram coletadas amostras de pelo menos três quadrantes distintos, tanto na parte superior da pilha quanto na inferior. A Figura 4.1 apresenta o método de amostragem. Foram retirados a cada mês cerca de 500 kg de escória de cada pilha, sendo o material armazenado em tonéis metálicos de 200 litros, que foram guardados em depósito fechado até a realização dos ensaios.



FIGURA 4.1 – Amostragem na pilha de estocagem de escória.

## 4.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Na fase experimental de caracterização da escória de aciaria realizou-se a análise granulométrica por peneiramento, seguindo o método DNER-ME 083/94.

## 4.3 RESISTÊNCIA À ABRASÃO

Nas estruturas de pavimentos o agregado está sujeito a forças de abrasão e impacto oriundas das cargas do tráfego. Estas forças podem quebrar os agregados, alterando sua granulometria, podendo desgastar as partículas.

A resistência à abrasão foi determinada utilizando o equipamento de Los Angeles seguindo o método proposto pelo DNER-ME 035/94, visando avaliar a resistência dos agregados à ação do tráfego..

#### **4.4 DENSIDADE REAL DOS GRÃOS**

A densidade real do agregado foi determinada seguindo os métodos DNER-ME 084/94 e DNER-ME 081/94, para o agregado miúdo e graúdo, respectivamente. Com os resultados fez-se uma ponderação de acordo com a composição granulométrica para chegar-se a um valor para o material.

#### **4.5 ENSAIOS DE DURABILIDADE**

As amostras de escória de aciaria foram submetidas a ensaios de durabilidade seguindo o método DNER – ME 089/94.

Algumas frações do agregado necessárias para o ensaio foram obtidas pela britagem do material em britador de mandíbulas. O ensaio foi executado fazendo-se a imersão da amostra em solução de sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) anidro e secagem em estufa. Esse procedimento foi repetido 5 vezes.

#### **4.6 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO**

Visando determinar os pesos específicos aparentes secos máximos e as umidades ótimas das escórias de aciaria e das misturas de escória e aditivos foram realizados ensaios de compactação na energia de Proctor Modificado, de acordo com o método DNER-ME 129/94.

#### **4.7 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA**

O Índice de Suporte Califórnia (ISC) das escórias e das misturas foi determinado conforme o método DNER-ME 050/94.

Para cada amostra foram moldados corpos de prova com teores de umidade diferentes, buscando traçar a curva ISC *versus* teor de umidade, sendo adotado como ISC o

valor correspondente à umidade ótima determinada através do ensaio de compactação. A energia de compactação adotada foi a do Proctor Modificado.

Foi utilizada uma prensa da marca Solotest com anel dinamométrico com capacidade de 5.000 kgf.

Durante o período de imersão dos corpos de prova foi acompanhada a evolução da expansão.

#### **4.8 ENSAIOS DE EXPANSÃO**

Visando avaliar o potencial expansivo do agregado de escória de aciaria elétrica para uso em base e sub-base de pavimentos optou-se por realizar os ensaios de expansão empregando o método proposto pela ASTM D 4792/95 – Determinação da expansibilidade de agregados a partir de reações de hidratação.

Este método foi escolhido por ser o mais utilizado e recomendado na bibliografia internacional (Emery e Farrand, 1995; Coomarasamy e Walzak, 1995; SSTC, 1996; Garcia *et al.*, 1999; Chesner *et al.*, 2001).

Este ensaio consiste basicamente na medição da expansão volumétrica de três amostras compactadas de escória, imersas em água à temperatura de  $(70 \pm 3)^{\circ}\text{C}$  durante um período de 7 dias (168 horas).

Em cada ensaio foram compactados três amostras empregando cilindros metálicos de diâmetro igual a 152,4 mm e altura de 177,8 mm. Os corpos de prova foram compactados em três camadas de 56 golpes com soquete de 2,5 kg e altura de queda de 305 mm. A umidade de moldagem foi a obtida a partir dos ensaios de compactação.

A expansão dos corpos de prova foi determinada a partir das leituras dos deslocamentos verticais. Para possibilitar leituras quase contínuas, foram instalados sensores de deslocamento conectados a um sistema de aquisição de dados que executa medições a cada 30 minutos, com resolução de 0,01 mm. Os dados obtidos foram plotados em gráficos mostrando a variação do percentual de expansão em função do tempo.

#### 4.9 DOSAGEM DAS MISTURAS DE ESCÓRIA E CINZA

Foram adotados quatro teores de cinza pesada nas misturas: 10%, 20%, 33% e 50% (em peso) visando avaliar a influência da quantidade deste material nas características mecânicas da mistura.

#### 4.10 DOSAGEM DA MISTURA DE ESCÓRIA E CAL

A determinação da quantidade mínima de cal na mistura escória-cal foi feita através do método do ICL ( Initial Consumption of Lime), proposto por Rogers *et al.* (1997). Este método é uma variação do método proposto por Eades & Grim (1966), o qual consiste em adicionar cal à mistura e realizar medidas do pH da mesma. Pelo método do ICL, o teor mínimo é aquele que leva a um valor máximo de pH. Porém adotou-se 12 como pH mínimo a ser obtido pela mistura, pois não foi possível atingir 12,4 conforme recomenda o método proposto por Eades & Grim (1966).

O procedimento adotado consistiu das seguintes etapas:

- a) Foi feita a mistura de aproximadamente 100 g de material com cal de carbureto, sendo que a escória foi passada na peneira nº 10 (2,0 mm) e a cal na peneira nº 40 (0,42 mm). Foram usadas as seguintes porcentagens de cal de carbureto em relação ao peso seco de escória: 0% a 8% (variando 1%), 13%, 18% e 23%;
- b) 20 g desta mistura foram colocadas em provetas e adicionou-se água destilada na mesma quantidade, isto é, a relação água/material seco igual a um;
- c) A solução foi agitada com ajuda de um bastão de vidro por 30 segundos e em seguida deixada em repouso;
- d) A cada 10 minutos repetiu-se o processo de agitação por 30 segundos e no final de 1 hora mediu-se o pH;
- e) Os resultados dos diversos teores foram plotados em um gráfico pH *versus* teor de cal. O valor ótimo foi aquele que elevou o pH a 12,0.

#### 4.11 DOSAGEM DAS MISTURAS DE ESCÓRIA, CINZA E CAL

Visando melhorar as características de resistência, suporte e deformabilidade das misturas escória-cinza pesada optou-se pelo acréscimo de pequena quantidade de cal de carbureto, a porcentagem a ser empregada pode variar de 0,5% a 3% em peso (Guimarães, 1997).

Foram adotados 1% e 3% (sobre o peso total da mistura contendo escória e cinza pesada) como teores de cal empregados nas misturas contendo 20% e 33% de cinza pesada.

#### 4.12 ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

A realização dos ensaios de compressão simples seguiu os procedimentos descritos no método de ensaio DNER-ME 180/94. Os ensaios foram realizados através de deformação controlada, com velocidade de 1,14 mm/min. A prensa utilizada para ruptura dos corpos de prova, da marca Wykeham Farrance, tinha capacidade de 50 kN, adaptada com anel dinamométrico de 6 kN, previamente calibrado. Os corpos de prova não foram submetidos à imersão, pois as amostras eram muito porosas, correndo-se o risco de desintegrar os corpos de prova.

Na moldagem dos corpos de prova foram utilizados moldes cilíndricos metálicos de paredes tripartidas com 100 mm de diâmetro interno e 200 mm de altura. A compactação foi executada em cinco camadas aplicando-se 41 golpes com soquete cilíndrico de altura de queda 457,2 mm com massa igual a 4,536 kg e 50,8 mm de diâmetro – energia equivalente ao Proctor Modificado. Todos os corpos de prova foram moldados na umidade ótima obtida pelos ensaios de compactação, buscando-se alcançar o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_d$ ). Os critérios adotados para aceitação dos corpos de prova em relação aos parâmetros de compactação  $\gamma_{dmáx}$  e  $w_{ót}$  foram 2% e 3% de tolerância, respectivamente. Após a moldagem as amostras eram imediatamente embaladas em um saco plástico.

Com a finalidade de analisar a evolução das melhorias obtidas através da adição de cinza pesada e cal de carbureto no decorrer do tempo, foram adotados dois tempos de cura

(úmida à temperatura constante de  $22 \pm 2$  °C): 3 dias e 28 dias. Não realizaram-se ensaios imediatamente após a moldagem devido à dificuldade de manuseio dos corpos de prova.

#### **4.13 ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL**

Os ensaios de compressão diametral foram realizados seguindo o DNER-ME 138/94. Os equipamentos de ruptura utilizados nestes ensaios foram os mesmos descritos no item 4.10.

Na moldagem dos corpos de prova foram utilizados moldes cilíndricos com 100 mm de diâmetro interno e 65 mm de altura. A compactação foi executada em duas camadas aplicando-se 41 golpes com soquete cilíndrico de altura de queda 457,2 mm com massa igual a 4,536 kg e 50,8 mm de diâmetro – energia equivalente ao Proctor Modificado. Os critérios adotados para aceitação dos corpos de prova foram os mesmos utilizados nos ensaios de resistência à compressão simples, bem como os períodos de cura.

#### **4.14 ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA**

A deformabilidade elástica das amostras de EGC foi avaliada através de ensaios para a determinação do módulo de resiliência. Durante os ensaios os corpos de prova são submetidos a condições semelhantes às que o pavimento fica sujeito durante sua vida útil:

- cargas repetidas de curta duração com intervalos de repouso;
- cargas constantes com predominância de deformações elásticas;
- estado triaxial de tensões.

A determinação do comportamento do material quanto à deformabilidade elástica é fundamental, pois deformações elásticas excessivas nas camadas do pavimento (base, sub-base) e no subleito podem ocasionar trincamento por fadiga no revestimento asfáltico (Hveem, 1955 *apud* Medina, 1997). Para materiais granulares quanto maior o valor do módulo de resiliência (MR), melhor seu comportamento quanto a deformações elásticas.



Os ensaios para a determinação do módulo de resiliência das amostras foram realizados de acordo com os procedimentos descritos em DNER-ME 131/94.

Na moldagem dos corpos de prova foram utilizados moldes cilíndricos metálicos de paredes tripartidas com 100 mm de diâmetro interno e 200 mm de altura. A compactação foi executada em cinco camadas aplicando-se 41 golpes com soquete cilíndrico de altura de queda 457,2 mm com massa igual a 4,536 kg e 50,8 mm de diâmetro – energia equivalente ao Proctor Modificado. Todos os corpos de prova foram moldados na umidade ótima obtida pelos ensaios de compactação. Após a moldagem as amostras eram imediatamente colocadas na base da célula triaxial e ensaiadas.

#### **4.15 ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO**

Buscando verificar a possibilidade de contaminação do meio ambiente, foi avaliada a concentração total de elementos-traço em amostras de escória e das misturas – escória de aciaria, cinza pesada e cal de carbureto – curadas por um período de 14 dias. O ensaio de lixiviação seguiu os procedimentos recomendados pela NBR 10005 (ABNT, 1987) e o ensaio de solubilização seguiu as recomendações da NBR 10006 (ABNT, 1987). Os extratos foram analisados no Laboratório de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS.

## **5 ADITIVOS UTILIZADOS**

### **5.1 A CAL DE CARBURETO**

A cal de carbureto é um resíduo da indústria da fabricação de gás acetileno. É proveniente da unidade da empresa White Martins Gases Industriais S. A., localizada no município de Esteio-RS, região metropolitana de Porto Alegre.

#### **5.1.1 Forma de obtenção**

A cal de carbureto é obtida a partir da reação química entre o carbureto de cálcio e a água, sendo produtos desta reação o gás acetileno ( $C_2H_2$ ) e um resíduo líquido que apresenta em sua composição química básica o hidróxido de cálcio  $[Ca(OH)_2]$ . Após a reação, o resíduo cal de carbureto é colocado em tanques de decantação e posteriormente levado a um equipamento que acelera a redução da umidade através da aplicação de vácuo, onde é obtido na forma sólida, com teor de umidade de cerca de 50%. O resíduo é colocado então à disposição para comercialização ou é levado para aterros de deposição de resíduos sólidos. A Figura 5.1 apresenta um fluxograma da forma de obtenção da cal de carbureto.

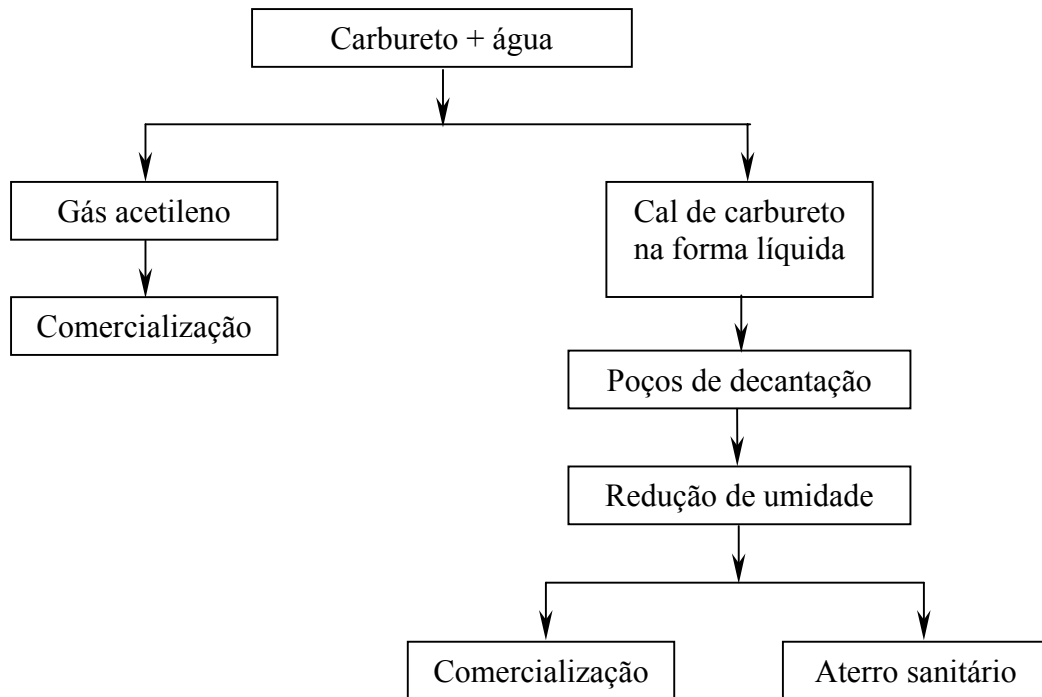


FIGURA 5.1 – Organograma da forma de obtenção da cal de carbureto (Thomé, 1999).

### 5.1.2 Propriedades físicas

A cal de carbureto é constituída por pequenas partículas de coloração cinza claro, com tom levemente azulado, devido a presença de carbono em pequena quantidade. Tal característica representa a principal restrição para a utilização do material na construção civil, visto que tradicionalmente associa-se o produto cal com a cor branca. O material apresenta finura do material retido na peneira nº 30 de 12,7% e do material retido na peneira nº 200 de 56,6%, sendo formado por partículas de diferentes formas e tamanhos, apresentando pequenas partículas de hidróxido de cálcio com morfologia característica de placas planas hexagonais (Metha & Monteiro, 1994).

### 5.1.3 Propriedades químicas

A cal de carbureto é classificada como uma cal cálcica, visto que é formada basicamente por óxido de cálcio, apresentando maior pureza se comparada às cales

produzidas comercialmente no RS, obtidas a partir do calcário gaúcho que apresenta natureza dolomítica. Sendo, portanto, a cal de carbureto mais reativa que a cal comercial. A Tabela 5.1 apresenta as principais propriedades químicas da cal de carbureto em comparação com a cal comercial produzida no RS.

TABELA 5.1 – Propriedades químicas da cal de carbureto (Thomé, 1999).

Propriedade	Cal de carbureto	Cal comercial
Óxido de cálcio (CaO)	95,1%	30,0%
Óxido de magnésio (MgO)	1,5%	54,3%
Resíduos insolúveis	0,7%	---
CaO + MgO (bases não voláteis)	96,6 ( $\geq 88\%$ )**	84,3%
Carbono orgânico	0,1%	---

\*\* Limite NBR 7175 (ABNT, 1994)

## 5.2 A CINZA PESADA

A cinza pesada empregada resultou da queima do carvão mineral proveniente das minas do município de Capão do Leão-RS, na Usina Termelétrica de Charqueadas, localizada no município de Charqueadas-RS, distante 70 km de Porto Alegre-RS.

### 5.2.1 Forma de obtenção

O carvão mineral, após extraído da mina, passa por processos de lavagem e redução de tamanho para que o rendimento de queima seja melhorado. Este carvão é pulverizado dentro da câmara de combustão gerando calor e dois resíduos, denominados de cinza volante (fly ash) e cinza pesada (bottom ash), sendo diferenciadas basicamente pelo tamanho e forma das partículas e pela forma de obtenção. As cinzas pesadas depositam-se no fundo da câmara de combustão e são retiradas por via aquosa, sendo transportadas para tanques de decantação.

Após terminado o processo de decantação, as cinzas pesadas são transportadas, por via rodoviária, para um depósito localizado nas minas de carvão já exploradas. Por outro lado, as cinzas volantes são carregadas pelo ar aquecido e gases resultantes do processo de combustão e são recuperadas nos precipitadores eletrostáticos, sendo armazenadas em silos. Parte da cinza volante é comercializada e utilizada na produção de cimento pozolânico. Na Usina Termelétrica de Charqueadas, quando a capacidade de armazenagem em silos está completa, parte da cinza volante é colocada nos tanques de decantação por via aquosa e misturada com a cinza pesada, para depois ser transportada para minas já desativadas. A Figura 5.2 apresenta um fluxograma da forma de obtenção das cinzas.

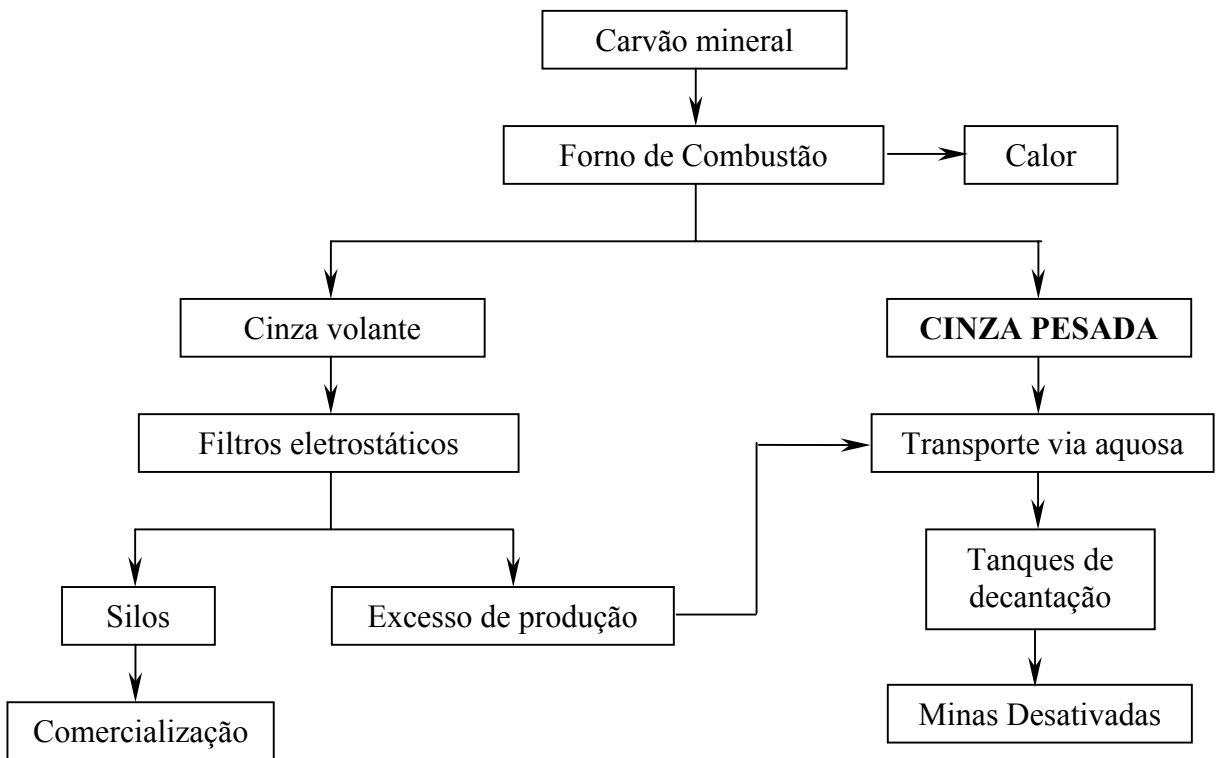


FIGURA 5.2 – Processo de obtenção da cinza pesada e da cinza volante na Usina Termelétrica de Charqueadas (Thomé, 1999).

### 5.2.2 Propriedades físicas

A cinza pesada da Usina Termelétrica de Charqueadas é formada por um material não plástico de cor preta acinzentada. A análise granulométrica do material indicou a presença de 6% da fração argila ( $<0,005$  mm), 35% da fração silte ( $0,005 - 0,074$  mm) e 59% da fração areia, sendo que desta porcentagem 44,9% é de areia fina ( $0,074 - 0,42$  mm) e somente 14,1% de areia média ( $0,42 - 2,0$  mm). A partir da análise granulométrica e sabendo-se que o material é não plástico, é possível classificar-se a cinza pesada. Pela classificação HRB, classifica-se como **A-2-4** e pela classificação unificada como **SM** (areia siltosa) (Thomé, 1999).

A cinza pesada apresenta massa específica real dos grãos de  $2,08 \text{ g/cm}^3$ , bem inferior aos valores característicos de solos, que estão em torno de  $2,60 \text{ g/cm}^3$ . Esta diferença ocorre em consequência da presença de carbono em sua composição, que possui baixa massa específica. As partículas possuem uma textura porosa e vesicular e são facilmente “quebráveis” quando submetidas a carregamento ou compactação (Chesner *et al*, 1998) e é comum a ocorrência de partículas com diâmetros inferiores a  $1\mu\text{m}$ . Pequenas partículas são mais reativas, garantindo pozolanicidade ao material.

Os índices de vazios entre 1,04 e 2,08 apresentados pela cinza pesada, são bastante altos se comparados a um solo de granulometria semelhante como de uma areia siltosa, em que os índices de vazios variam entre 0,30 e 0,90 (Lambe & Whitman, 1979).

Quando submetida a ensaios de compactação com a energia de Proctor Modificado, apresenta umidade ótima de 34,5% e massa específica aparente seca máxima de  $1,14 \text{ g/cm}^3$ . Não ocorrendo variação significativa do peso específico aparente seco com o teor de umidade, o que é característico de materiais granulares (Thomé, 1999).

### 5.2.3 Propriedades químicas

As cinzas pesadas são compostas principalmente por sílica, alumina e óxido de ferro, contendo também pequenas porcentagens de óxidos de cálcio, óxidos de magnésio, sulfatos e outros componentes. A Tabela 5.1 apresenta a composição química da cinza pesada da Usina

Termelétrica de Charqueadas. Pode-se observar que somando os óxidos de silício, alumínio e ferro, tem-se mais de 90% do total dos óxidos constituintes da cinza pesada.

As elevadas porcentagens de sílica e alumina são responsáveis pela reatividade dessa cinza com a cal presente na composição química da escória e com a cal de carbureto.

TABELA 5.2 – Características químicas da cinza pesada de Charqueadas (Sánchez *et al*, 1998).

Característica química	
Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	64,40%
Óxido de Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	24,50%
Óxido de Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,50%
Óxido de Cálcio (CaO)	1,31%
Óxido de Magnésio (MgO)	0,40%
Óxido de Enxofre (SO <sub>3</sub> )	0,11%
Óxido de Sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,58%
Óxido de Potássio (K <sub>2</sub> O)	1,60%
Perda ao fogo	2,12%
pH	8,9

### 5.3 A ÁGUA

Na execução dos ensaios de laboratório utilizou-se água destilada, exceto para os ensaios de compactação e ISC, nos quais foi utilizada água potável, proveniente da rede pública de abastecimento.

## 6 ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA COMO AGREGADO PARA PAVIMENTAÇÃO – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados da fase experimental do estudo do emprego da escória de aciaria elétrica como material para base e sub-base de pavimentos.

A escória de aciaria utilizada nesta pesquisa resultou do processo de fabricação do aço em uma siderúrgica localizada na região metropolitana de Porto Alegre-RS. Diferenciam-se dois tipos de escória: escória do refino oxidante (obtida no forno elétrico) e designada a seguir como ***Forno*** (F) e escória dos refinamentos oxidante + redutor (obtidas no forno elétrico e no forno-panela) e designada a seguir como ***Misturada*** (M).

De cada amostragem mensal foram obtidas duas amostras de escória: uma do Forno e outra Misturada, sempre na granulometria fornecida pelo processo de britagem executado durante o beneficiamento do material. A Tabela 6.1 apresenta uma média dos resultados de análises químicas elementares via ICP/AES (Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Indutivamente Acoplado) para as escórias estudadas .

TABELA 6.1 – Análise química elementar via ICP/AES das escórias Misturada e do Forno.

	Ca (%)	Si(%)	Mg(%)	Al(%)	Mn(%)	Fe(%)	Zn(%)	Cr(%)	Ti(%)
Misturada	17,9	9,4	6,9	2,2	2,9	21,5	1,2	0,42	0,40
Forno	17,3	8,3	6,6	2,0	3,2	25,7	1,0	0,42	0,42



## 6.2 GRANULOMETRIA

Após o resfriamento, a escória de aciaria passa por um processo de beneficiamento que consiste basicamente da britagem e da separação da fase metálica que ainda pode estar presente. O processo de britagem não possui nenhum controle quanto à distribuição granulométrica do material, apenas observa-se o diâmetro máximo (bitola). Sendo assim, não pode-se garantir que todas as partidas de material irão apresentar a mesma distribuição granulométrica.

Por outro lado, o processo de amostragem adotado garantiu amostras com distribuições granulométricas bem semelhantes nos diferentes tempos de estocagem. A Figura 6.1 apresenta a curva granulométrica média para as amostras das escórias Misturada e do Forno referentes aos três primeiros meses de estocagem. Observa-se que a granulometria das amostras não se enquadra em nenhuma das faixas exigidas pela especificação do DNER para a utilização como base granular de pavimentos (DNER-ES 010/71), aproximando-se mais do limite inferior da distribuição da Faixa C representada na mesma figura. Este fato alerta para a necessidade de corrigir-se a granulometria da escória estudada, através de britagem e composição.

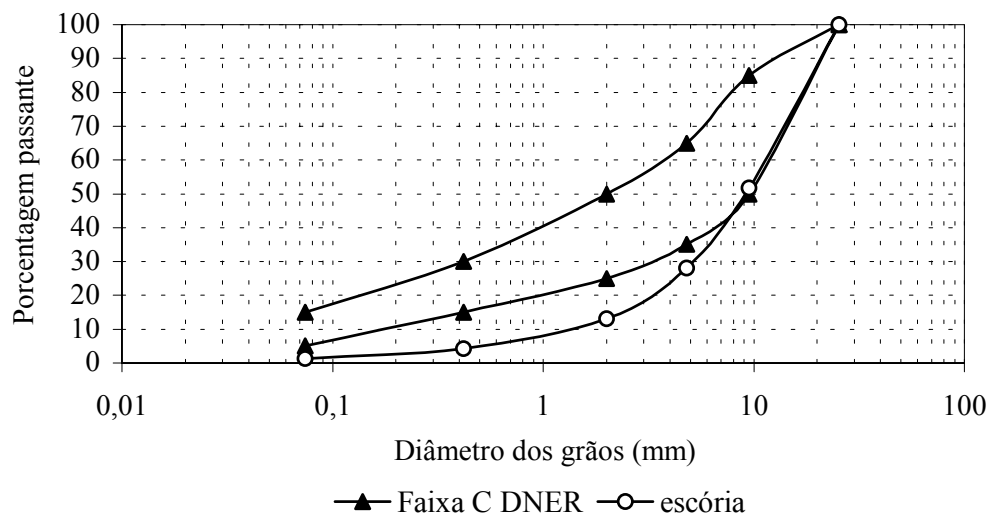


FIGURA 6.1 - Distribuição granulométrica da escória de aciaria em comparação aos limites da Faixa C do DNER.

### 6.3 COMPACTAÇÃO E CAPACIDADE DE SUPORTE DA ESCÓRIA ORIGINAL

A capacidade de suporte das amostras de escória de aciaria foi analisada através da determinação das curvas de compactação e dos Índices de Suporte Califórnia (ISC) de cada amostra.

De acordo com Lee e Suedkamp (1972), o formato tradicional da curva de compactação, com um ramo ascendente e um descendente, é característico de solos com limite de liquidez entre 30% e 70%. Curvas de compactação com formas irregulares foram obtidas para escórias de aciaria granuladas. As formas observadas apresentam 1 ½ pico ou dois picos bem definidos. A Figura 6.2 apresenta a curva de compactação da amostra do Forno mês 2 (F2) característica das amostras dos 3 primeiros meses de estocagem. As curvas apresentam dois picos bem definidos com a umidade ótima correspondendo ao máximo valor de massa específica aparente seca.

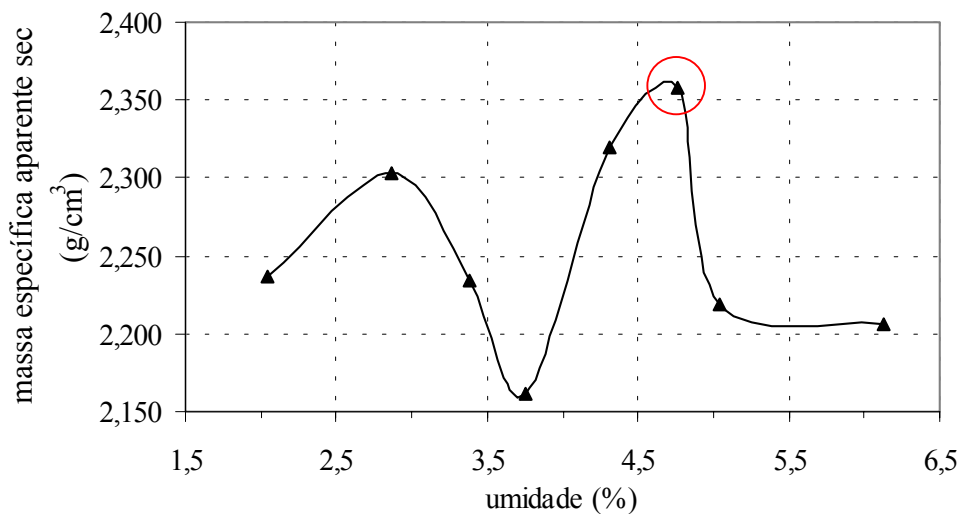


FIGURA 6.2 - Curva de compactação típica da escória de aciaria (amostra do Forno, mês 2).

Após a realização do ensaio de ISC observou-se que o maior valor deste parâmetro não corresponde à umidade ótima. Adotou-se então como ISC da amostra o valor encontrado para a umidade ótima, visto que, umidades superiores a esta causam expulsão de material fino (disperso em água) durante a compactação. A Figura 6.3 apresenta a variação do ISC com o teor de umidade de compactação para a amostra do Forno mês 2 (F2), as demais amostras coletadas nos três primeiros meses de amostragem apresentaram comportamento similar.

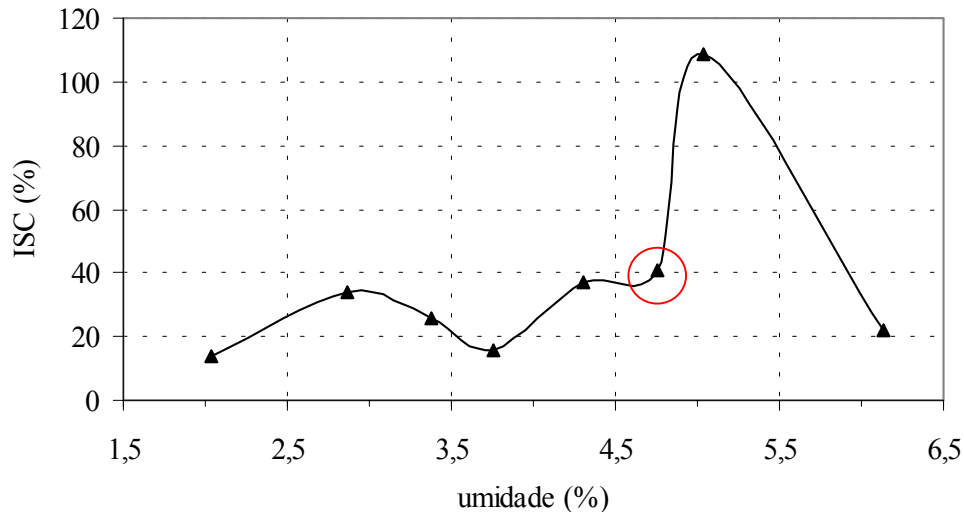


FIGURA 6.3 - Variação do ISC com a umidade de compactação (amostra do Forno, mês 2).

Por apresentar predominância do material retido na peneira de abertura 2,00 mm ( $n^{\circ}$  10), isto é, fração pedregulho, observou-se dificuldades em obter-se amostras reduzidas por quarteamento com distribuições granulométricas similares. Isso gera grande variabilidade nos resultados dos ensaios de compactação e ISC. A Tabela 6.2 apresenta os resultados de ISC e peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) obtidos para as umidades ótimas com o material coletado nas três primeiras amostragens. Devido a problemas de processamento do material coletado, não foi possível obter amostras suficientes da escória Misturada no mês 3.

TABELA 6.2 - ISC e  $\gamma_d$  obtidos para as umidades ótimas.

Amostra	Umidade ótima (%)	$\gamma_d$ (gf/cm <sup>3</sup> )	ISC (%)
Forno mês 1 (F1)	4,68	2,270	48
Forno mês 2 (F2)	4,76	2,358	41
Forno mês 3 (F3)	3,95	2,396	93
Misturada mês 1 (M1)	4,17	2,410	88
Misturada mês 2 (M2)	4,42	2,414	96

Alguns autores relatam que escórias de aciaria podem apresentar ISC acima de 100%, alcançando até 300% (Silva, 1994; Lima *et al*, 2000; Chesner *et al*, 2001(b)). Dessa forma, a obtenção de valores de ISC inferiores aos esperados deixaram clara a necessidade de corrigir a granulometria da escória.

Como já foi exposto, outros fatores reforçaram a necessidade das alterações na distribuição granulométrica da escória:

- O material não se enquadra em nenhuma faixa granulométrica especificada pelo DNER;
- A variabilidade da distribuição granulométrica das amostras reduzidas através do quarteamento;
- A dificuldade de obter-se uma boa compactação dos corpos de prova (CPs), que por sua vez dificultaria a desmoldagem, tornando inviável a realização dos ensaios de módulo de resiliência.

#### 6.4 CORREÇÃO GRANULOMÉTRICA

Estabilizar um solo, ou uma mistura de solos, significa melhorar suas características, como as de deformação e de resistência, de maneira a garantir suporte a uma determinada carga. Quando não são utilizados aditivos, ou seja, quando a estabilização é feita somente com um solo ou com misturas de solos tendo a composição granulométrica papel primordial, tem-se a chamada *estabilização granulométrica*. Tendo em vista que as características desejadas só serão obtidas após a compactação do solo ou da mistura, na prática, pode ser conhecida também como *estabilização mecânica*.

Assim sendo, a estabilização granulométrica busca atingir a máxima densificação ou resistência do material, a qual é dada pela equação 6.1, conhecida como equação de Füller, quando o expoente  $n$  for igual a 0,5.

$$\rho = \left( \frac{d}{D} \right)^n \quad [6.1]$$

onde:

$\rho$  = porcentagem passando na peneira de abertura  $d$

$D$  = diâmetro máximo do agregado

$n$  = expoente = 0,5

Na prática se o expoente  $n$  aproxima-se de 0,45 é garantida a máxima compactação do material. Para valores de  $n$  inferiores a 0,35 tem-se excesso de finos e para valores de  $n$  superiores a 0,55 não se tem finos suficientes para preencher os vazios (Santana, 1983).

A partir dos resultados de ensaios realizados com a escória de aciaria elétrica com a granulometria original pode-se observar a necessidade de corrigir a granulometria de forma a garantir melhor trabalhabilidade e atingir melhor grau de compactação, visando obter-se maior homogeneidade das amostras e resultados mais confiáveis.

Além disso, para o material ser utilizado como agregado para pavimentação ele deve obedecer às especificações do órgão regulamentador. Sendo assim optou-se pela correção granulométrica, buscando enquadrar o material na Faixa C do DNER, utilizando-se para tanto a equação (6.1) com o expoente  $n=0,45$ , que garante maior grau de compactação do material. Após efetuada a correção granulométrica chegou-se a um novo material o qual foi denominado Escória com Granulometria Corrigida (EGC), cuja curva granulométrica é apresentada na Figura 6.4.

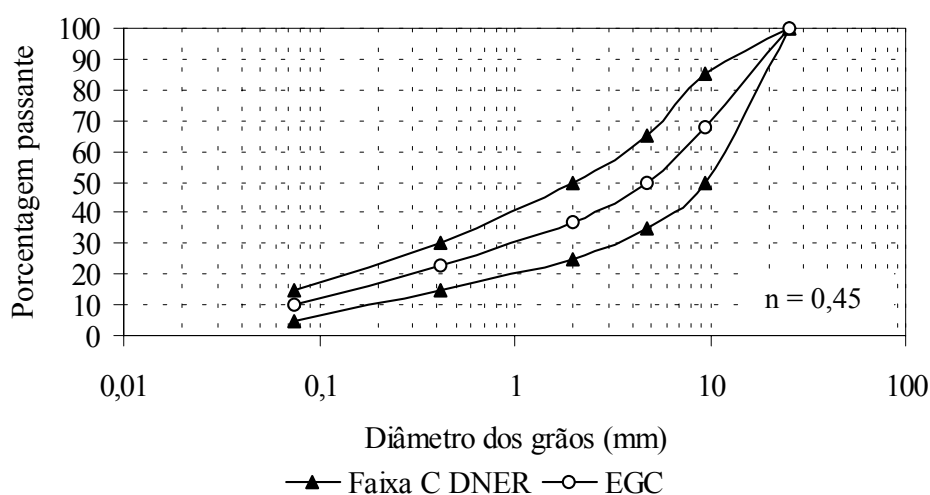


FIGURA 6.4 - Distribuição granulométrica da EGC em comparação aos limites da Faixa C do DNER.

A obtenção das amostras necessárias para a realização dos ensaios que dependem da compactação deu-se através de fracionamento do material obtido na amostragem de campo. Dessa forma, a cada mês foram processados cerca de 500 kg de material, visto que para alcançar a quantidade de material fino necessária submetia-se o material a um novo processo de britagem utilizando-se moinhos de bolas para a produção do material passante da peneira de abertura 0,075 mm (nº 200). Buscou-se obter o material fino preferencialmente através do peneiramento do material. A utilização dos britadores e moinhos de bolas só ocorria quando o material fino disponível era insuficiente para garantir a distribuição granulométrica desejada.

A correção granulométrica começou a ser feita a partir do quarto mês de estocagem, tendo em vista que não havia material disponível para realizar o processo de fracionamento para os meses anteriores.

## **6.5 COMPACTAÇÃO E CAPACIDADE DE SUPORTE DA EGC**

A partir da correção granulométrica pode-se observar maior repetibilidade dos resultados, garantida pelo fato de trabalhar-se sempre com amostras com granulometria idêntica, tornando assim os resultados dos ensaios mais confiáveis.

As Figuras 6.5 e 6.6 apresentam as curvas de compactação para as amostras de EGC Misturada e do Forno, respectivamente, curadas por 4, 5 e 6 meses. As curvas não apresentaram uma forma típica, impossibilitando a determinação do peso específico aparente seco máximo e da umidade ótima. Para definir a umidade de moldagem optou-se por seguir o critério de trabalhabilidade do material, sendo definida como a máxima umidade possível sem causar a expulsão de material fino. Esta umidade corresponde a 5%, podendo ocorrer uma variação de 0,2% para cima ou para baixo, para todas as amostras. Este procedimento foi mantido para as amostras curadas por 6 meses, embora as curvas de compactação das mesmas apresentassem a forma típica. Observou-se valores de peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) superiores aos obtidos para o material com a distribuição granulométrica original.

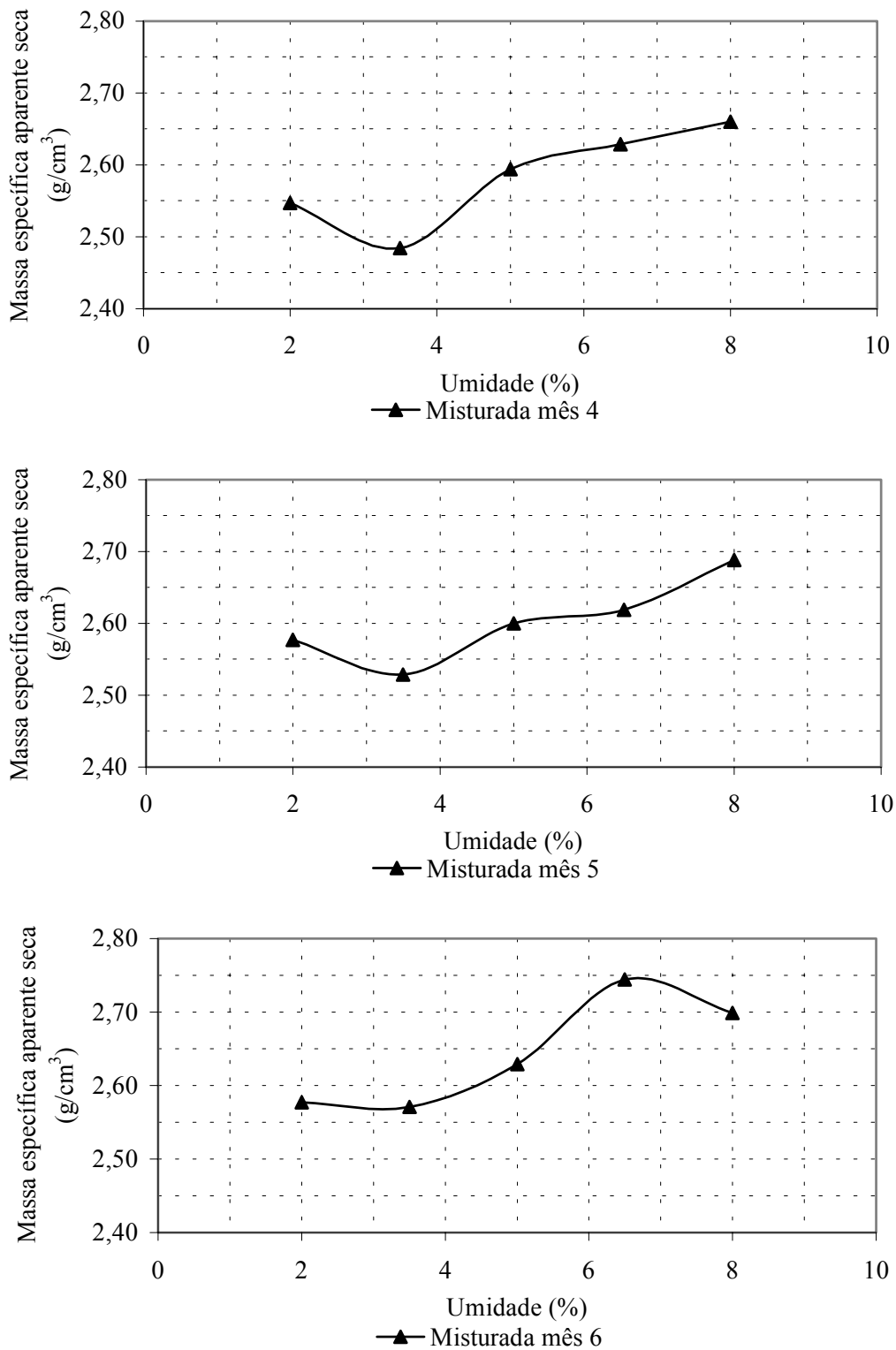


FIGURA 6.5 – Curvas de compactação das amostras de EGC Misturada estocadas por 4,5 e 6 meses.

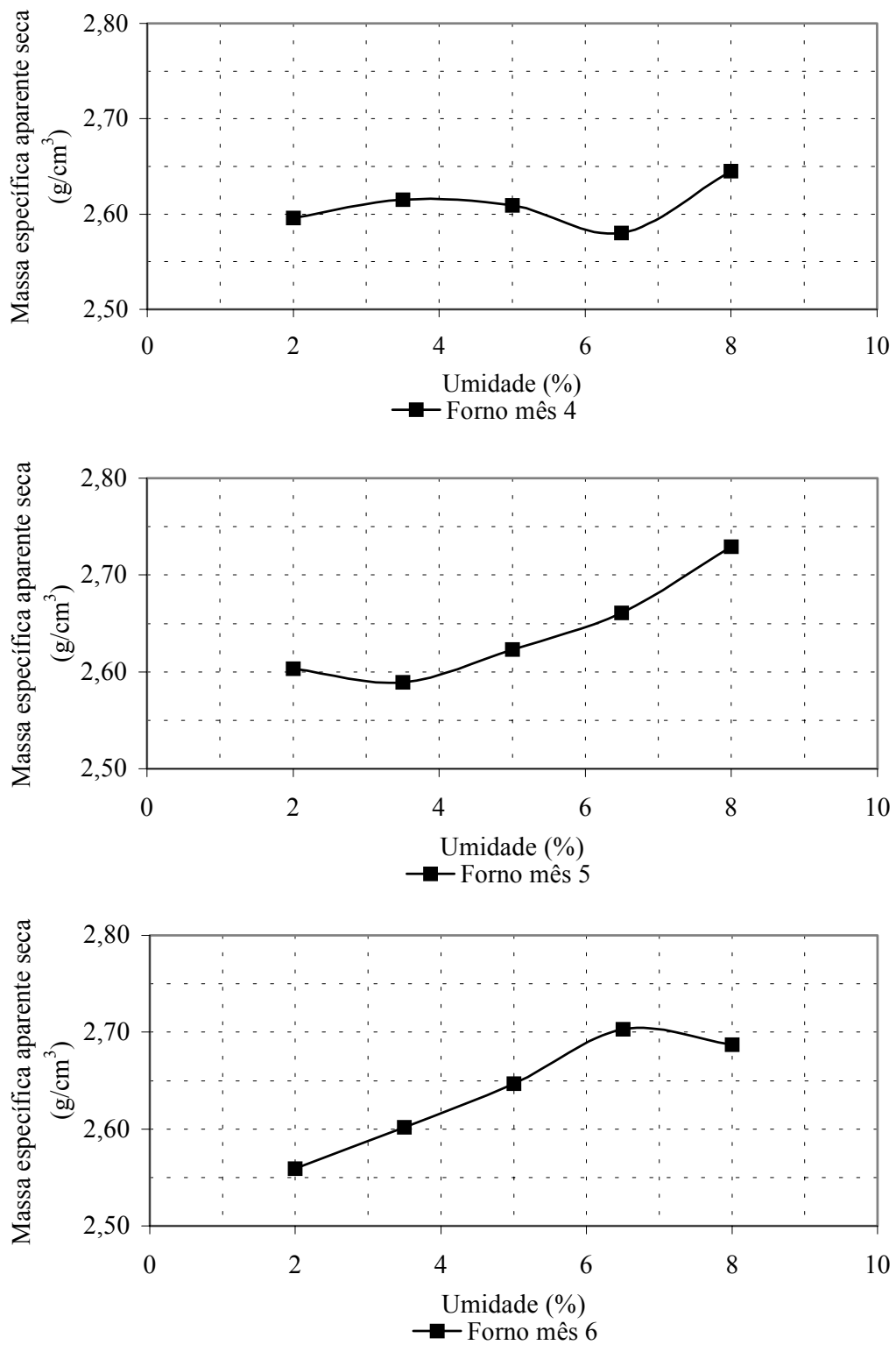


FIGURA 6.6 – Curvas de compactação das amostras de EGC do Forno estocadas por 4,5 e 6 meses.



A ocorrência de diferentes formatos das curvas de compactação não pode ser explicada neste estudo, sendo uma questão a ser explorada em estudos futuros. Talvez se deva à não uniformidade do material e às variações da composição química e das características de plasticidade em função do tempo de exposição. Lee e Suedkamp (1972) apresentam uma correlação entre a forma da curva de compactação e o limite de liquidez. Segundo os autores, materiais com limite de liquidez variando entre 30 e 70 normalmente apresentam curvas de compactação tradicionais (um único pico bem definido) e materiais com limites de liquidez acima de 70 e abaixo de 30 tendem a gerar curvas de compactação irregulares. As diferentes formas, conforme relatam os autores, também podem ser causadas pela variabilidade dos minerais que constituem os materiais.

Após a realização do ensaio de ISC observou-se que o maior valor deste parâmetro não corresponde à umidade estabelecida pelo critério de trabalhabilidade. Adotou-se então como ISC da amostra o valor encontrado para a umidade de  $(5 \pm 0,2)\%$ , visto que, umidades superiores a esta causam expulsão de material fino durante a compactação. A Figura 6.7 apresenta a variação do ISC com o teor de umidade de compactação para a amostra do Forno do mês 6 (F6), as demais amostras de EGC apresentaram comportamento similar.

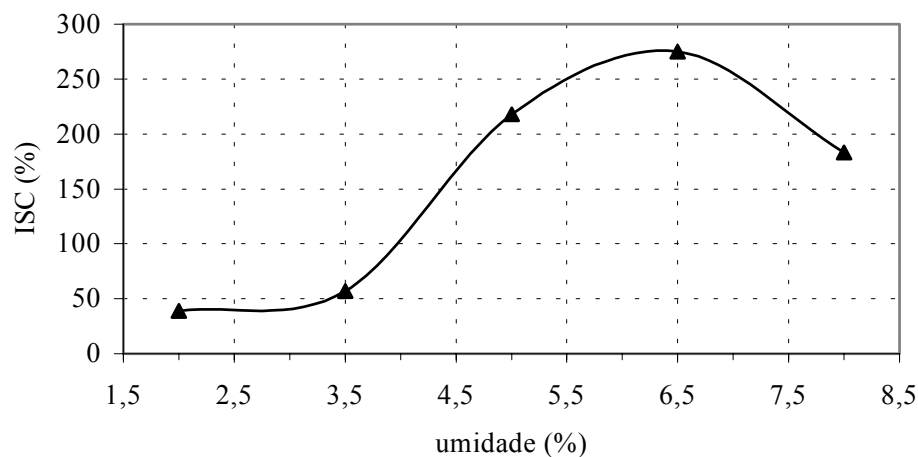


FIGURA 6.7 - Variação do ISC com a umidade de compactação (amostra do Forno, mês 6).

Conforme era esperado, a alteração da distribuição granulométrica do material proporcionou melhorias na trabalhabilidade, na compactação e nos resultados de ISC. Não foi verificada expansão através deste ensaio, reforçando a necessidade do emprego de

metodologia própria para o material. A Tabela 6.3 apresenta os valores de ISC,  $\gamma_d$  e umidades de moldagem das amostras de EGC dos meses 4 a 6. Os valores da umidade de moldagem e massa específica aparente seca correspondem aos obtidos através dos ensaios de compactação. Observa-se que ocorre um aumento do peso específico aparente seco das amostras com o tempo de estocagem. Para as amostras do Forno este crescimento é acompanhado pelo aumento do ISC, o mesmo não sendo verificado para as amostras Misturadas.

TABELA 6.3 - ISC e  $\gamma_d$  obtidos para as umidades de moldagem.

Amostra	Umidade (%)	$\gamma_d$ (gf/cm <sup>3</sup> )	ISC (%)
Forno mês 4 (F4)	5,0	2,609	120
Forno mês 5 (F5)	5,0	2,623	160
Forno mês 6 (F6)	5,0	2,647	216
Misturada mês 4 (M4)	5,0	2,594	204
Misturada mês 5 (M5)	5,0	2,600	187
Misturada mês 6 (M6)	5,0	2,628	204

Pode-se observar que os valores de ISC para a EGC ficaram sempre acima de 100%. Apesar de que para efeitos de dimensionamento de pavimentos não exista sentido em falar de ISC acima de 100%, salienta-se o aumento da capacidade de suporte do material quando empregado com a granulometria corrigida se comparado ao agregado com a granulometria original (meses 1 a 3).

## 6.6 DURABILIDADE

Visando verificar a resistência do agregado às alterações oriundas das intempéries foram realizados ensaios de durabilidade utilizando-se amostras de escória com a

granulometria da EGC, buscando caracterizar o comportamento do agregado na granulometria proposta para utilização como material de pavimentação.

A Tabela 6.4 apresenta as perdas totais decorrentes dos cinco ciclos do ensaio de durabilidade ao sulfato de sódio. Não foram realizados ensaios com as amostras de todos os meses, tendo em vista que as perdas ocorrentes (sempre inferiores a 1%) foram muito inferiores ao valor máximo admitido neste ensaio para a escória de aciaria (5%) (DNER-EM 262/94). Além disso, não foi observada nenhuma modificação visual significativa na escória, após a realização dos ensaios.

TABELA 6.4 – Perdas de massa totais decorrentes do ensaio de durabilidade ao sulfato de sódio.

Amostra	Perda de massa total (%)	
	Forno	Misturada
Mês 1	0,1	0,2
Mês 2	0,1	0,1
Mês 4	---	0,5
Mês 6	0,0	0,0

## 6.7 DENSIDADE E ABSORÇÃO DE ÁGUA

Segundo a especificação de material DNER-EM 262/94, para a escória de aciaria ser aceita como agregado para pavimentação, entre outras características, deve apresentar massa específica variando entre 3 g/cm<sup>3</sup> e 3,5 g/cm<sup>3</sup> e absorção de água de 1% a 2% em peso. A Tabela 6.5 apresenta os resultados obtidos para amostras de escória. Observa-se que os valores de absorção estão acima dos especificados, porém Chesner *et al* (2001) relatam valores de absorção acima de 3% para escória de aciaria.

É oportuno observar que a especificação do DNER não explicita se sua validade se estende a qualquer tipo de escória de aciaria, LD ou elétrica. Sendo a composição química

desses resíduos diferente, pode-se esperar que também o sejam os valores normais de absorção. Assim sendo, é necessário aprofundar o estudo sobre a aplicabilidade da especificação à escória de aciaria elétrica.

TABELA 6.5 – Absorção de água do agregado graúdo e densidade da escória.

Amostra	Forno		Misturada	
	Densidade	Absorção (%)	Densidade	Absorção (%)
Mês 2	3,45	2,9	3,44	2,4
Mês 4	3,49	2,2	3,39	2,6
Mês 6	3,41	2,4	3,52	1,8

## 6.8 RESISTÊNCIA À ABRASÃO

A Figura 6.8 apresenta a variação da resistência à abrasão no equipamento Los Angeles em função do tempo de estocagem das amostras de escória. Observa-se que as amostras de escória do Forno apresentam perdas superiores às obtidas para a escória Misturada, tal diferença pode ser devida ao fato de a escória do Forno apresentar maiores teores de óxidos de ferro em sua composição química.

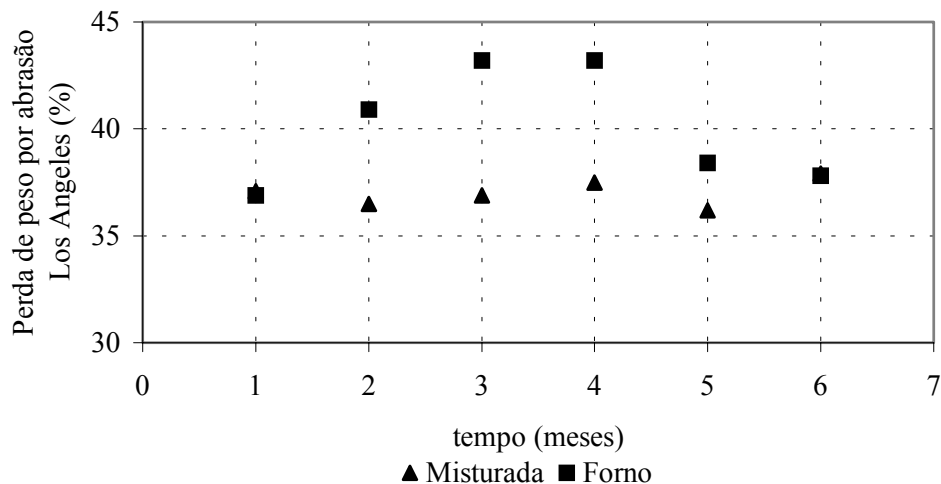


FIGURA 6.8 - Perda de peso por abrasão Los Angeles em função do tempo de estocagem.

A norma DNER-EM 262/94 determina que para a escória de aciaria ser aceita como material de pavimentação deve apresentar desgaste por abrasão Los Angeles máximo de 25%, no entanto os valores obtidos foram superiores. Por outro lado, para agregados tradicionais o mesmo órgão especifica que a perda por abrasão Los Angeles pode chegar ao valor de 55%.

A variabilidade dos resultados bem como a ocorrência de perdas elevadas em relação aos valores encontrados na literatura não era esperada, visto que diversos autores relatam perdas por abrasão sempre inferiores a 25% (Lima *et al*, 2000; Alvarenga *et al*, 2001; Silva *et al*, 2000; Mathur *et al*, 1999). Porém de qualquer forma os valores encontrados ainda estão bem abaixo dos admissíveis para materiais convencionais. As perdas elevadas podem ser função da composição química do agregado, bem como do tipo de resfriamento.

Novamente salienta-se que os valores relatados pela literatura em geral não se referem necessariamente à escória de aciaria elétrica, visto que tanto a escória proveniente de fornos LD quanto a oriunda de fornos elétricos são denominadas *escória de aciaria*, não sendo feita distinção na maioria dos relatos. Além disso, a utilização de fornos elétricos é mais recente e em menor escala se comparada com a aciaria LD, sendo os estudos utilizando escória proveniente deste tipo de forno mais numerosos.

Assim, também poderia questionar-se o limite especificado pelo DNER, quando se deseja avaliar a resistência à abrasão da escória de aciaria elétrica. Pesquisa adicional mostra-se necessária para confirmar o limite de 25% para a perda de peso ou propor um novo valor.

## 6.9 EXPANSÃO

Os resultados dos ensaios de expansão apresentados nesta seção fazem parte de um projeto multidisciplinar coordenado pelo Prof. Antonio Cezar Faria Vilela do Laboratório de Siderurgia situado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Ao realizar-se os ensaios de expansão com as amostras de escória na granulometria original observou-se a ocorrência de uma provável distorção de resultados em função da compactação deficiente, sendo observada contração inicial das amostras. A deficiência da compactação, como já foi exposto, é uma consequência da predominância da fração

pedregulho na distribuição granulométrica do material. Durante os três primeiros meses os ensaios de expansão foram realizados utilizando a escória com granulometria original.

Para caracterizar a influência da distribuição granulométrica e, por conseguinte, da compactação das amostras, foi coletada uma nova amostra (escória Misturada) que não passou por período de estocagem. Foram realizados ensaios para a verificação do potencial expansivo com amostras com a granulometria corrigida e com amostras com granulometria original. Os resultados obtidos para estas amostras são apresentados na Figura 6.9.

A norma americana ASTM D 2940/1992, que fixa os requisitos dos agregados para utilização como base ou sub-base de rodovias e aeroportos, estabelece para o ensaio de expansão seguindo ASTM D 4792/1995 um limite máximo de 0,5% de expansão aos sete dias (168 horas) de ensaio.

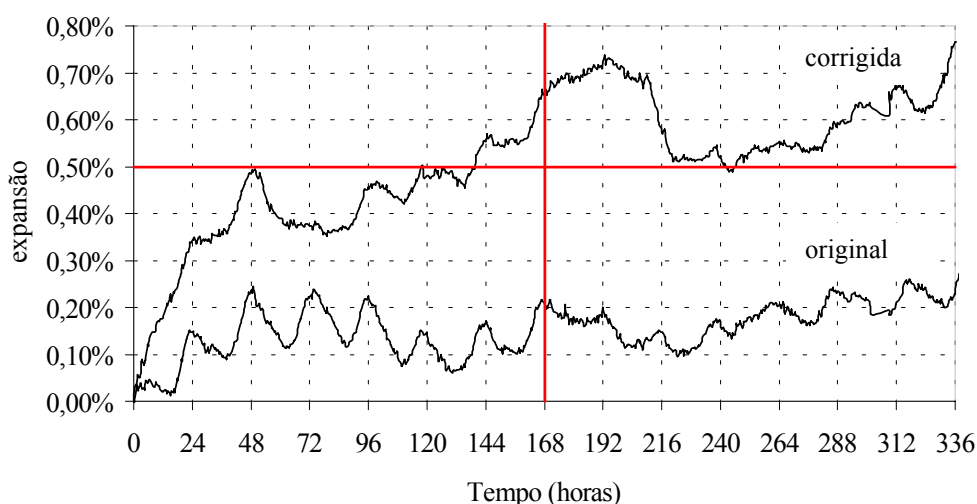


FIGURA 6.9 – Variação da expansão média em função do tempo de ensaio para escória Misturada sem período de cura com granulometrias original e corrigida.

Comparando-se os resultados apresentados na Figura 6.9 conclui-se que a correção granulométrica era fundamental para a quantificação do potencial expansivo da escória de aciaria. Tendo em vista que esta característica é função também da distribuição granulométrica, é essencial que os ensaios sejam realizados com amostras com a granulometria proposta para a utilização do agregado. Sendo assim, a partir do quarto mês passou-se a executar o ensaio de expansão com EGC. Os resultados obtidos para as amostras dos meses 4 a 6 são apresentados nas Figuras 6.10 e 6.11.

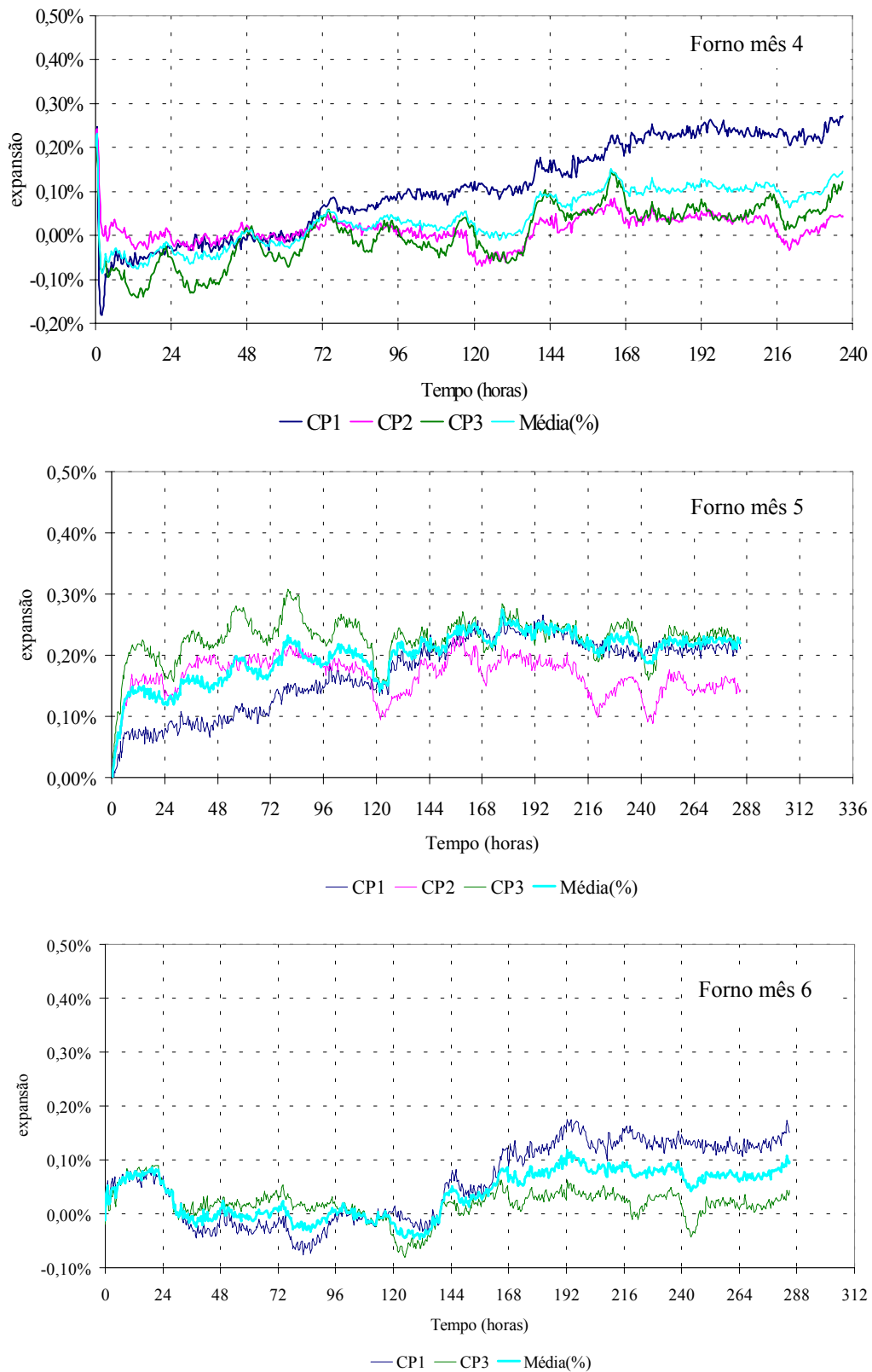


FIGURA 6.10 – Resultados dos ensaios de expansão para as amostras da EGC do Forno dos meses 4 a 6.

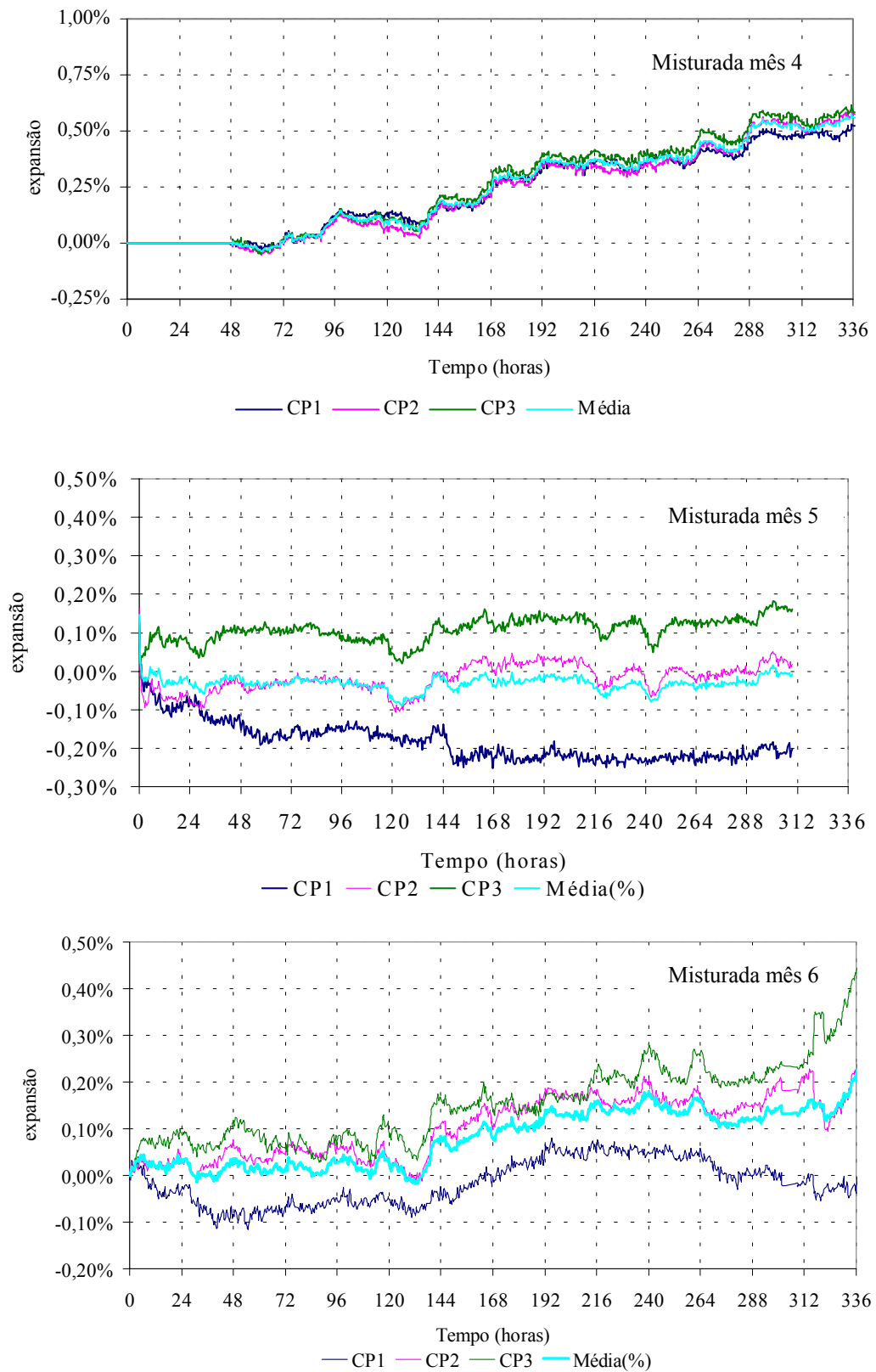


FIGURA 6.11 – Resultados dos ensaios de expansão para as amostras da EGC Misturada dos meses 4 a 6.



Observa-se que nenhuma das amostras aproximou-se do limite máximo estipulado (0,5% aos 7 dias), podendo-se considerar a escória, tanto a Misturada como a do Forno, apropriada para uso como base e sub-base de pavimentos, quanto à estabilidade volumétrica, a partir do quarto mês de estocagem. Não sendo verificada diferença significativa de comportamento que justificasse a necessidade de separação da escória do forno-panela no processamento do material.

## 6.10 DEFORMABILIDADE ELÁSTICA

O módulo de resiliência da EGC foi determinado para diferentes tempos de exposição. As Figuras 6.12 e 6.13 apresentam os resultados obtidos para as amostras ensaiadas da escória do Forno e Misturada, respectivamente. Junto às equações de ajuste que relacionam o módulo de resiliência à tensão confinante apresentam-se o coeficiente de correlação das mesmas. Observa-se que o comportamento da EGC pode ser ajustado pelo modelo clássico da equação 6.2:

$$MR = k_1 \cdot \sigma_c^{k_2} \quad [6.2]$$

onde:

MR = módulo de resiliência (kPa)

$\sigma_c$  = tensão confinante (kPa)

$k_1$  = módulo para  $\sigma_c = 1$

$k_2$  = coeficiente angular da reta de ajuste

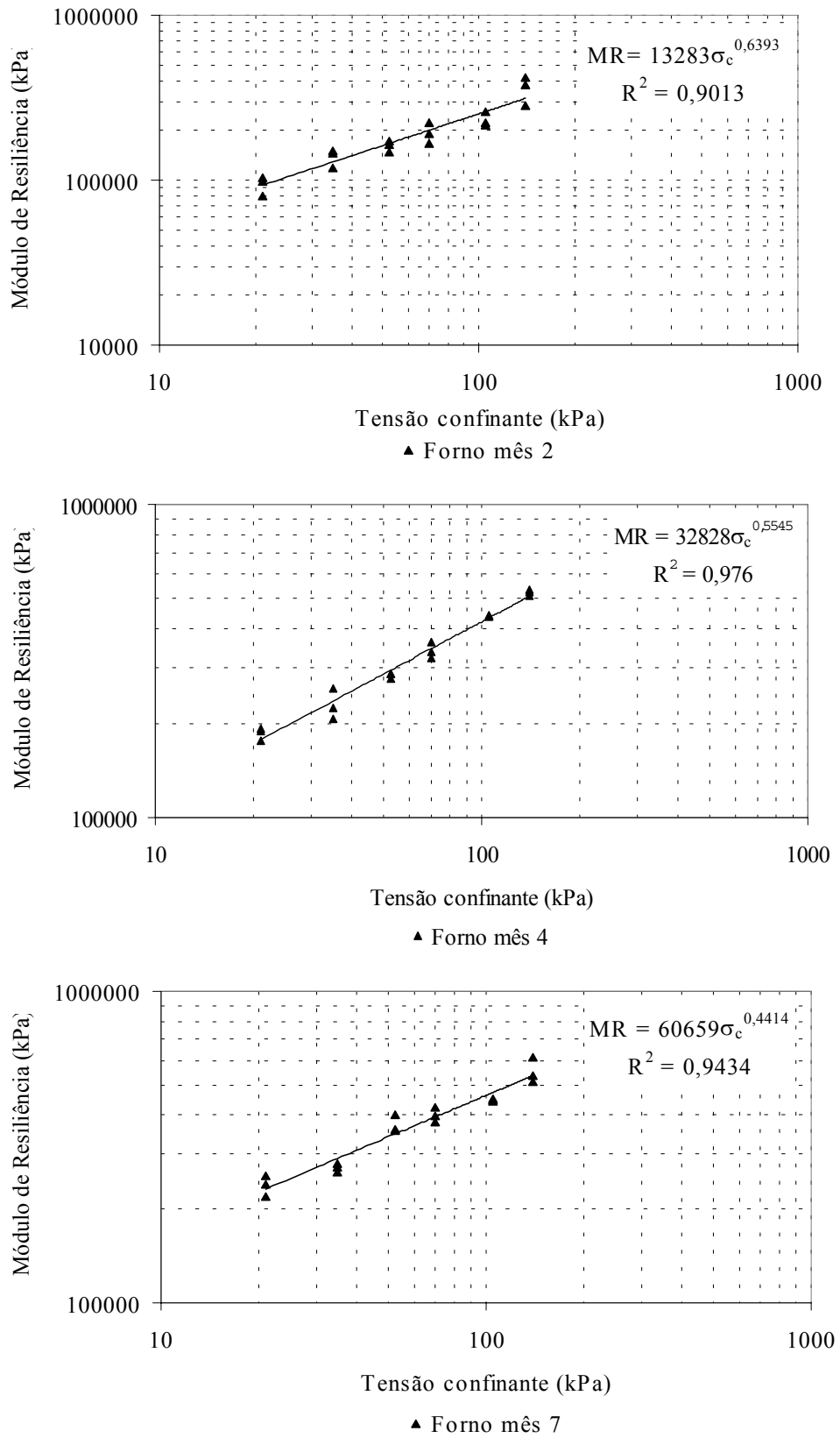


FIGURA 6.12 – Módulo de resiliência de amostras de EGC do Forno.

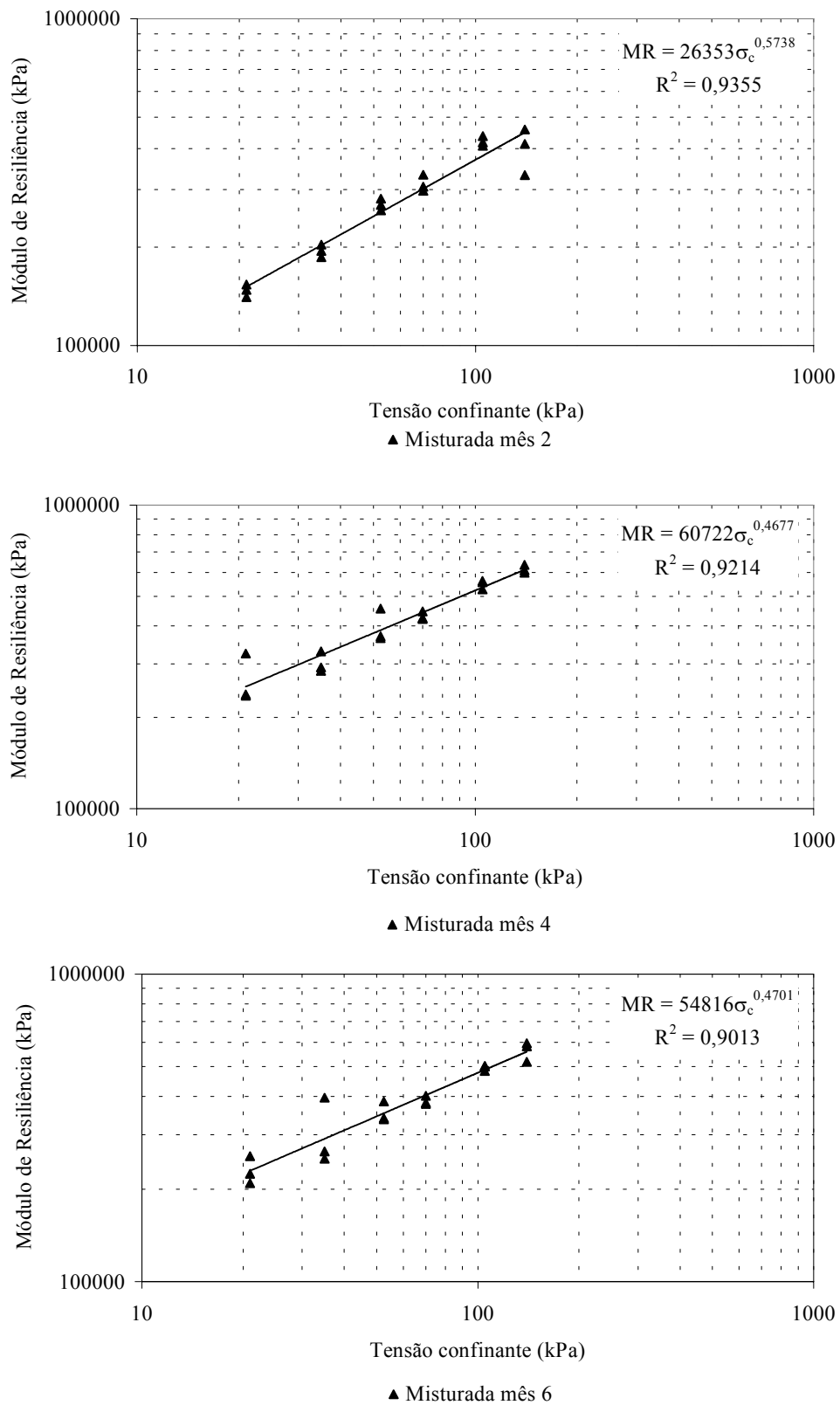


FIGURA 6.13 – Módulo de resiliência de amostras de EGC Misturada.

Analisando-se os parâmetros do modelo  $k_1$  e  $k_2$  é possível constatar que para as amostras do Forno tem-se um crescimento de  $k_1$  e um decréscimo de  $k_2$  com o tempo de exposição. Ou seja, à medida que aumenta o período de cura diminui a sensibilidade do módulo de resiliência às tensões confinantes. A Figura 6.14 apresenta a variação do módulo de resiliência em função da tensão confinante para diferentes tempos de estocagem da escória do Forno.

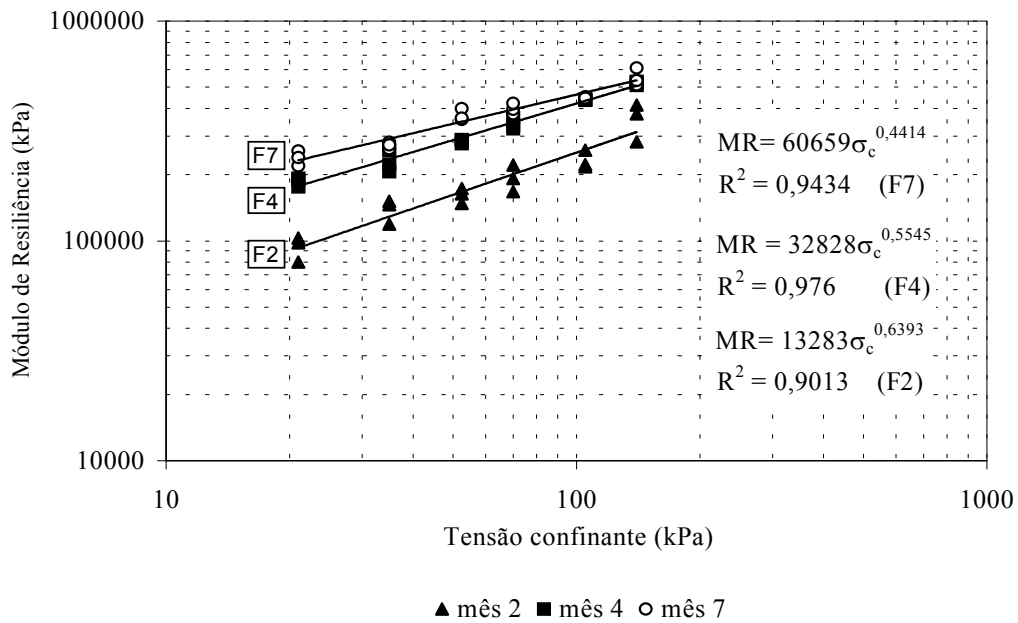


FIGURA 6.14 – Variação do módulo de resiliência das amostras de EGC do Forno para diferentes tempos de estocagem.

A variação dos parâmetros  $k_1$  e  $k_2$  para a escória Misturada difere da verificada para a escória do Forno. O crescimento de  $k_1$  e o decréscimo de  $k_2$  são significativos apenas para as amostras estocadas por 2 e 4 meses. Tal diferença de comportamento em relação às amostras do Forno, pode ser função da heterogeneidade das amostras, visto que a escória Misturada pode apresentar maior quantidade de material contaminante, o que torna seu comportamento menos previsível. A variação dos coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  e dos módulos de resiliência das amostras de escória Misturada para diferentes tempos de estocagem pode ser observada na Figura 6.15.

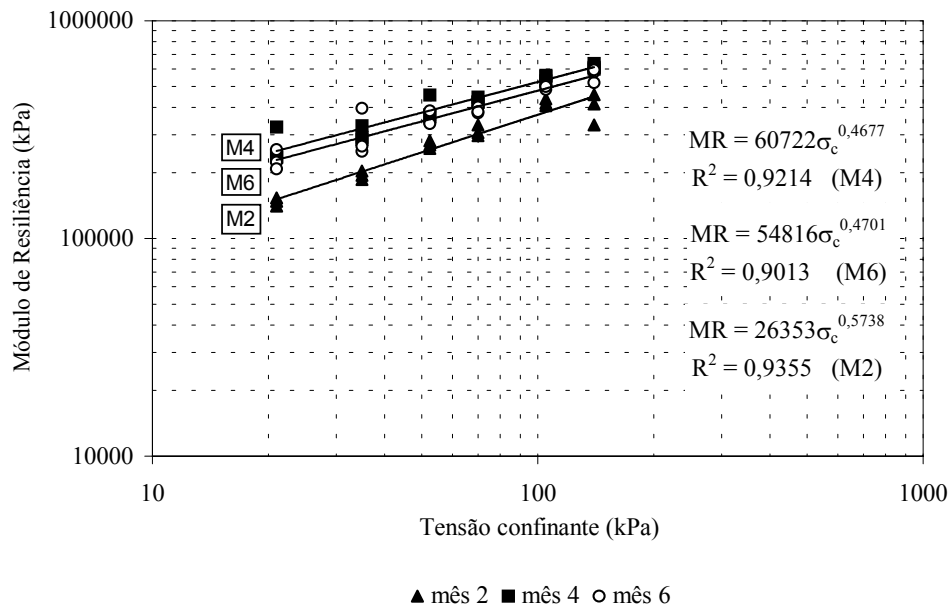


FIGURA 6.15 – Variação do módulo de resiliência das amostras de EGC Misturada para diferentes tempos de estocagem.

A análise dos resultados obtidos para as amostras de EGC permite estabelecer uma faixa de variação para os módulos de resiliência em função do tempo de estocagem. Na Figura 6.16 observa-se que as amostras M4 e F2 definem os limites máximo e mínimo de variação dos módulos de resiliência da EGC.

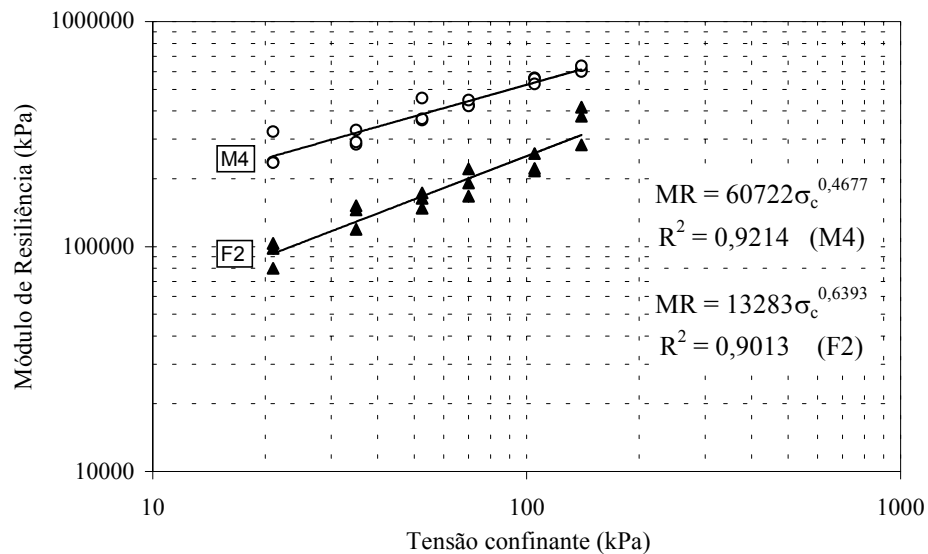


FIGURA 6.16 – Faixa de variação dos módulos de resiliência da EGC.

### 6.10.1 Comparação entre comportamentos da EGC e de materiais granulares convencionais

Tendo em vista que a EGC pode ser empregada como substituta de materiais convencionais, é interessante comparar o seu comportamento quanto a deformabilidade elástica com o verificado para alguns agregados tradicionalmente empregados nas camadas de base e sub-base de pavimentos. A Figura 6.17 compara os módulos de resiliência da EGC com os obtidos para britas de basalto (Marmitt, 2002), granito (Ceratti, 2000) e saibro (LAPAV, 2001).

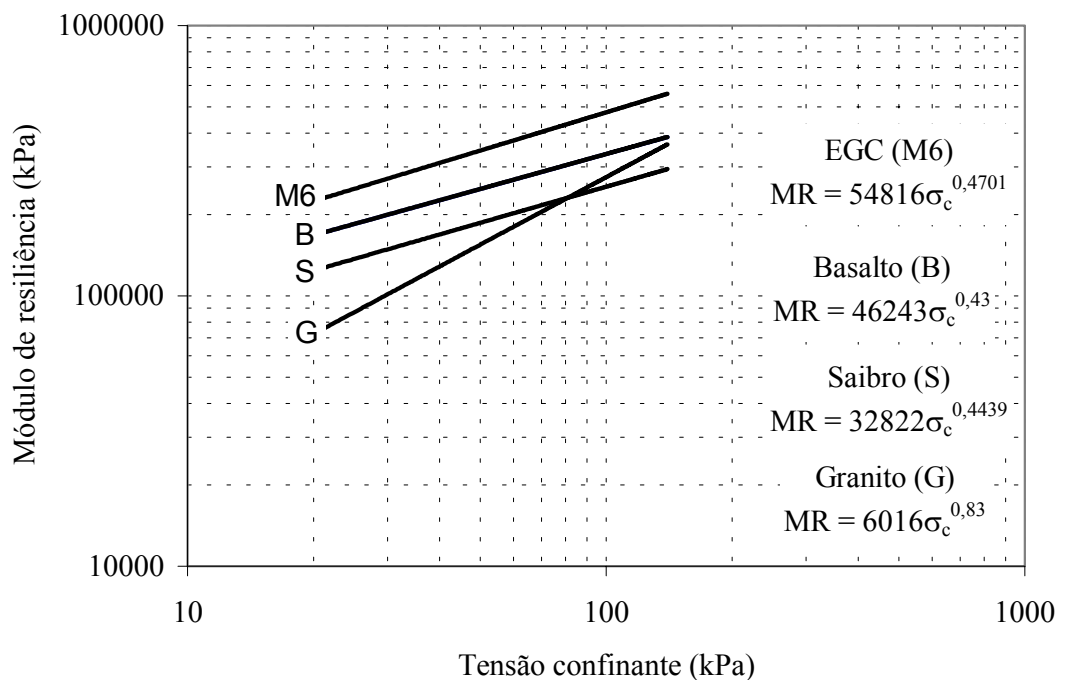


FIGURA 6.17 – Comparação dos módulos de resiliência da EGC e de materiais granulares convencionais.

Observa-se que a EGC apresenta módulo resiliente superior ao dos outros materiais granulares para qualquer nível de tensão confinante, comprovando o seu excelente comportamento quanto a deformações elásticas. Tal diferença pode ser função da forma e textura superficial rugosa do agregado que garantiriam um maior intertravamento entre as partículas de escória em relação aos agregados tradicionais. Vários autores citados por Lekarp *et al* (1999) concluíram em seus estudos que agregados com partículas com superfície rugosa apresentam módulos de resiliência superiores aos de agregados com superfície lisa. Barksdale e Itani (1989) ao

estudar diversos tipos de agregados observaram que o módulo de resiliência de agregados com partículas angulares e com superfície rugosa são superiores aos de agregados com partículas arredondadas.

Salienta-se que valores de  $k_2$  muito elevados indicam uma forte dependência do módulo de resiliência em relação à tensão confinante, isto é, para pequenas tensões confinantes, como as que podem ocorrer em bases e sub-bases de pavimentos, tem-se módulos de resiliência muito baixos, que contribuem para a ocorrência de deflexões muito elevadas.

Considerando que a tensão de confinamento atuante no plano médio da base de um pavimento flexível seja aproximadamente 100 kPa, é possível verificar que o módulo de resiliência da EGC (478 MPa) é 43% superior ao da brita de basalto (335 MPa) e 74% superior ao da brita de granito (275 MPa).

Quando considerado o emprego como agregado para camada de sub-base, admitindo que a tensão de confinamento atuante é aproximadamente 50 kPa, a superioridade da EGC é ainda mais evidente. Nesta situação o módulo de resiliência da EGC (345 MPa) é 85% superior ao do saibro (186 MPa) e 122% superior ao da brita de granito (155 MPa).

### 6.10.2 Análise paramétrica

Empregando-se o programa computacional ELSYM-5 comparou-se o comportamento de pavimentos com camadas granulares de EGC e de brita graduada de basalto (Figura 6.17), buscando verificar a resposta do material à ação do tráfego.

Adotou-se o módulo de resiliência do CBUQ igual a 3000 MPa. As espessuras das camadas granulares variaram entre 20 e 40 cm. Como subleito desses pavimentos considerou-se uma argila de comportamento laterítico, com módulo de resiliência médio de 200 MPa.

Avaliaram-se as deformações horizontais de extensão na base do revestimento e as deformações verticais compressivas no topo do subleito, consideradas como críticas, responsáveis pelo processo de trincamento do revestimento e pelo acúmulo de deformações permanentes, respectivamente. Para definir as deformações admissíveis empregou-se o Método Sul-Africano proposto por Paterson e Maree em 1978 e revisado em 1994. Em função do número de operações do eixo padrão (N) de  $10^7$  adotou-se como espessura do revestimento 7,5 cm (DNER, 1979).

A Tabela 6.6 apresenta os resultados gerados pelo programa ELSYM-5. A deformação horizontal de extensão específica ( $\epsilon_h$ ) admissível na base do revestimento é

$0,540 \times 10^{-3}$  e a deformação vertical de compressão específica ( $-\varepsilon_v$ ) admissível no topo do subleito é  $0,550 \times 10^{-3}$ .

A partir da análise dos resultados obtidos, concluiu-se que um pavimento composto por 7,5 cm de CBUQ e 40 cm de brita graduada (BG) de basalto apresenta comportamento quanto às deformações elásticas equivalente a uma estrutura composta por 7,5 cm de CBUQ e 25 cm de EGC. Resultando em uma estrutura mais esbelta e econômica.

TABELA 6.6 – Comparação das deformações elásticas em pavimentos com EGC e BG.

Estrutura	EGC		BG	
	$\varepsilon_h (x10^{-3})$	$-\varepsilon_v (x10^{-3})$	$\varepsilon_h (x10^{-3})$	$-\varepsilon_v (x10^{-3})$
7,5 cm CBUQ e 20 cm	0,315	0,448	0,388	0,553
7,5 cm CBUQ e 25 cm	0,347	0,406	0,421	0,502
7,5 cm CBUQ e 30 cm	0,378	0,370	0,453	0,459
7,5 cm CBUQ e 35 cm	0,411	0,343	0,486	0,426
7,5 cm CBUQ e 40 cm	0,446	0,323	0,521	0,400



## **7 UTILIZAÇÃO DE ADITIVOS – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

### **7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Para a realização desta etapa da pesquisa optou-se por empregar material não estocado, para tanto coletou-se cerca de 800 kg de escória no final do processo de beneficiamento, ou seja, antes de ser levada para as pilhas de estocagem. A escória é do tipo Misturada com diâmetro máximo de 1 polegada (25,4 mm).

Visando garantir que todas as amostras possuíssem a mesma quantidade de material fino (passante da peneira 2,00 mm) adotou-se como critério que esta fração deveria corresponder a 5% do total da amostra. Tal critério baseou-se na análise granulométrica de amostras do material.

### **7.2 GRANULOMETRIA**

A distribuição granulométrica das amostras não expostas é semelhante à determinada para as amostras com tempo de cura variando de 1 a 6 meses. A Figura 7.1 apresenta a curva granulométrica para as amostras não expostas. Observa-se que a granulometria das amostras não se enquadra em nenhuma das faixas exigidas pela especificação do DNER para a utilização como base de pavimentos (DNER–ES 010/71), aproximando-se mais do limite inferior da Faixa C representada na mesma figura.

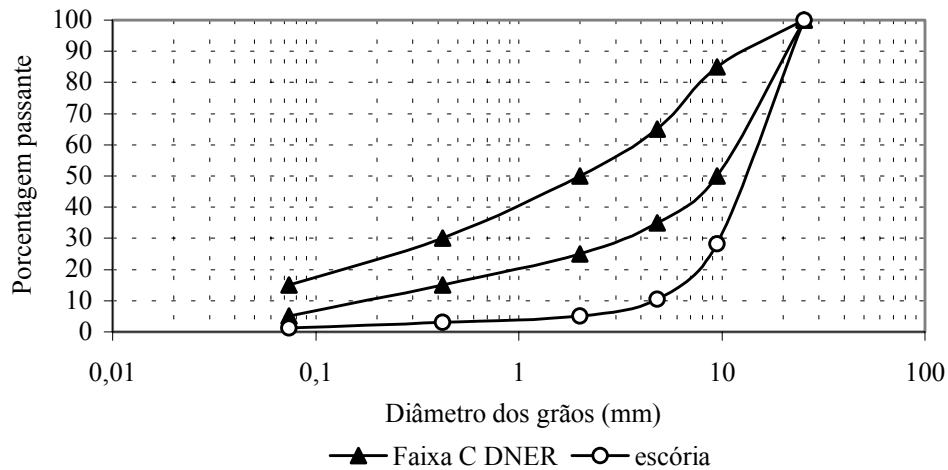


FIGURA 7.1 - Distribuição granulométrica da escória de aciaria em comparação aos limites da Faixa C do DNER.

### 7.3 MODIFICAÇÃO COM CAL DE CARBURETO

Objetivando melhorar as características de trabalhabilidade, compactação, capacidade de suporte e resistência da escória de aciaria com a distribuição granulométrica original foi adicionada cal de carbureto às amostras. O teor deste aditivo na mistura foi determinado através do método do ICL (Rogers *et al*, 1997).

Métodos consagrados para a determinação do teor mínimo de cal a ser acrescentado para garantir as trocas iônicas, responsáveis pelas reações de estabilização, adotam como teor mínimo aquele que garante um pH da mistura de 12,4 (Eades e Grim, 1966; British Standards Institution, 1990), porém adotou-se o valor de 12,0 para o pH, visto que a cal de carbureto utilizada apresenta um pH de 12,5. A Figura 7.2 apresenta o resultado do ensaio de pH em função do teor de cal de carbureto.

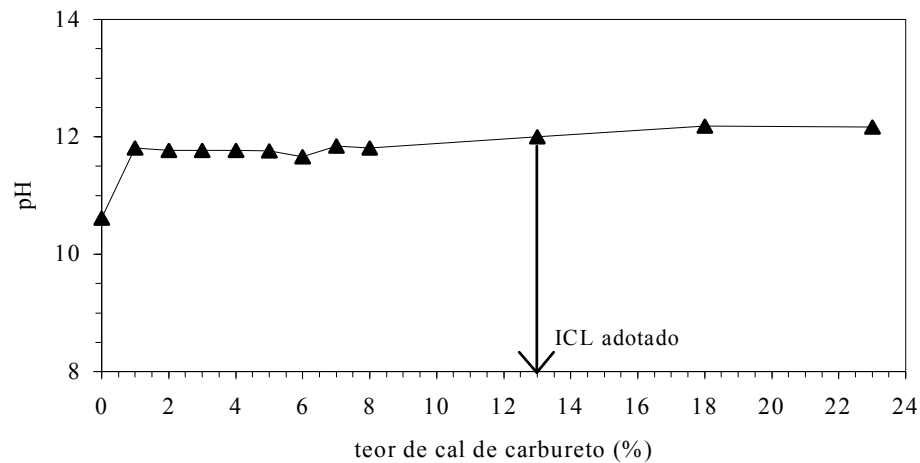


FIGURA 7.2 – Determinação do teor mínimo de cal obtido pelo método do ICL.

### 7.3.1 Características de compactação das misturas

A adição de cal de carbureto proporcionou melhoria nas características de compactação da escória, visto que aumentou o teor de material fino da mistura, preenchendo os vazios decorrentes da predominância de agregado graúdo nas amostras. Conforme era esperado, a adição de cal de carbureto à escória de aciaria causou aumento na umidade ótima e diminuição da massa específica aparente seca máxima em comparação a amostras de escória. A Tabela 7.1 apresenta a variação dos parâmetros de compactação em função da adição de cal de carbureto.

TABELA 7.1 – Variação dos parâmetros de compactação com a adição de cal.

	Umidade ótima(%)	$\gamma_d$ (gf/cm <sup>3</sup> )
Escória	4,74	2,489
Escória + 13% de cal	6,18	2,420

### 7.3.2 Capacidade de suporte

A capacidade de suporte das misturas foi avaliada através do ensaio de ISC para todas as umidades. A Tabela 7.2 apresenta os ISC obtidos para as umidades ótimas. Observa-se que a capacidade de suporte aumentou com a adição da cal de carbureto, embora, como já foi dito, em termos de projeto de pavimentos o ISC máximo considerado é 100%.

TABELA 7.2- Variação do ISC em função da adição de cal.

	ISC (%)
Escória	96
Escória + 13% de cal	217

### 7.3.3 Resistência à compressão simples

Os resultados obtidos para a resistência à compressão simples da mistura escória + 13% de cal de carbureto e escória com granulometria corrigida (EGC) é apresentada na Tabela 7.3, para amostras curadas por períodos de 3 e 28 dias. Para fins de comparação foi determinada a RCS para amostras de EGC, visto que a granulometria original do material impossibilitava a desmoldagem dos corpos de prova. Observa-se que a mistura apresenta RCS inferior à EGC para os dois tempos de cura. A diferença equivale a 21% e 30% para as amostras curadas por períodos de 3 e 28 dias, respectivamente.

TABELA 7.3 – Resistência à compressão simples da mistura e da EGC.

	RCS (kPa)	
	3 dias	28 dias
EGC	116,13	137,90
Escória + 13% de cal	91,83	96,16

## 7.4 MODIFICAÇÃO COM CINZA PESADA

A adição de cinza pesada à escória de aciaria tornou-se interessante tendo em vista a carência da fração fina na composição granulométrica do material, bem como pelo fato de existir a possibilidade de reação entre os componentes de natureza pozolânica da cinza pesada com a cal livre provavelmente presente na composição química da escória. Caso estas reações ocorram, a cinza pesada atuaria como auxiliar no processo de estabilização volumétrica do agregado.

### 7.4.1 Características de compactação das misturas

As Figuras 7.3 e 7.4 apresentam a variação dos parâmetros de compactação em função da quantidade de cinza pesada na mistura. A adição de cinza pesada proporcionou melhoria nas características de compactação da escória, tanto na trabalhabilidade quanto na compactação das amostras. Conforme era esperado, pode-se observar que o acréscimo na quantidade de cinza pesada na mistura faz com que a umidade ótima aumente e o peso específico aparente seco máximo diminua.

A Figura 7.3 mostra que a umidade ótima cresce com um ajuste aproximadamente linear, no qual  $r^2=0,97$ . A umidade ótima para a escória de aciaria é 4,7%, crescendo para 16,8% para a mistura contendo 50% de cinza pesada.

Na Figura 7.4 pode-se verificar que a massa específica aparente seca máxima reduz com o aumento do teor de cinza pesada. Esta redução era esperada, visto que o valor da massa específica real dos grãos de cinza ( $2,08 \text{ g/cm}^3$ ) é bem inferior a do agregado ( $3,40 \text{ g/cm}^3$ ).

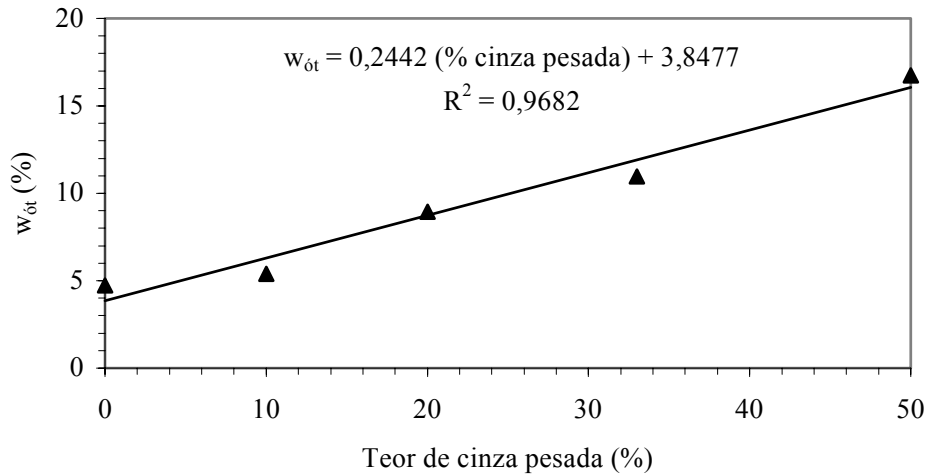


FIGURA 7.3 - Variação da umidade ótima com o teor de cinza pesada nas misturas.

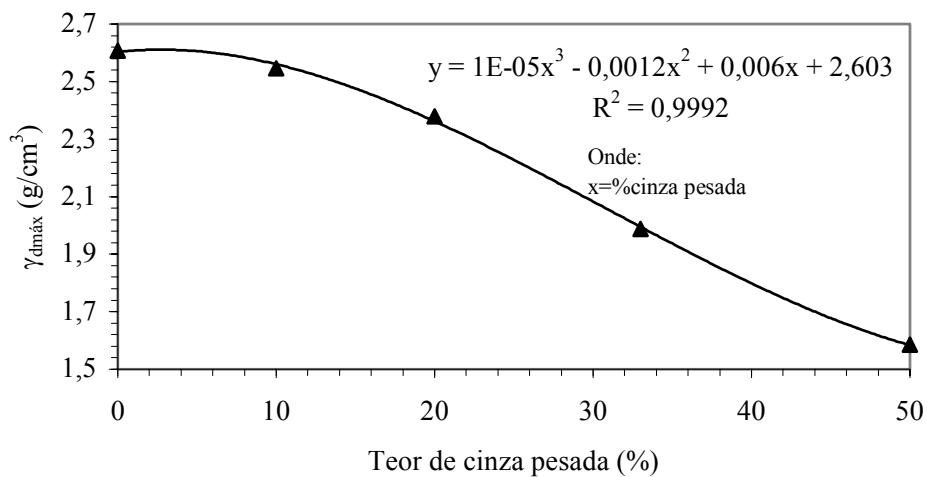


FIGURA 7.4 – Massa específica aparente seca máxima em função do teor de cinza pesada.

#### 7.4.2 Capacidade de suporte

A capacidade de suporte das misturas foi avaliada através do ensaio de ISC para todas as umidades. A Tabela 7.4 apresenta os ISC obtidos para as umidades ótimas das misturas. Observa-se que a capacidade de suporte cresce com o aumento do teor de cinza pesada na mistura até 20% de cinza, caindo para cerca 56% para as misturas com 33% e 50% de cinza pesada. Também pode-se observar que o ISC obtido para as amostras contendo 10%

e 20% de cinza pesada é comparável ao ISC obtido para amostras de EGC, podendo-se concluir que o processo de fracionamento das amostras, empregado para corrigir a granulometria do material, poderia ser substituído pela mistura de cinza pesada ao agregado com granulometria original.

TABELA 7.4 - ISC das misturas com cinza pesada.

Teor de cinza pesada (%)	ISC (%)
0	96
10	174
20	210
33	54
50	56

#### 7.4.3 Resistência à compressão simples

A variação da resistência à compressão simples com o teor de cinza pesada na mistura é apresentada na Figura 7.5, para amostras curadas por períodos de 3 e 28 dias. Para fins de comparação foi determinada a RCS para amostras de escória com granulometria corrigida (EGC), visto que a granulometria original do material impossibilitava a desmoldagem dos corpos de prova. Os valores obtidos aparecem plotados no gráfico equivalendo a 0% de cinza. Observa-se que, para as amostras curadas por 3 dias, ocorre um aumento da RCS com o acréscimo do teor de cinza pesada na mistura. A RCS da EGC é alcançada com a adição de 33% de cinza pesada à amostra. Para as amostras curadas por 28 dias é possível observar que a RCS da mistura só é inferior ao valor encontrado para a EGC quando o teor de cinza pesada acrescentada é 33%, atingindo o valor máximo de 148 kPa para a mistura contendo 20% de cinza.

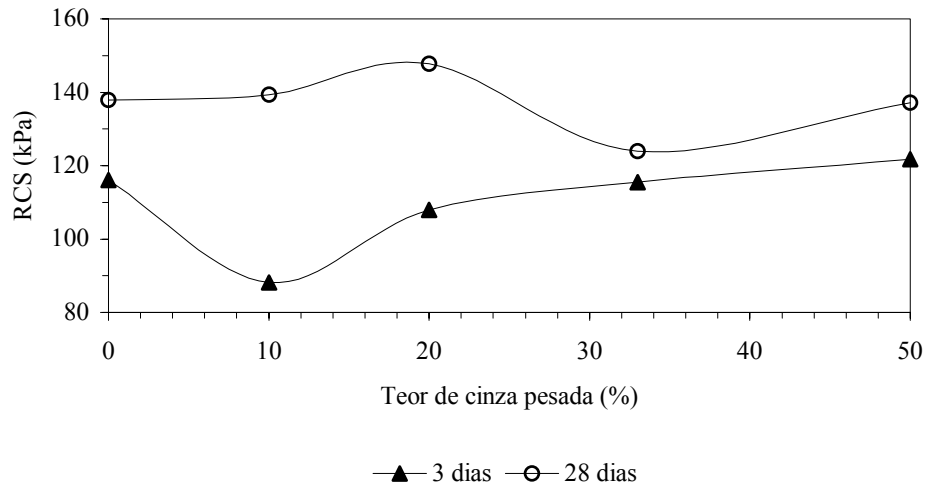


FIGURA 7.5 – Variação da resistência à compressão simples (RCS) com o teor de cinza pesada.

## 7.5 MODIFICAÇÃO COM CINZA PESADA E CAL DE CARBURETO

A adição de cal de carbureto às misturas de escória e cinza pesada buscou verificar a possibilidade de favorecer as reações pozolânicas entre a cal constituinte da escória e a cinza pesada, rica em sílica. Assim sendo foram acrescentados dois teores de cal, 1% e 3%, às misturas de escória contendo 20% e 33% de cinza, obtendo-se quatro tipos de mistura.

A umidade de moldagem dos corpos de prova das misturas contendo escória, cinza e cal corresponde à umidade ótima obtida através dos ensaios de compactação para as misturas contendo escória e cinza, ou seja, os corpos de prova contendo 20% e 33% de cinza foram moldados com umidade de 9% e 10%, respectivamente.

### 7.5.1 Resistência à compressão simples

A variação da resistência à compressão simples com o teor de cal de carbureto para a mistura contendo 20% de cinza curadas por períodos de 3 e 28 dias é apresentada na Figura 7.6. Observa-se que a RCS das amostras curadas por 3 dias praticamente não varia em função do teor de cal adicionado à mistura, enquanto que a RCS das amostras curadas por 28 dias



apresenta um crescimento que pode ser ajustado linearmente pela equação:  
 $RCS \text{ (kPa)} = 219,74 * (\% \text{ cal}) + 134,52$  com  $R^2 = 0,9973$ .

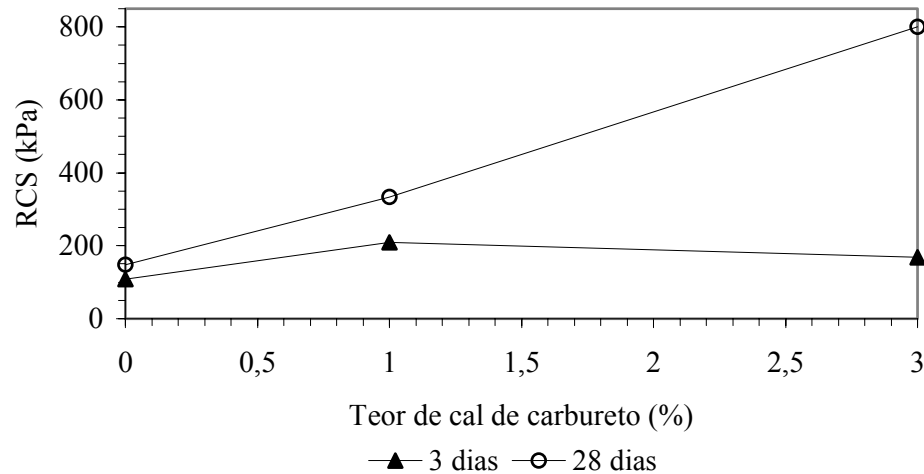


FIGURA 7.6 – Variação da resistência à compressão simples (RCS) com o teor de cal de carbureto adicionado à mistura contendo 20% de cinza pesada.

A relação entre a resistência à compressão simples obtida aos 28 dias de cura ( $RCS_{28}$ ) e a resistência à compressão simples obtida aos 3 dias de cura ( $RCS_3$ ) para as amostras contendo 20% de cinza pesada é apresentada na Tabela 7.5. Esta relação mostra, indiretamente, a quantidade de produtos cimentantes formados durante o período de cura. É possível concluir que a cal presente na composição química da escória reage com a sílica e/ou a alumina constituintes da cinza pesada, pois a relação  $RCS_{28}/RCS_3$  para a amostra sem cal é 1,37, o que comprova a formação de produtos cimentantes durante o período de cura.

Observa-se também, que a mistura escória e 20% cinza pesada é bastante reativa com a cal de carbureto, pois conforme cresce a sua quantidade na mistura, cresce a relação  $RCS_{28}/RCS_3$ . A maior quantidade de produtos cimentantes é obtida para a mistura contendo 3% de cal, que apresentou o valor máximo de  $RCS_{28}$  de 800 kPa.

TABELA 7.5 – Relação  $RCS_{28}/RCS_3$  para misturas contendo 20% de cinza pesada e diferentes teores de cal de carbureto.

Teor de cal (%)	$RCS_{28}/RCS_3$
0	1,37
1	1,60
3	7,15

A Figura 7.7 apresenta a variação da RCS em função da porcentagem de cal acrescentada à mistura para as amostras contendo 33% de cinza. Para os corpos de prova curados por um período de 3 dias observa-se um acréscimo na RCS com a adição de 1% de cal, porém quando acrescenta-se 3% de cal não é verificado aumento da RCS em relação à mistura que não contém cal. Para as amostras curadas por 28 dias pode-se observar um acréscimo na RCS até 1% de adição de cal à mistura. A amostra sem cal apresentou RCS de 124 kPa crescendo para 409 kPa e 394 kPa, quando adiciona-se 1% e 3% de cal, respectivamente. Além disso, pode-se observar que o crescimento da RCS é mais significativo para as amostras curadas por 28 dias, pois a relação entre a RCS da mistura contendo 1% de cal e a RCS obtida para a amostra sem cal é 3,3 para a amostra curada por 28 dias e 1,7 para período de cura de 3 dias.

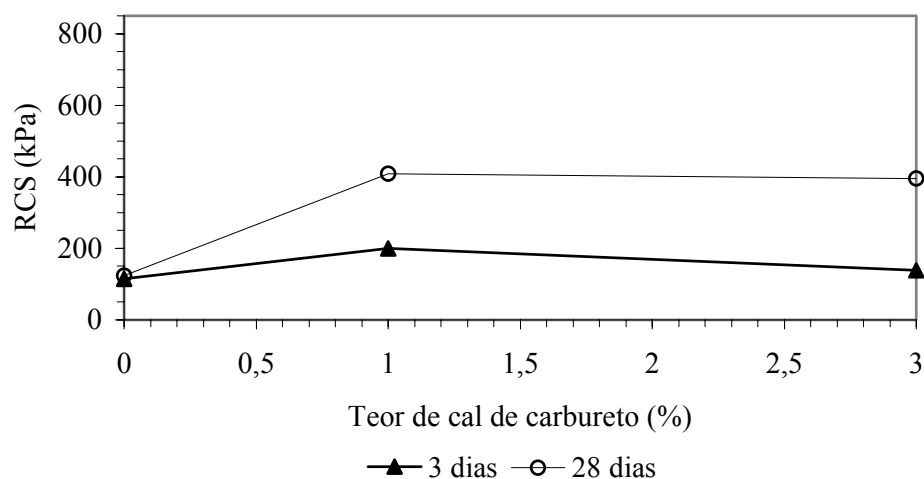


FIGURA 7.7 – Variação da resistência à compressão simples (RCS) com o teor de cal de carbureto adicionado à mistura contendo 33% de cinza pesada.

A relação  $RCS_{28}/RCS_3$  para as amostras contendo 33% de cinza pesada é apresentada na Tabela 7.6. É possível concluir que, para este teor de cinza, praticamente não ocorre formação de produtos cimentantes quando não se acrescenta cal à mistura, pois a relação  $RCS_{28}/RCS_3$  para a amostra sem cal é 1,07. Observa-se também, que a mistura escória e 33% cinza pesada é bastante reativa com a cal de carbureto, pois conforme cresce a sua quantidade na mistura, cresce a relação  $RCS_{28}/RCS_3$ . A maior quantidade de produtos cimentantes é obtida para a mistura contendo 3% de cal. Porém, o valor máximo de  $RCS_{28}$  foi obtido para a amostra contendo 1% de cal, sendo igual a 409 kPa. Esta diferença de comportamento não era esperada, ocorrendo provavelmente em função da heterogeneidade das amostras.

TABELA 7.6 – Relação  $RCS_{28}/RCS_3$  para misturas contendo 33% de cinza pesada e diferentes teores de cal de carbureto.

Teor de cal (%)	$RCS_{28}/RCS_3$
0	1,07
1	2,05
3	2,84

### 7.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

A variação da resistência à tração avaliada através de ensaios de compressão diametral para as misturas contendo escória, cinza e cal é apresentada nas Tabelas 7.7 e 7.8 para as amostras contendo 20% e 33% de cinza, respectivamente, e curadas por períodos de 3 e 28 dias. Observa-se na Tabela 7.7 que, para as amostras curadas por 28 dias, o aumento do teor de cal acrescentado à mistura gera um crescimento no valor da resistência, enquanto que, para as amostras curadas por 3 dias, o menor teor de cinza adicionado à mistura gera o maior valor de resistência. Analisando os resultados apresentados na Tabela 7.8 observa-se que, tanto o aumento do teor de cal acrescentado à mistura, quanto o aumento do período de cura proporcionam crescimento da RCD das amostras contendo 33% de cinza pesada.

TABELA 7.7 – Variação da resistência à compressão diametral (RCD) para misturas contendo 20% de cinza pesada e diferentes teores de cal de carbureto.

Teor de cal (%)	RCD (kPa)	
	3 dias	28 dias
1	20,99	22,29
3	11,95	32,91

TABELA 7.8 – Variação da RCD para misturas contendo 33% de cinza pesada e diferentes teores de cal de carbureto.

Teor de cal (%)	RCD (kPa)	
	3 dias	28 dias
1	12,28	26,92
3	29,81	32,51

A Figura 7.8 apresenta a relação entre RCD e RCS obtidas para as diferentes idades de cura, o que corresponde a diferentes níveis de cimentação. Esta figura é importante para comprovar a relação linear entre a RCD e a RCS existente para materiais cimentados. Thompson (1965) observou que a estabilização com aditivos proporciona resistência à tração aos solos. Obteve para as misturas solo-cal valores de RCD de 140 kPa a 1400 kPa e constatou que a relação RCD/RCS dessas misturas varia de 0,10 a 0,15, não sendo função do tipo ou teor de cal. Observa-se que a relação obtida para as misturas escória-cinza-cal está abaixo destes valores, podendo ser função do tipo de material utilizado (agregado).

Para as misturas contendo 20% de cinza pesada e 3% de cal de carbureto curadas por 28 dias e 33% de cinza pesada e 3% de cal de carbureto curadas por 3 dias, a relação RCD/RCS não obedece a mesma equação. Tal variação pode ser função da heterogeneidade do material e da dificuldade de obter-se amostras com composições químicas idênticas.

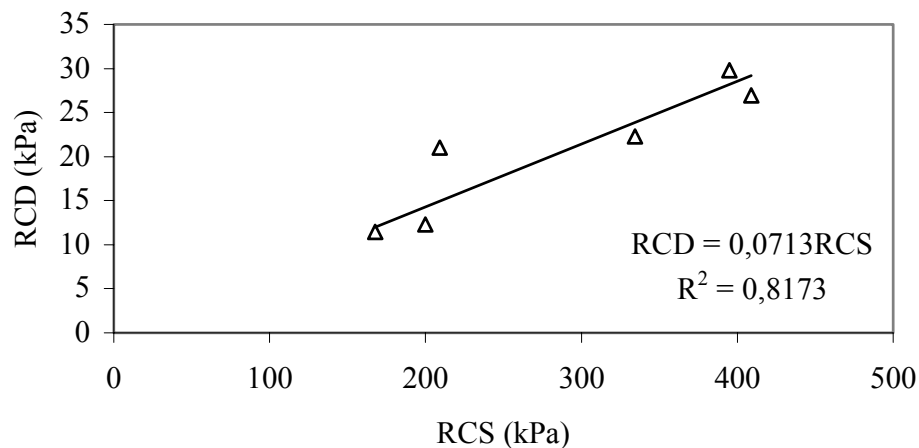


FIGURA 7.8 – Variação da resistência à compressão diametral (RCD) em função da resistência à compressão simples (RCS).

## 7.6 DETERMINAÇÃO DA MISTURA ÓTIMA

A partir dos resultados apresentados nos itens anteriores, foi possível chegar à definição de uma mistura ótima. Os critérios para a determinação foram a resistência, e a trabalhabilidade, isto é, a facilidade de manusear e compactar a amostra em laboratório. Quanto à resistência, adotou-se como mistura ótima aquela que apresentou maiores valores de RCS e RCD para período de cura de 28 dias. Avaliando as misturas seguindo estes critérios concluiu-se que a mistura ótima é composta por 80% de escória, 20% de cinza pesada e 3% de cal de carbureto (porcentagem em peso calculada sobre o total da mistura de escória e cinza).

Conhecendo a mistura ótima avaliou-se a deformabilidade elástica para os tempos de cura de 3 dias e 28 dias.

A deformabilidade elástica das amostras da mistura ótima foi determinada através de ensaios para a determinação do módulo de resiliência em corpos de prova curados por 3 e 28 dias. A Figura 7.9 apresenta a variação do módulo de resiliência da mistura em função da tensão confinante para os tempos de cura estudados. Observa-se que o comportamento quanto à deformabilidade elástica das misturas também pode ser ajustado pelo modelo clássico da equação 6.2, apresentada no capítulo anterior e transcrita a seguir:

$$MR = k_1 \cdot \sigma_c^{k_2} \quad [6.2]$$

Onde:

MR = módulo de resiliência (kPa)

$\sigma_c$  = tensão confinante (kPa)

$k_1$  = módulo de resiliência para  $\sigma_c = 1$

$k_2$  = coeficiente angular da equação da reta de ajuste

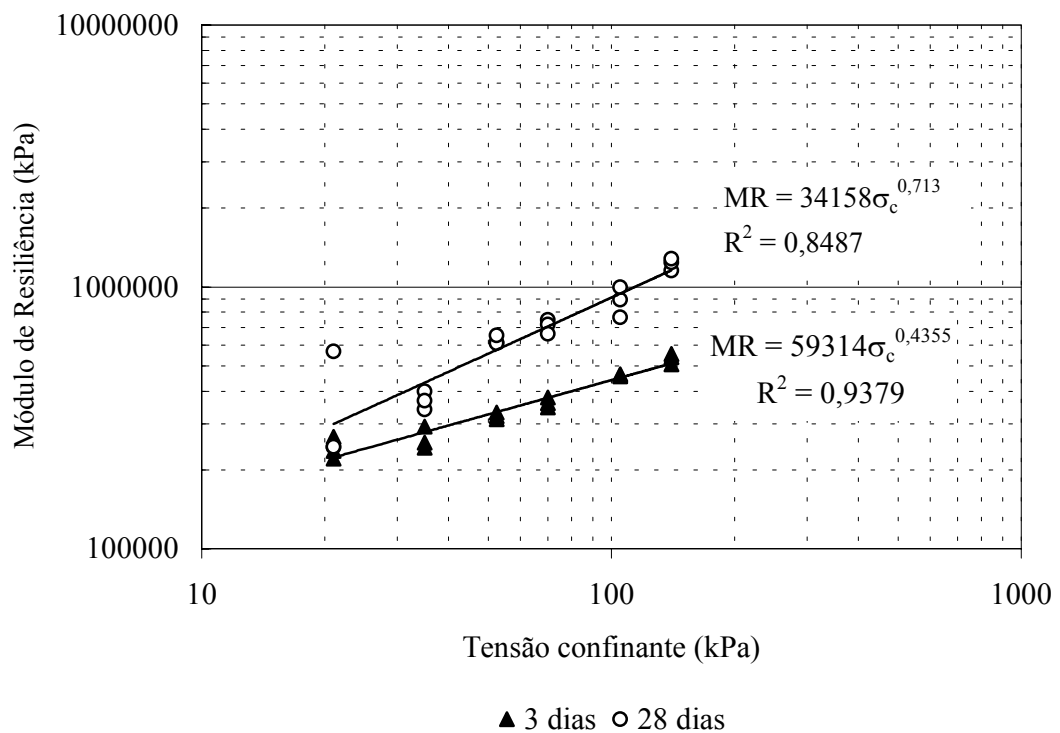


FIGURA 7.9 – Variação do módulo de resiliência em função do tempo de cura.

Observa-se que o coeficiente  $k_2$  da mistura curada por 28 dias é muito elevado, indicando forte dependência do módulo de resiliência em relação às tensões confinantes. Na Figura 7.10 é possível comparar o módulo de resiliência da mistura curada por 28 dias com o de uma amostra da EGC Misturada do mês 6 (M6). A partir destes resultados e considerando o emprego como material para sub-base de pavimentos onde a tensão confinante é cerca de 50 kPa, observa-se que a diferença entre o módulo de resiliência da EGC e da mistura é

significativa. Nesta situação a EGC apresenta módulo de resiliência de 345 MPa e a mistura de 556 MPa, isto é, a mistura apresenta valores 60% superiores aos obtidos para a EGC.

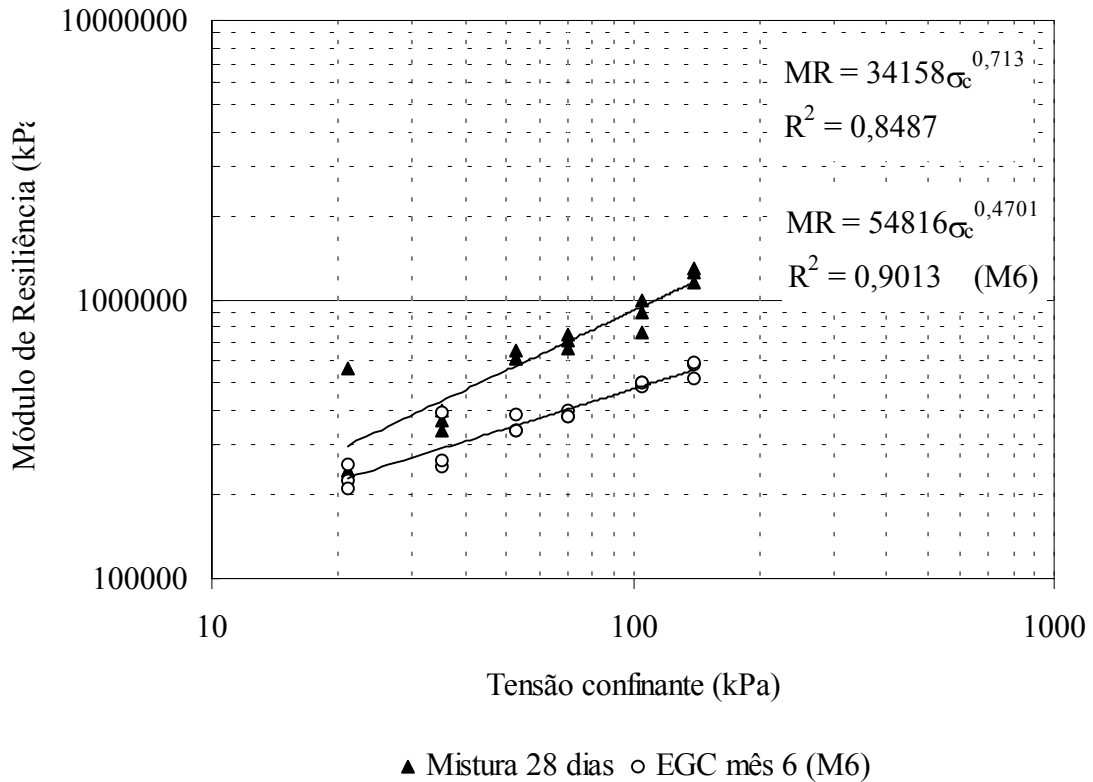


FIGURA 7.10 – Módulos de resiliência da mistura ótima curada por 28 dias e da EGC.

## 7.7 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL

A fim de verificar a possibilidade da ocorrência de danos ao meio ambiente por liberação de elementos traço contidos nas misturas foram realizados ensaios de Lixiviação (NBR 10006) e Solubilização (NBR 10005). As misturas ensaiadas foram curadas por 14 dias e eram compostas por 80% de escória + 20% de cinza pesada sendo acrescentado 3% de cal de carbureto (em relação ao peso total de escória+cinza) e por 80% de escória + 20% de cinza pesada sem adição de cal de carbureto.

Tessari (1998) realizou ensaios de lixiviação e solubilização da cinza pesada e verificou que nenhum dos metais presentes na composição química do material foi lixiviado

ou solubilizado em proporção maior que a permitida pela NBR 10004 (ABNT, 1987). Portanto a cinza pesada pode ser considerada um resíduo classe III - inerte.

Na Tabela 7.9 são apresentados os resultados da análise química do extrato obtido através do ensaio de lixiviação das misturas em comparação ao obtido pela lixiviação da escória (Mancio, 2001), sendo apresentados ainda os limites máximos estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 1987). Observa-se que nenhuma amostra ensaiada apresentou elementos em concentração acima da estabelecida pela norma NBR 10004 (ABNT, 1987). Isto significa que nenhum dos materiais pode ser considerado um resíduo perigoso, não causando riscos ao meio ambiente.

TABELA 7.9 – Análise química do extrato do lixiviado.

	Escória (mg/l)	Escória + cinza (mg/l)	Escória + cinza + cal (mg/l)	<b>NBR 10004 (mg/l)</b>
F <sup>-</sup>	1,40	1,80	2,0	<b>150</b>
Cd	< 0,01	0,01	< 0,01	<b>0,50</b>
Pb	0,10	< 0,05	0,20	<b>5,00</b>
Cr	< 0,02	0,05	0,12	<b>5,0 (Cr<sub>Total</sub>)</b>
Cr <sup>+6</sup>	< 0,02	0,05	0,10	
Ba	< 1,00	1,4	3,3	<b>100</b>
Ag	< 0,01	< 0,01	0,01	<b>5,00</b>
Hg	< 0,001	< 0,0002	0,0001	<b>0,1</b>

A Tabela 7.10 apresenta os resultados da análise química do extrato obtido através do ensaio de solubilização das misturas em comparação ao obtido pela solubilização da escória (Mancio, 2001), sendo apresentados ainda os limites máximos estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 1987).



TABELA 7.10 – Análise química do extrato do solubilizado.

	Escória (mg/l)	Escória + cinza (mg/l)	Escória + cinza + cal (mg/l)	<b>NBR 10004 (mg/l)</b>
F <sup>-</sup>	0,53	0,65	0,18	<b>1,50</b>
Cd	< 0,01	< 0,01	< 0,01	<b>0,005</b>
Pb	< 0,05	0,07	< 0,05	<b>0,05</b>
Cr	< 0,02	0,02	0,07	<b>0,05 (Cr<sub>Total</sub>)</b>
Cr <sup>+6</sup>	< 0,01	0,02	0,02	
Cl <sup>-</sup>	7,70	9,40	5,10	<b>250</b>
Cu	< 0,02	< 0,02	< 0,02	<b>1,0</b>
Zn	< 0,01	0,05	0,10	<b>5,0</b>
Fe	< 0,03	0,10	0,05	<b>0,30</b>
Mn	< 0,01	< 0,01	< 0,01	<b>0,10</b>
Na	8,60	16,00	10,00	<b>200</b>
Al	< 0,20	0,20	< 0,20	<b>0,20</b>
S – SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	26,00	32,00	4,40	<b>400</b>
Ba	< 1,00	< 1,00	< 1,00	<b>1,0</b>
Ag	< 0,01	< 0,01	< 0,01	<b>0,05</b>
N – NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	< 0,10	< 0,10	0,65	<b>10,0</b>
CN <sup>-</sup>	< 0,02	< 0,02	< 0,02	<b>0,10</b>
Hg	< 0,0001	< 0,0002	< 0,0002	<b>0,001</b>
Dureza (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	163	96	3279	<b>500</b>

Observa-se que a concentração de Cádmio (Cd) para todas as amostras é provavelmente maior que o limite admissível. No extrato do solubilizado da mistura composta por escória e cinza o elemento Chumbo (Pb) supera a concentração admissível em 40%. A

amostra composta por escória, cinza e cal apresenta dureza muito acima do padrão estabelecido pela NBR 10004 (ABNT, 1987), sendo observada uma concentração de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) 6,5 vezes maior que o limite admissível, além de apresentar concentração de cromo total acima da admitida. Por estas razões, todas as amostras são classificadas como resíduos classe II – não inerte, ou seja, podem solubilizar alguns compostos que poderiam causar algum tipo de risco ao meio ambiente e à saúde pública.

Cabe ressaltar que os ensaios ambientais não simulam as condições de uso do agregado como base e sub-base de pavimentos, sendo muito rigorosos e, portanto, gerando resultados que provavelmente não serão observados ao utilizar o material.

## 8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões do estudo laboratorial que visa viabilizar a utilização da escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos. Essas conclusões são apresentadas de maneira seqüencial, seguindo a estrutura da dissertação. Observam-se aspectos relevantes sobre a escória de aciaria elétrica, conferindo-se maior ênfase à análise dos resultados obtidos durante o estudo laboratorial.

Também são feitas algumas sugestões sobre aspectos a serem considerados em futuras pesquisas, buscando complementar os resultados desta dissertação.

### 8.1 CONCLUSÕES DA PESQUISA

A análise dos resultados obtidos por esta pesquisa permite concluir que:

- 1) A escória de aciaria elétrica pode ser empregada como agregado para base e sub-base de pavimentos tanto estabilizada granulometricamente quanto modificada por aditivos.
- 2) A correção granulométrica da escória de aciaria elétrica estudada foi fundamental para a melhoria de suas características, como a capacidade de suporte e trabalhabilidade.
- 3) As curvas de compactação da escória de aciaria elétrica não têm o formato tradicional (um ramo ascendente e um descendente). A escória com granulometria original apresenta curvas com dois picos bem definidos enquanto que a escória com granulometria corrigida (EGC) não apresenta um formato único.

- 4) A umidade que proporciona uma melhor compactação da EGC sem causar expulsão de material fino é 5%, podendo variar 0,2% para cima ou para baixo. Esta umidade foi estabelecida durante a execução dos ensaios através do critério de trabalhabilidade. O tempo de estocagem e a presença ou não dos contaminantes da escória do forno-panela não afetam os parâmetros de compactação.
- 5) Os valores encontrados para peso específico aparente seco máximo são muito elevados (cerca de  $2,6 \text{ gf/cm}^3$ ) e variam pouco em função da umidade de compactação. Dessa forma, aconselha-se como principal critério de controle de execução das camadas de base e sub-base a umidade de compactação.
- 6) O Índice de Suporte Califórnia (ISC) da EGC é da ordem de 200%, ou seja, cerca de duas vezes a capacidade de suporte do material padrão (BG = brita graduada).
- 7) Não foi verificada expansão no ensaio de ISC, sendo necessária a utilização de uma metodologia própria para o material.
- 8) A durabilidade das amostras de EGC ao ataque por sulfatos é muito elevada, com perdas de massa total máxima de 0,5%, muito abaixo do limite especificado para a escória de aciaria (5%).
- 9) A densidade real do agregado é elevada, variando entre 3,39 e 3,51.
- 10) A perda de peso por abrasão no equipamento de Los Angeles é superior ao limite estabelecido para a escória de aciaria. Observa-se, entretanto, que a literatura científica não esclarece se a perda de peso máxima por abrasão (25%) se refere à escória de aciaria elétrica (que emprega sucata como principal matéria-prima) ou à escória de aciaria LD (que emprega ferro-gusa). Estas perdas elevadas (superiores a 36%) podem ser função da composição química do agregado e do tipo de resfriamento ao qual a escória foi submetida. Cabe ressaltar que para agregados convencionais a perda de peso por abrasão no equipamento de Los Angeles admissível é 55%.
- 11) A escória de aciaria elétrica apresenta natureza expansiva devido, principalmente, à presença de CaO e MgO livres. Nesta pesquisa mostrou-se que um período de 4 meses de cura através de estocagem a céu aberto é suficiente para garantir níveis

de expansão não prejudiciais à qualidade do agregado. É fundamental que os ensaios de expansão sejam realizados com amostras com a distribuição granulométrica proposta para utilização, visto que esta característica interfere nos resultados.

- 12) As escórias Misturada e do Forno não apresentaram diferenças significativas de comportamento, seja em relação ao potencial expansivo, seja em relação às características de resistência, capacidade de suporte e deformabilidade elástica.
- 13) Para qualquer nível de tensão confinante a EGC apresenta módulo de resiliência superior ao de materiais granulares tradicionalmente empregados em pavimentação, comprovando seu excelente comportamento quanto a deformações elásticas. Avaliando seu emprego como material de base, a EGC apresenta módulo de resiliência 43% superior ao de uma brita graduada (BG) de basalto e 74% superior ao de uma BG de granito. Na camada de sub-base seu comportamento superior é ainda mais evidente. O módulo de resiliência da EGC é 85% superior ao de um saibro e 122% superior ao de uma BG de granito.
- 14) A partir de uma análise paramétrica, concluiu-se que um pavimento composto por 7,5 cm de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) e 40 cm de BG de basalto apresenta comportamento, quanto às deformações elásticas, equivalente a uma estrutura composta por 7,5 cm de CBUQ e 25 cm de EGC. Resulta assim uma estrutura mais esbelta e econômica.
- 15) A adição de 13% de cal de carbureto duplica o ISC da escória não curada com granulometria original, sendo equivalente ao ISC da EGC. A adição da cal melhora a capacidade de suporte e a trabalhabilidade do material, porém não ocasiona melhoria na resistência à compressão simples (RCS). A adição de 20% de cinza pesada à escória não curada com granulometria original apresenta resultados similares aos obtidos através da adição de 13% de cal de carbureto.
- 16) A adição de 3% de cal de carbureto sobre o peso total das misturas compostas por 80% de escória e 20% de cinza pesada ocasionou aumento significativo da RCS em corpos de prova curados por 28 dias, sendo considerada a mistura ótima. O comportamento quanto à deformabilidade elástica da mistura curada por 3 dias é similar ao da EGC, apresentando MR muito próximos.

- 17) As misturas formadas por escória (80%) e cinza (20%) e escória (80%), cinza (20%) e cal (3% - sobre o peso total da mistura escória e cinza) são classificadas como resíduos classe II – não-inerte, a mesma classificação ambiental da escória de aciaria elétrica pura.

Finalizando, o emprego de escória de aciaria elétrica em camadas granulares permitirá a construção de pavimentos de melhor qualidade técnica e contribuirá de forma expressiva para a redução de problemas ambientais.

## **8.2 ALGUMAS SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

Com o objetivo de complementar os resultados obtidos por esta pesquisa e contribuir para a evolução do conhecimento do comportamento da escória de aciaria elétrica como agregado de base e sub-base de pavimentos, sugere-se:

- 1) A avaliação do comportamento do material em camadas granulares de pavimentos reais, através da construção, solicitação e monitoramento de trechos experimentais.
- 2) A investigação das prováveis reações envolvendo escória de aciaria elétrica, cinza pesada e cal de carbureto.
- 3) A avaliação do potencial expansivo das misturas contendo escória, cinza pesada e cal de carbureto.
- 4) Um estudo mais aprofundado, buscando explicar a ocorrência de curvas de compactação com diferentes formas para a escória de aciaria.
- 5) Avaliar a influência da composição química e de outros fatores, como a forma de resfriamento da escória, sobre a resistência à abrasão no equipamento de Los Angeles, procurando verificar se o critério estabelecido pelo DNER é válido, especificamente para escórias de aciaria elétrica, ou estabelecer novos valores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKINMUSURU, J.O. Potential beneficial uses of steel slag wastes for civil engineering purposes. **Resources, Conservation and Recycling**. Elsevier, Pergamon, n.5, p. 73-80, 1991.
- ALVARENGA, J.C.A.; RIBEIRO, P.C.M.; MOTTA, L.M.G. Avaliação econômica de pavimentos flexíveis dimensionados pelo Método Mecanístico e utilizando escória de aciaria como base. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 15., 2001, Campinas. **Anais...**, Rio de Janeiro:ANPET, 2001, v.1, p. 371-379.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 698** – Standard test method for laboratory compaction characteristics of soils using standard effort (600 kN/m<sup>3</sup>). Philadelphia, 1991.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 2940** – Standard specification for graded aggregate material for bases or subbases for highways or airports. Philadelphia, 1992.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 4792** – Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions. Philadelphia, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.004** – Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 1987. 63p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.005** – Lixiviação de Resíduos. Rio de Janeiro, 1987. 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.006** – Solubilização de Resíduos. Rio de Janeiro, 1987. 02p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.007** – Amostragem de Resíduos. Rio de Janeiro, 1987.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7175** - Cal hidratada para argamassas – especificação. Rio de Janeiro, 1994. 04p.
- BARKSDALE, R.D.; ITANI, S.Y. Influence of aggregate shape on base behaviour. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n 1227, p. 173-182, 1989.
- BRASIL - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis**. Rio de Janeiro, 1979.
- BRASIL - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-EM 262/94**: Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários. Rio de Janeiro, 1994. 04p.
- BRASIL - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES-P 010/71**: Base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1971. 06p.
- BRASIL - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035/94**: Desgaste de agregado por abrasão. Rio de Janeiro, 1994. 03p.
- BRASIL - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 049/94**: Solos - determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994. 14p.
- BRASIL - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 081/94**: Agregado graúdo – determinação da densidade. Rio de Janeiro, 1994. 04p.
- BRASIL - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 083/94**: Análise Granulométrica de Agregados. Rio de Janeiro, 1994. 02p.
- BRASIL - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 084/94**: Densidade Real do Agregado Miúdo. Rio de Janeiro, 1994. 03p.
- BRASIL - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 089/94**: Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994. 06p.
- BRASIL - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 124/94**: Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994. 06p.
- BRASIL - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 131/94**: Solos – determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 1994. 08p.



BRASIL - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 138/94**: Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994. 04p.

BRASIL - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 180/94**: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples. Rio de Janeiro, 1994. 11p.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 1924 - **Methods of test for stabilised soils**. London, 1990.

BRUN, D. W.; YUAN, W. C. **Caracterização e aproveitamento dos resíduos siderúrgicos principais gerados pela aciaria elétrica**. Seminário da disciplina MTMD99 – Tópicos especiais – Resíduos industriais siderúrgicos: caracterização e aproveitamento. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 34p., 1994.

BURGOS, E. C. *et al.* Pyrometallurgical treatment of bof slags for the production of construction materials and refining fluxes. In: Japan-Brazil Symposium Dust Processing-Energy-Environment In Metallurgical Industries, 1. **Proceeding**. São Paulo, 1999.

CALLEJA, J. Escorias y cementos siderúrgicos. **Materiales de Construccion**, Madrid, n.186, p. 11-38, 1982.

CERATTI, J.A.P. Disciplina de Mecânica dos Pavimentos. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

CERJAN-STEFANOVIC, S.; RASTOVCAN-MIOC, A.; NOVOSEL-RADOVIC, V.J. Mechanical properties of cement with addition of electric furnace slag. **Metalurgija**,..., n.36, p.93-98, 1997.

CHESNER, W.H.; COLLINS, R.J.; MACKAY, M.H.; EMERY, J.J. **User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction**. FHA – FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2001. Obtido via internet em 31/01/01. <http://tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/ssa1.htm> (a)

CHESNER, W.H.; STEIN, C.W.; COLLINS, R.J.; VAN HELDEN, L. **Waste and Recycled Materials in the Transportation Industry**. NCHRP 4-21 – Information Database,

version 1.0.8. American Association of State Highway and Transportation Officials. Em CD-ROM. (b)

COOMARASAMY, A.; WALZAK, T. L. Effects of moisture on surface chemistry of steel slags and steel slag-asphalt paving mixes. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n.1492, p.85-95, 1995.

CRAWFORD, C.B.; BURN, K.N. Building damage from expansive steel slag backfill. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**. New York, n.SM6, p.1325-1334, 1969.

DZIARMAGOWSKI, M. et al. Reduction of converter slag in electric arc furnace. **Ironmaking and Steelmaking**. v.19, n.1, p.45-49, 1992.

EADES, J.L.; GRIM, R.E. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. **Highway Research Record**, Washington, D.C., n.262, p.61-72, 1966.

EMERY, J. J. Steel slag applications in highway construction. **Silicates Industriels**, Paris, n.5, p.209-218, 1977.

EMERY, J. J. Utilisation des scories d'aciérie dans la construction des autoroutes canadiennes. **Revue de Métallurgie**, Paris, n.5, p.303-310, 1978.

FOGAÇA, B.C. **Análise paramétrica de estruturas de pavimento utilizando areia do litoral do Rio Grande do Sul, estabilizada com cinza volante e cal**. Porto Alegre, 1996. 143p. Dissertação de Mestrado em Engenharia (Geotecnia) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GEISELER, J. Use of Steelworks slag in Europe. **Waste Management**, London, v.16,n.1-3, p.59-63, 1996.

GEYER, R. M. T. *et al.* Escórias Siderúrgicas: caracterização e aplicações para a Indústria da Construção Civil. In: Seminário de redução e matérias-primas resíduos na siderurgia, 25. Volta Redonda, RJ. **Anais...**, p.363-381, 1994.

GEYER, R. M. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Porto Alegre, 2000. 173p. Tese de Doutorado em Engenharia (Construção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- GIDLEY, J.S.; SACK, W.A. Environmental aspects of waste utilization in construction. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v.110, n.6, p.1117-1133, 1984.
- GUIMARÃES, J.E.P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. São Paulo: Pini, 1997.
- GUMIERI, A. G.; PAGNUSSAT, D. T.; DAL MOLIM, D. Estudo da expansibilidade de escórias de aciaria visando a utilização em concreto. In: Congresso Brasileiro de Cimento. s. l. **Anais...**, 1999.
- GUPTA, J.D.; KNELLER, W.A.; TAMIRISA, R.; JANKUN, E.S. Characterization of Base and Subbase Iron and Steel Slag Aggregates Causing Deposition of Calcareous Tufa in Drains. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n.1434, p.08-16, 1994.
- HURD, J.O. Effect of Slag Type on Tufa Precipitate Formation. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n.1192, p.79-84, 1988.
- IBS – INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA **Escórias Siderúrgicas – Novas Tendências**. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 9.,1998, Vitória. **Anais...**, Rio de Janeiro:ABPv, 1998.
- IBS – INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – **IBS Anuário Estatístico da Indústria Siderúrgica Brasileira**. 2001. Brasil.
- IBS – INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – **Comunicação pessoal**. 2002. Brasil.
- JIS A 5015 – 1992 **Escória Siderúrgica para Construção de Estradas**.
- KANDHAL, P. S.; HOFFMAN, G. L. Evaluation of Steel Slag Fine Aggregate in Hot-Mix Asphalt Mixtures. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n.1583, p.28-36, 1998.
- LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics, SI version**. New York: Jonh Wiley, 553p.,1979.
- LAPAV – Laboratório de Pavimentação – **Comunicação interna**. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.
- LEE, F. T.; LEE, C. H. Study on the reduction behaviour of FeO in EAF slag. **Steel Times International**. p.20-25, 1995.

- LEE, P.Y.; SUEDEKAMP, R.J. Characteristics of irregularly shaped compaction curves of soils. **Highway Research Record**, Washington, D.C., n.381, p.1-9, 1972.
- LEKARP, F.; ISACSSON, U.; DAWSON, A. State of the Art – I: Resilient Response of Unbound Aggregates. **Journal of Transportation Engineering**, New York, v.126, n.1, p.66-75, 2000.
- LIMA, L. A. **Hormigones com escórias de forno eléctrico como áridos: propriedades, durabilidade y comportamiento ambiental**. Barcelona, 1999. 243p. Tese de Doutorado em Engenharia, Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports, Departament D'Enginyeria de la Construcció, Barcelona, 1999.
- LIMA, N. P.; NASCIMENTO, J. F.; FILHO, V. P. V.; ALBERNAZ, C. A. V. Pavimentos de alto desempenho estrutural executados com escória de aciaria. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 10., 2000, Uberlândia. **Anais...**, Rio de Janeiro:ABPv, 2000.
- LÓPEZ, F. A.; FORMOSO, A.; MEDINA, F. Escórias LD, coproductos de la industria siderúrgica – I Parte. Composición, tratamiento y aplicaciones. **Revista de Metalurgia**. v.25, n.4, p.247-254, 1989.
- LÚCIO, A. Físico-química metalúrgica – 2ª parte. Belo Horizonte, p.555-599, 1981.
- MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. São Paulo, 2000. 153p. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MANCIO, M. **Contribuição ao estudo do fenômeno da instabilidade volumétrica das escórias de aciaria elétrica**. Porto Alegre, 2001.141p. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MARMITT, H.M. **Efeito das características de compactação no módulo resiliente de britas graduadas**. Porto Alegre, 2002. Dissertação a ser defendida para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MASUERO, A.B.; VILELA, A.C.F.; DAL MOLIN, D.C.C. Emprego de escórias de aciaria elétrica como adição a concretos. In: Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de

Resíduos Sólidos Industriais, 2000. **Anais em CD-ROM...** Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, São Paulo, 2000.

MASUERO, A.B. **Estabilização das Escórias de Aciaria Elétrica com Vistas a sua Utilização como Substituição ao Cimento.** Porto Alegre, 2001. 264p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MATHUR, S.; SONI, S. K.; MURTY A. Utilization of Industrial Wastes in Low-Volume Roads. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n.1652, p.246-256, 1999.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos.** Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997. 380 p.

METHA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI, 1994. 573 p.

MONTGOMERY, D.G.; WANG, G. Preliminary laboratory study of steel slag for blended cement manufacture. **Materials Forum.** n.15, 1991. p.374-382.

NOUMAN, A.A. *et al.* The use of steel slag in asphaltic concrete. **ASTM – Special Technical Publication.** n.1147, Philadelphia, PA, USA. p.3-18, 1992.

PATERSON, W.D.O.; MAREE, J.H.. **The South African Mechanistic Design Method (ASMDM).** South Africa, 1994.

PEREIRA, E. A. C. Aspectos técnicos da gestão de resíduos nas siderúrgicas integradas a coque. In: Seminário de redução e matérias-primas resíduos na siderurgia, 25., Volta Redonda. **Anais...**, p.187-199, 1994.

PEREIRA, E. A. C. Aspectos técnicos da gestão de resíduos nas siderúrgicas integradas a coque. **Metalurgia & Metais**, São Paulo, v.51, p.122-128, 1995.

PIRET, J.; DRALANTS, A. Utilization of LD slag by reduction in the liquid state production of portland clinker and hot metal. **Cement, bétons, plânters, chaux**, v.748, n.3, p.3-7, 1984.

ROGERS, C.D.F.; GLENDINNING, S.; ROFF, T.E.J. Lime modification of clay soils for construction expediency. **Geotechnical Engineering**, London, v.125, p.242-249, 1997.

RUBIO, A.R. & CARRETERO, J.G. La aplicación de las escorias de aceria en carreteras. **Ingenieria Civil**, v.80, p.5-8, 1991.

- SÁNCHEZ, J.C.D.; ZWONOK, O.; FERNANDES, I. *et al.* Caracterização de cinzas de carvão e sua classificação segundo a NBR 10.004. In: Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, 2., 1998, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABES, 1998.
- SANTANA, H. Pontos básicos e elementares da estabilização granulométrica. In: Reunião Anual de Pavimentação, 18., 1983, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre:ABPv, 1983, p.417-462.
- SEKI, A. *et al.* Development of dusting prevention stabilizer for stainless steel slag. **Kawasaki Steel Technology Report**. n.15, p.16-21, 1986.
- SHERWOOD, P.T. **Alternative materials in road construction**. London: Thomas Telford, 124p., 1995.
- SILVA, E. A. Uso de escória de aciaria em pavimentação viária. In: Reunião Anual de Pavimentação, 28., Rio de Janeiro. **Anais...**, Rio de Janeiro:ABPv, 1994, p.261-283.
- TAYLOR, H. F. W. *Cement chemistry*. 2 ed. New York, Thomas Telford, 1997.
- TESSARI, M.A. **Ensaio de placas em camadas de cinza pesada de carvão tratadas com cimento**. Porto Alegre, 1998. 82p. Dissertação de Mestrado em Engenharia (Geotecnia), Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- THOMAS, G. H. Expériences britanniques d'utilisation des scories LD comme revêtements routiers. **Revue de Métallurgie**, Paris, n 5, p.329-334, 1978.
- THOMÉ, A. **Comportamento de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais**. Porto Alegre, 1999. 238p. Tese de Doutorado em Engenharia (Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- THOMPSON, M.R. Split-Tensile Strength of Lime-Stabilized Soils. **Highway Research Record**. Washington, D.C., p.69-82, 1965.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime stabilization, reactions, properties, design and construction**. Washington:TRB, 1987. 58p. (State of the art report, 5).
- von KRÜGER, P. Panorama mundial do aproveitamento de resíduos na siderurgia. **Metalurgia & Materiais**, v.51, n.438, p.116-119, 1995.