

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**CARLOS OLYMPO LIMA RAPOSO**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE COMPACTAÇÃO E  
EXPANSÃO DE UMA ESCÓRIA DE ACIARIA LD PARA USO  
EM PAVIMENTAÇÃO**

**Vitória**  
**2005**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**CARLOS OLYMPO LIMA RAPOSO**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE COMPACTAÇÃO E  
EXPANSÃO DE UMA ESCÓRIA DE ACIARIA LD PARA USO  
EM PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Prof.<sup>a</sup> Kátia Vanessa Bicalho, Ph. D.  
Prof. Reno Reine Castello, Ph. D.

**Vitória  
2005**

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

R219e Raposo, Carlos Olympo Lima, 1978-  
Estudo experimental de compactação e expansão de uma escória de aciaria  
LD para uso em pavimentação / Carlos Olympo Lima Raposo. – 2005.  
163 f. : il.

Orientadora: Kátia Vanessa Bicalho.

Co-orientador: Reno Reine Castello.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Escória. 2. Mecânica do solo. 3. Pavimentação. 4. Resíduos industriais.  
I. Bicalho, Kátia Vanessa. II. Castello, Reno Reine. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

---

**CARLOS OLYMPO LIMA RAPOSO**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE COMPACTAÇÃO E  
EXPANSÃO DE UMA ESCÓRIA DE ACIARIA LD PARA USO  
EM PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisição parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em 11 de novembro de 2005.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Prof<sup>a</sup>. Kátia Vanessa Bicalho, Ph.D.  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientadora

---

Prof. Reno Reine Castello, Ph.D.  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Co-Orientador

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maristela Comes da Silva  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinadora Interna

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eliana Zandonade  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinadora Interna

---

Prof. Dr. Washington Peres Núñez  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Examinador Externo

Dedico este trabalho ao meu pai, Manuel,  
pelo amor, confiança e incentivo,  
e à minha mãe, Laura, pelo amor,  
amizade, e por ter lutado tanto para  
que seus filhos pudessem ter uma das  
maiores heranças que se pode deixar:  
o estudo.

À minha irmã Fernanda e  
aos meus padrinhos, Penha e Hélio,  
pela confiança em mim depositada.

À Kelen que durante esses seis anos  
vem me apoiando e participando da  
minha vida, compartilhando amor,  
companheirismo e alegria  
em todos os momentos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pois é o Criador de todas as coisas e fonte de todo conhecimento.

À Professora Kátia Vanessa Bicalho pelo apoio, incentivo, paciência e pelos ensinamentos, acadêmicos e profissionais, durante a orientação deste trabalho.

Ao Professor Reno Reine Castello, que mesmo aposentado pela UFES me orientou juntamente com a professora Kátia, pelo incentivo, pelos importantes questionamentos e correções no decorrer de toda esta pesquisa.

À Professora Maristela Gomes da Silva, por participar da banca examinadora e pelos questionamentos, durante o projeto de dissertação, que contribuíram para o melhor encaminhamento deste trabalho.

À Professora Eliana Zandonade, por me auxiliar com seus preciosos conhecimentos estatísticos mesmo durante o seu período de licença maternidade e por participar da banca examinadora.

Ao Professor Washington Peres Núñez, pela minuciosa correção e pelas valorosas contribuições para esta pesquisa, e por participar da banca examinadora.

Ao Professor Uberescilas Fernandes Polido, por despertar em mim a vontade de estudar geotecnia, pelos conhecimentos transmitidos sobre mecânica dos solos, e pelas sugestões e referências indicadas.

Ao técnico do Laboratório de Mecânica dos Solos Miguel Caxias, pelo incentivo, disposição para adaptar equipamentos e solucionar problemas dos ensaios, mas, especialmente, pela profunda amizade.

Ao técnico Luciano Roncate, pela inestimável disposição demonstrada durante a realização das atividades laboratoriais tão necessárias para a realização desta pesquisa.

Aos bolsistas de iniciação científica que auxiliaram nos ensaios desta pesquisa, os agora engenheiros Henrique, Wesleyne, Eduardo e, especialmente, Elvidio Gavassoni, que agradeço pela ajuda nos cálculos dos ensaios, nas figuras e nas tabelas.

Aos funcionários do Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFES, Carlos, Márcio, Roger, Lóriato, Sebastião e Jorge, pelo auxílio no recebimento das amostras, pelos ensaios de materiais e pela companhia nos momentos de descontração na UFES.

À engenheira Marita Cavassani, amiga pessoal e companheira de profissão durante as aulas para o curso de engenharia civil da UFES, pelo apoio, incentivo e pelos “muito obrigado”.

Aos colegas do mestrado, Gisele, Marina, Prof. Maurício, Fernanda, Janine, Kátia, Macksuel, Marcelo, Karla, e em especial ao engenheiro Fábio Uliana pela amizade e pelo auxílio em várias etapas deste trabalho, inclusive fazendo leituras dos ensaios nos finais de semana.

Aos colegas do NEXES, Fernanda, Denise, Daniella, Luciana Harue, Fabrícia, Jaime, que agüentaram minha ansiedade durante a realização desta pesquisa e em especial ao químico Gilliardí Vancini pelas primeiras amostragens e pelos ensaios de caracterização ambiental.

Aos amigos Vitor e Marcelo Grasselli, pela ajuda em vários momentos, pela descontração e pelo companheirismo nas pescarias submarinas, apesar de poucas durante esse estudo.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e do Departamento em Engenharia Civil com quem tive o prazer de conviver nestes últimos anos.

À CST e FINEP pelo apoio financeiro na realização dos ensaios e por disponibilizarem material para a pesquisa.

À CAPES, pelo apoio financeiro com a concessão da bolsa de estudos.

Finalmente, estendo os meus agradecimentos a todos que participaram desta caminhada e que, direta ou indiretamente, contribuíram na realização deste trabalho.

*“A ciência é a potência do homem, e, o amor, a sua força;  
o homem só se torna homem pela inteligência, mas só é homem  
pelo coração.*

*Saber, amar e poder; eis a vida completa.”*

*Henri-Frédéric Amiel (1821-1891)*



## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE QUADOS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS

RESUMO

ABSTRACT

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>22</b> |
| 1.1 JUSTIFICATIVA .....   | 24        |
| 1.2 OBJETIVOS .....   | 26        |
| 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....  | 27        |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>   | <b>29</b> |
| 2.1 A ESCÓRIA DE ACIARIA - PROCESSOS DE PRODUÇÃO .....                                | 29        |
| 2.2 A EXPANSÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD .....   | 33        |
| 2.3 ESTABILIZAÇÃO DA EXPANSÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA.....                              | 36        |
| 2.3.1 Estabilização da expansão pela utilização de misturas .....                     | 37        |
| 2.3.2 Tratamento da escória de aciaria nos estados líquido e sólido .....             | 41        |
| 2.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA .....                      | 44        |
| 2.4.1 Granulometria.....  | 44        |
| 2.4.2 Limites de consistência.....  | 45        |
| 2.4.3 Massa específica dos grãos.....   | 46        |
| 2.4.4 Massa específica no estado solto .....  | 47        |
| 2.4.5 Absorção.....   | 48        |
| 2.4.6 Abrasão Los Angeles .....   | 49        |
| 2.4.7 CBR ou Índice de suporte Califórnia .....                                       | 50        |
| 2.4.8 Módulo de resiliência.....  | 50        |
| 2.5 CARACTERÍSTICAS DE COMPACTAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA .....                        | 53        |
| 2.6 CARACTERÍSTICAS E MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA EXPANSÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA ..... | 57        |
| <b>3. MÉTODOS E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....</b>                                   | <b>62</b> |
| 3.1 PRODUÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD ANALISADA NESTE ESTUDO.....                     | 62        |
| 3.2 AMOSTRAGEM DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD ANALISADA NESTE ESTUDO .....                  | 65        |
| 3.2.1 Amostra não tratada.....  | 65        |
| 3.2.2 Amostra tratada 1.....  | 67        |
| 3.2.3 Amostra tratada 2.....  | 69        |
| 3.2.4 Redução da amostra de campo no laboratório .....                                | 71        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 3.3       | MÉTODOS DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E AMBIENTAL ..... | 72        |
| 3.3.1     | <i>Análise química</i> .....   | 73        |
| 3.3.2     | <i>Angulosidade - análise visual</i> .....                             | 73        |
| 3.3.3     | <i>Granulometria por peneiramento</i> .....                            | 74        |
| 3.3.4     | <i>Limites de consistência</i> .....                                   | 74        |
| 3.3.5     | <i>Massa específica dos sólidos</i> .....                              | 74        |
| 3.3.6     | <i>Massa unitária no estado solto</i> .....                            | 74        |
| 3.3.7     | <i>Absorção</i> .....  | 74        |
| 3.3.8     | <i>Abrasão Los Angeles</i> .....                                       | 74        |
| 3.3.9     | <i>Caracterização ambiental</i> .....                                  | 75        |
| 3.4       | MÉTODOS DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO .....                                 | 75        |
| 3.4.1     | <i>Ensaio de compactação com reuso de material</i> .....               | 76        |
| 3.4.2     | <i>Ensaio de compactação sem reuso de material</i> .....               | 77        |
| 3.5       | MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA EXPANSÃO .....                              | 79        |
| 3.5.1     | <i>Ensaio de expansão pelo método PTM-130/78</i> .....                 | 81        |
| 3.5.2     | <i>Ensaio de expansão pelo método JIS A 5015/92</i> .....              | 84        |
| 3.5.3     | <i>Ensaio de expansão pelo método ASTM D 4792/00</i> .....             | 85        |
| 3.6       | ENSAIOS ADICIONAIS .....   | 86        |
| 3.6.1     | <i>Permeabilidade a carga variável</i> .....                           | 86        |
| 3.6.2     | <i>Índice de Suporte Califórnia - CBR</i> .....                        | 87        |
| 3.7       | ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS .....                               | 88        |
| <b>4.</b> | <b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>                     | <b>92</b> |
| 4.1       | PLUVIOMETRIA E TEMPERATURA.....  | 93        |
| 4.2       | CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E AMBIENTAL .....                       | 95        |
| 4.2.1     | <i>Análise química</i> .....   | 95        |
| 4.2.2     | <i>Angulosidade - análise visual</i> .....                             | 96        |
| 4.2.3     | <i>Granulometria por peneiramento</i> .....                            | 96        |
| 4.2.4     | <i>Limites de consistência</i> .....                                   | 98        |
| 4.2.5     | <i>Massa específica dos grãos</i> .....                                | 98        |
| 4.2.6     | <i>Massa unitária no estado solto</i> .....                            | 99        |
| 4.2.7     | <i>Absorção</i> .....  | 100       |
| 4.2.8     | <i>Abrasão Los Angeles</i> .....                                       | 100       |
| 4.2.9     | <i>Caracterização ambiental</i> .....                                  | 101       |
| 4.3       | ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO .....   | 102       |
| 4.3.1     | <i>Ensaio de compactação com reuso de material</i> .....               | 103       |
| 4.3.2     | <i>Ensaio de compactação sem reuso de material</i> .....               | 105       |
| 4.3.3     | <i>Efeito do procedimento de compactação</i> .....                     | 110       |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 4.3.4     | <i>Efeito da energia de compactação</i> .....  | 111        |
| 4.3.5     | <i>Efeito das amostras</i> .....   | 114        |
| 4.3.6     | <i>Determinação da umidade ótima de compactação</i> .....  | 115        |
| 4.4       | DETERMINAÇÃO DA EXPANSÃO .....   | 117        |
| 4.4.1     | <i>Expansão pelo método PTM-130/78</i> .....   | 117        |
| 4.4.1.1   | Expansão pelo método PTM-130/78 da amostra tratada 1 .....   | 117        |
| 4.4.1.2   | Expansão pelo método PTM-130/78 da amostra não tratada .....   | 122        |
| 4.4.1.3   | Expansão pelo método PTM-130/78 da amostra tratada 2 .....   | 125        |
| 4.4.1.4   | Efeito da temperatura na expansão obtida pelo método PTM-130/78.....   | 127        |
| 4.4.1.5   | Efeito da energia de compactação na expansão pelo método PTM-130/78.....   | 129        |
| 4.4.1.6   | Correlação da umidade de compactação com a expansão obtida pelo método<br>PTM-130/78.....  | 131        |
| 4.4.1.7   | Critério de aceitação das amostras estudadas segundo os resultados de expansão<br>pelo método PTM-130/78 .....   | 132        |
| 4.4.1.8   | Comparação entre os resultados de expansão das amostras estudadas pelo método<br>PTM-130/78 .....  | 134        |
| 4.4.2     | <i>Expansão pelo método JIS A 5015/92</i> .....  | 137        |
| 4.4.2.1   | Expansão pelo método JIS A 5015/92 da amostra não tratada .....  | 137        |
| 4.4.2.2   | Expansão pelo método JIS A 5015/92 da amostra tratada 2.....   | 138        |
| 4.4.3     | <i>Expansão pelo método ASTM D 4792/00</i> .....   | 140        |
| 4.4.3.1   | Expansão pelo método ASTM D 4792/00 da amostra não tratada .....   | 140        |
| 4.4.3.2   | Expansão pelo método ASTM D 4792/00 - amostra tratada 2 .....  | 141        |
| 4.4.3.3   | Análise dos resultados da expansão pelo método ASTM D 4792/00 a partir dos<br>resultados de expansão obtidos nos 7 primeiros dias do método PTM-130/78 ..... | 142        |
| 4.5       | ENSAIOS ADICIONAIS .....   | 146        |
| 4.5.1     | <i>Permeabilidade a carga variável</i> .....   | 146        |
| 4.5.2     | <i>Índice de Suporte Califórnia - CBR</i> .....  | 147        |
| <b>5.</b> | <b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b> .....  | <b>149</b> |
| <b>6.</b> | <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | <b>154</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 - Pátio descoberto de estocagem de uma escória de aciaria.....   | 23 |
| Figura 1.2 - Expansão causada pela escória de aciaria utilizada no pavimento do estacionamento de um hospital da região metropolitana de Vitória, ES.....   | 25 |
| Figura 2.1 - Sequência de operação do conversor a oxigênio tipo LD ou BOF: (a) carregamento da sucata; (b) carregamento do ferro gusa líquido; (c) sopro de oxigênio; (d) vazamento do aço, e; (e) vazamento da escória de aciaria no pote de escória (ARAUJO, 1997; MACHADO, 2000) ..... | 30 |
| Figura 2.2 - Conversor a oxigênio tipo LD ou BOF, separação entre o aço líquido e a escória de aciaria líquida com tampão esférico flutuante (ARAUJO, 1997).....  | 30 |
| Figura 2.3 - Módulos de resiliência da EGC e de materiais granulares convencionais (ROHDE et al., 2003) .....   | 52 |
| Figura 2.4 - Módulo de resiliência para misturas solo-escória, solo-brita e solo puro (PARENTE et al., 2003) .....  | 53 |
| Figura 2.5 - Curva de compactação da escória de aciaria LD (MACHADO, 2000).....   | 54 |
| Figura 2.6 - Curva de compactação da escória de aciaria EAF (ROHDE, 2002) .....   | 55 |
| Figura 2.7 - Curvas de compactação da escória EGC estocadas por 4, 5 e 6 meses (ROHDE, 2002)...   | 55 |
| Figura 2.8 - Curvas de compactação da escória de aciaria, tentativas 1 e 2 (BRANCO, 2004).....  | 56 |
| Figura 2.9 - Curva de compactação “manipulada” da escória de aciaria, tentativa 3 (BRANCO, 2004) .....  | 57 |
| Figura 3.1 - Geração da escória de aciaria LD do estudo: (a) lançamento da escória de aciaria nas baias de resfriamento; (b) resfriamento da escória de aciaria com jato de água .....  | 62 |
| Figura 3.2 - Estocagem e processamento da escória de aciaria do estudo: (a) estocagem da escória de aciaria em pátio descoberto; (b) planta de britagem, separação magnética e granulométrica.....  | 63 |
| Figura 3.3 - Molhagem da escória de aciaria LD do estudo durante o tratamento utilizado.....  | 64 |
| Figura 3.4 - Revolvimento da escória de aciaria LD do estudo durante o tratamento utilizado .....   | 64 |
| Figura 3.5 - Formato do lote de escória de aciaria LD do estudo em 112 montes de descarregamento  | 66 |
| Figura 3.6 - Etapas da amostragem da escória de aciaria LD não tratada: (a) retirada da amostra parcial com pá; (b) retirada das amostras parciais em vários pontos dos montes de descarregamento .....   | 66 |
| Figura 3.7 - Resumo do procedimento de amostragem da amostra de escória de aciaria LD não tratada (SILVA et al., 2005).....   | 67 |
| Figura 3.8 - Etapas da amostragem da escória de aciaria LD tratada 1 e tratada 2: (a) retirada da amostra parcial; (b) formação da pilha cônica através das amostras parciais; (c) homogeneização e   |    |

|  |    |
|--|----|
| formação da pilha cônica; (d) quarreamento da pilha tronco-cônica; (e) retirada das partes opostas para colocação nos tonéis; (f) tonéis lacrados e identificados para serem enviados à UFES .....   | 68 |
| Figura 3.9 - Resumo do procedimento de amostragem das amostras de escória de aciaria LD tratada 1 e tratada 2 (SILVA et al., 2005) .....   | 69 |
| Figura 3.10 - Planta baixa sem escala das duas áreas de escória de aciaria LD, utilizados durante a coleta da amostra tratada 2, com um volume aproximado de 1400 m <sup>3</sup> .....   | 70 |
| Figura 3.11 - Esquema representativo das quadriculas sobre o setor 1 - 104 quadriculas .....   | 70 |
| Figura 3.12 - Esquema representativo das quadriculas sobre o setor 2 - 8 quadriculas .....   | 71 |
| Figura 3.13 - Redução da amostra de campo na UFES: (a) cinco montes de escória de aciaria LD por tonel; (b) retirada da escória do tonel com guincho; (c) retirada da escória com enxada; (d) divisão dos três tonéis em quinze pilhas .....   | 72 |
| Figura 3.14 - Procedimento de redução de amostra de campo das três amostras deste estudo (SILVA et al., 2005).....   | 72 |
| Figura 3.15 - Diferentes níveis de angulosidade das partículas (SOWERS; SOWERS, 1980) .....  | 73 |
| Figura 3.16 - Equipamentos elétricos utilizados na compactação e pesagem dos corpos-de-prova com escória de aciaria LD: (a) compactador eletro-mecânico; (b) balança eletrônica com capacidade de 50 kg.....   | 78 |
| Figura 3.17 - Aparelhagem necessária para se fazer a leitura da expansão.....  | 79 |
| Figura 3.18 - Procedimento de inversão do corpo-de-prova: (a) colocação de outra base no cilindro; (b) fixação da base no cilindro; (c) inversão do corpo-de-prova; (d) retirada do disco espaçador .....  | 80 |
| Figura 3.19 - Montagem e submersão do corpo-de-prova para o ensaio de expansão pelo método PTM-130/78: (a) instalação do prato perfurado com peso anelar; (b) instalação do tripé com extensômetro; (c) submersão do corpo-de-prova no banho-maria com água a 71°C.....              | 81 |
| Figura 3.20 - Banhos-maria elétricos utilizados para determinação da expansão das amostras de escória de aciaria LD do estudo: (a) com capacidade para 10 corpos-de-prova durante a realização do ensaio e sem a tampa; (b) com capacidade de 20 corpos-de-prova com as tampas ..... | 82 |
| Figura 3.21 - Estufa elétrica utilizada no ensaio de expansão pelo método PTM-130/78: (a) estufa com corpos-de-prova do ensaio (b) detalhe do corpo-de-prova com bandeja metálica durante o ensaio .....   | 83 |
| Figura 3.22 - Preparação do corpo-de-prova para o ensaio de permeabilidade: (a) colocação da areia sobre o material compactado; (b) leve compactação da areia .....  | 87 |
| Figura 4.1 - Resumo dos dados de temperatura no período de setembro de 2003 a agosto de 2004 .....   | 94 |
| Figura 4.2 - Pluviometria no período de setembro de 2003 a agosto de 2004 .....  | 94 |
| Figura 4.3 - Exemplo da avaliação da angulosidade da escória de aciaria LD estudada, escala em milímetros .....  | 96 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.4 - Curvas granulométricas das escórias de aciaria LD do estudo.....   | 97  |
| Figura 4.5 - Resultados dos ensaios de compactação com reuso de material, amostra tratada 1, energia do Proctor normal.....   | 104 |
| Figura 4.6 - Resultados dos ensaios de compactação sem reuso de material, amostra tratada 1, energia do Proctor normal.....   | 107 |
| Figura 4.7 - Resultados dos ensaios de compactação sem reuso de material, amostra não tratada, energia do Proctor normal.....   | 108 |
| Figura 4.8 - Resultados dos ensaios de compactação sem reuso de material, amostra não tratada, energia do Proctor modificado.....   | 109 |
| Figura 4.9 - Resultados dos ensaios de compactação utilizando os procedimentos com e sem reuso de material, amostra tratada 1, energia do Proctor normal.....   | 110 |
| Figura 4.10 - Resultados da regressão linear simples a partir dos resultados dos ensaios de compactação utilizando os procedimentos com e sem reuso de material, amostra tratada 1, energia do Proctor normal.....        | 111 |
| Figura 4.11 - Resultados dos ensaios de compactação utilizando as energias do Proctor normal e do Proctor modificado, sem reuso de material, amostra não tratada.....   | 112 |
| Figura 4.12 - Resultados da regressão linear simples a partir dos resultados dos ensaios de compactação utilizando as energias do Proctor normal e do Proctor modificado, sem reuso de material, amostra não tratada..... | 113 |
| Figura 4.13 - Resultados dos ensaios de compactação para as amostras não tratada e tratada 1, procedimento sem reuso de material, energia do Proctor normal.....  | 114 |
| Figura 4.14 - Resultados da regressão linear simples a partir dos resultados dos ensaios de compactação para as amostras não tratada e tratada 1, procedimento sem reuso de material, energia do Proctor normal.....      | 115 |
| Figura 4.15 - Resultados do ensaio de compactação da escória de aciaria LD deste estudo, de uma areia limpa e a curva de compactação de um solo arenoso laterítico.....   | 116 |
| Figura 4.16 - Resultados da expansão acumulada dos corpos-de-prova do CP 4 ao CP 11 ensaiados com a temperatura de 80°C, amostra tratada 1, energia do Proctor normal, método PTM-130/78.....                             | 118 |
| Figura 4.17 - Resultados da expansão acumulada do CP 1 ao CP 3 e dos CP 13 e CP 14, amostra tratada 1, energia do Proctor normal, método PTM-130/78.....  | 118 |
| Figura 4.18 - Resultados da expansão acumulada do CP 15 ao CP 22, amostra tratada 1, energia do Proctor normal, método PTM-130/78.....  | 119 |
| Figura 4.19 - Resultados da expansão acumulada do CP 23 ao CP 28, amostra tratada 1, energia do Proctor normal, método PTM-130/78.....  | 119 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.20 - Inclinação da haste do prato perfurado no topo do corpo-de-prova 17 (CP 17) durante o ensaio de expansão da amostra tratada 1 pelo método PTM-130/78, energia do Proctor normal.....      | 120 |
| Figura 4.21 - Ponto de ocorrência da expansão excessiva no topo do corpo-de-prova 17 (CP 17) durante o ensaio de expansão da amostra tratada 1 pelo método PTM-130/78, energia do Proctor normal .....  | 120 |
| Figura 4.22 - Material que pode ter causado a expansão excessiva do corpo-de-prova 17 (CP 17) durante o ensaio de expansão da amostra tratada 1 pelo método PTM-130/78, energia do Proctor normal ..... | 120 |
| Figura 4.23 - Resultados da expansão acumulada do CP 29 ao CP 36 (ensaio de compactação 11), amostra não tratada, energia do Proctor normal, método PTM-130/78 .....                                    | 122 |
| Figura 4.24 - Resultados da expansão acumulada do CP 37 ao CP 43 (ensaio de compactação 12), amostra não tratada, energia do Proctor normal, método PTM-130/78 .....                                    | 123 |
| Figura 4.25 - Resultados da expansão acumulada do CP 57 ao CP 62 (ensaio de compactação 14), amostra não tratada, energia do Proctor modificado, método PTM-130/78 .....                                | 123 |
| Figura 4.26 - Resultados da expansão acumulada do CP 64 ao CP 70 (ensaio de compactação 16), amostra não tratada, energia do Proctor modificado, método PTM-130/78 .....                                | 124 |
| Figura 4.27 - Resultados da expansão acumulada do CP 71 ao CP 77 (ensaio de compactação 15), amostra não tratada, energia do Proctor modificado, método PTM-130/78 .....                                | 124 |
| Figura 4.28 - Resultados da expansão acumulada do CP 90 ao CP 97, amostra tratada 2, energia do Proctor normal, método PTM-130/78 .....   | 126 |
| Figura 4.29 - Resultados da expansão acumulada do CP 98 ao CP 105, amostra tratada 2, energia do Proctor normal, método PTM-130/78 .....  | 126 |
| Figura 4.30 - Resultados da expansão acumulada pelo método PTM-130/78 utilizando as temperaturas de 71°C e 80°C para a amostra de escória de aciaria LD tratada 1.....                                  | 128 |
| Figura 4.31 - Gráfico de erros tipo Box Plot para expansão obtida pelo método PTM-130/78 utilizando as temperaturas de 71°C e 80°C para a amostra de escória de aciaria LD tratada 1.....               | 129 |
| Figura 4.32 - Resultados da expansão acumulada pelo método PTM-130/78 utilizando as energias do Proctor normal e do Proctor modificado para a amostra de escória de aciaria LD não tratada.....         | 130 |
| Figura 4.33 - Resultados da expansão acumulada para as amostras tratada 1 e não tratada compactadas com energia do Proctor normal, método PTM-130/78.....   | 135 |
| Figura 4.34 - Resultados da expansão acumulada para as amostras tratada 2 e não tratada compactadas com energia do Proctor normal, método PTM-130/78.....   | 136 |
| Figura 4.35 - Resultados da expansão acumulada do CP 141 ao CP 145, amostra não tratada, método JIS A 5015/92.....  | 138 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.36 - Resultados da expansão acumulada do CP 151 ao CP 155, amostra tratada 2, método JIS A 5015/92.....   | 138 |
| Figura 4.37 - Resultados da expansão acumulada do CP 114 ao CP 118, amostra não tratada, método ASTM D 4792/00.....  | 140 |
| Figura 4.38 - Resultados da expansão acumulada do CP 126 ao CP 130, amostra tratada 2, método ASTM D 4792/00.....  | 141 |
| Figura 4.39 - Resumo dos resultados de CBR do CP 1 ao CP 20 para as amostras de escória de aciaria LD não tratada e tratada 2 compactados com energia do Proctor normal e do Proctor modificado .... | 148 |



## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 2.1 - Composição mineralógica típica das escórias de aciaria LD (MACHADO, 2000).....  | 32 |
| Quadro 2.2 - Composições químicas da escória de aciaria LD segundo diferentes autores, valores em porcentagem.....   | 33 |
| Quadro 2.3 - Composição química típica da escória de aciaria LD nacional, valores em porcentagem (IBS, 1999).....  | 33 |
| Quadro 2.4 - Características de alguns compostos químicos presentes na escória de aciaria (WEAST, 1971; MACHADO, 2000).....  | 36 |
| Quadro 2.5 - Resultados de ensaios de resistência à compressão simples da mistura de 95% de escória de aciaria e 5% de cinza volante (ASA, 2002).....  | 38 |
| Quadro 2.6 - Resultados de ensaios de resistência à compressão simples da mistura de 70% de escória de aciaria, 25% de escória granulada de alto-forno e 5% de cinza volante (ASA, 2002).....  | 39 |
| Quadro 2.7 - Resultados de ensaios de resistência à compressão simples da mistura de escória de aciaria, calcário em pó e cinza volante (ASA, 2002).....   | 40 |
| Quadro 2.8 - Faixa granulométrica das misturas de escórias em % retida (NAGAO et al., 1987).....   | 40 |
| Quadro 2.9 - Resultados de ensaios de laboratório de misturas utilizando diferentes proporções e granulometrias de uma escória de aciaria (EALD) com escória bruta de alto-forno (EBAF) e escória granulada de alto-forno (EGAF) (NAGAO et al., 1987)..... | 41 |
| Quadro 2.10 - Variação da resistência à compressão simples (MPa) com o tempo de diferentes misturas com escória de aciaria (HEATON, 1996).....   | 41 |
| Quadro 2.11 - Faixas granulométricas do DNIT para materiais de bases granulares (DNIT-ES 303/97).....  | 45 |
| Quadro 2.12 - Valores de massa específica dos grãos ( $\text{kg/m}^3$ ) de alguns autores para algumas rochas e escórias de aciaria LD e forno elétrico (EAF).....   | 47 |
| Quadro 2.13 - Valores de massa específica no estado solto ( $\text{kg/m}^3$ ) de alguns autores para basalto e escórias de aciaria LD e forno elétrico (EAF).....  | 48 |
| Quadro 2.14 - Valores de absorção (%) de alguns autores para algumas rochas e escórias de aciaria LD e Forno elétrico (EAF).....   | 48 |
| Quadro 2.15 - Valores de abrasão Los Angeles (%) segundo diferentes autores para algumas rochas e escórias de aciaria LD e Forno elétrico (EAF).....   | 49 |
| Quadro 2.16 - Ensaios de materiais requeridos pelas agências chave no uso de escória de aciaria (FARRAND; EMERY, 1995).....  | 58 |
| Quadro 3.1 - Identificação, geração e amostragem das amostras de escória de aciaria LD do estudo ..  | 64 |

|   |     |
|---|-----|
| Quadro 3.2 - Métodos de ensaios de caracterização química, física e ambiental com suas respectivas normas .....   | 73  |
| Quadro 3.3 - Fatores e variáveis estudadas para o ensaio de compactação .....   | 76  |
| Quadro 3.4 - Fatores e variáveis estudadas para o ensaio de expansão PTM-130/78.....  | 84  |
| Quadro 3.5 - Distribuição granulométrica da escória de aciaria exigida pelo método JIS A 5015/92...   | 85  |
| Quadro 3.6 - Fatores e variáveis estudadas para o ensaio de permeabilidade.....   | 87  |
| Quadro 3.7 - Fatores e variáveis estudadas para o ensaio de índice de suporte Califórnia - CBR.....   | 88  |
| Quadro 4.1 - Resumo dos ensaios realizados e o quantitativo desses ensaios para as amostras de escória de aciaria LD do estudo .....  | 92  |
| Quadro 4.2 - Resumo dos dados de temperatura e pluviometria no período de exposição das três amostras de escória de aciaria LD do estudo .....  | 95  |
| Quadro 4.3 - Resultados de análise química das amostras não tratada e tratada 2 da escória de aciaria LD do estudo (SILVA et al., 2005).....  | 95  |
| Quadro 4.4 - Características granulométricas das amostras de escória de aciaria do estudo segundo a NBR 6502 da ABNT .....  | 97  |
| Quadro 4.5 - Dados para o cálculo da massa específica das amostras de escória de aciaria LD analisadas .....  | 99  |
| Quadro 4.6 - Massa unitária das amostras analisadas de escória de aciaria LD do estudo (SILVA et al., 2005) .....   | 100 |
| Quadro 4.7 - Absorção das amostras analisadas de escória de aciaria LD do estudo (SILVA et al., 2005) .....   | 100 |
| Quadro 4.8 - Abrasão <i>Los Angeles</i> das amostras analisadas de escória de aciaria LD do estudo (SILVA et al., 2005).....  | 101 |
| Quadro 4.9 - Análise química no extrato lixiviado das amostras de escória de aciaria: não-tratada, tratada 1 e tratada 2 (SILVA et al., 2005) .....   | 101 |
| Quadro 4.10 - Análise química no extrato solubilizado das amostras de escória de aciaria: não-tratada, tratada 1 e tratada 2 (SILVA et al., 2005) .....   | 102 |
| Quadro 4.11 - Variação da umidade ao longo da altura dos corpos-de-prova que sofreram drenagem durante o ensaio de compactação, procedimento com reuso de material, amostra tratada 1, energia do Proctor normal..... | 103 |
| Quadro 4.12 - Variação da umidade ao longo da altura dos corpos-de-prova que sofreram drenagem durante o ensaio de compactação, procedimento sem reuso de material, amostra tratada 1, energia do Proctor normal..... | 106 |

|  |     |
|--|-----|
| Quadro 4.13 - Variação da umidade ao longo da altura dos corpos-de-prova que sofreram drenagem durante o ensaio de compactação, procedimento sem reuso de material, amostra não tratada, energia do Proctor normal.....                        | 106 |
| Quadro 4.14 - Variação da umidade ao longo da altura dos corpos-de-prova que sofreram drenagem durante o ensaio de compactação, procedimento sem reuso de material, amostra não tratada, energia do Proctor modificado.....                    | 107 |
| Quadro 4.15 - Resumo dos resultados de expansão pelo método PTM-130/78, amostra tratada 1, energia do Proctor normal.....  | 121 |
| Quadro 4.16 - Resumo dos resultados de expansão pelo método PTM-130/78, amostra não tratada, realizados à temperatura de 71°C.....   | 125 |
| Quadro 4.17 - Resumo dos resultados do ensaio de expansão pelo método PTM-130/78, amostra tratada 2, energia do Proctor normal e temperatura de 71°C.....  | 127 |
| Quadro 4.18 - Resumo dos resultados do ensaio de expansão pelo método JIS A 5015/92, amostras não tratada e tratada 2.....   | 139 |
| Quadro 4.19 - Resumo dos dados referentes aos resultados do ensaio de expansão pelo método ASTM D 4792/00, amostras não tratada e tratada 2.....   | 142 |
| Quadro 4.20 - Resumo dos resultados de expansão do método ASTM D 4792/00 realizado à temperatura de 71°C a partir dos resultados da expansão obtidos nos 7 primeiros dias do método PTM-130/78, amostra não tratada.....                       | 144 |
| Quadro 4.21 - Resumo dos resultados de expansão do método ASTM D 4792/00 a partir dos resultados da expansão obtidos nos 7 primeiros dias do método PTM-130/78, energia do Proctor normal, amostra tratada 1.....                              | 145 |
| Quadro 4.22 - Resumo dos dados de expansão do método ASTM D 4792/00 a partir dos resultados da expansão obtidos nos 7 primeiros dias do método PTM-130/78, energia do Proctor normal, amostra tratada 2 e realizado à temperatura de 71°C..... | 145 |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 4.1 - Dados de temperatura no período de setembro de 2003 a agosto de 2004: mínima, máxima, média e desvio padrão .....   | 93  |
| Tabela 4.2 - Estatística descritiva da variável expansão por temperatura na amostra tratada 1, método PTM-130/78 .....   | 128 |
| Tabela 4.3 - Estatística descritiva da variável expansão por energia de compactação na amostra não tratada, método PTM-130/78 .....  | 130 |
| Tabela 4.4 - Correlação de Pearson da umidade de compactação com a expansão pelo método PTM-130/78 para as amostras de escória de aciaria não tratada e tratada 1 .....  | 131 |
| Tabela 4.5 - Número utilizado e recalculado de corpos-de-prova para o ensaio de expansão pelo método PTM-130/78 .....  | 134 |
| Tabela 4.6 - Estatística descritiva da expansão pelo método PTM-130/78 das amostras não tratada e tratada 2 .....  | 135 |
| Tabela 4.7 - Estatística descritiva da expansão pelo método PTM-130/78 para as amostras de escória de aciaria LD analisadas neste estudo .....   | 137 |
| Tabela 4.8 - Estatística descritiva da expansão obtida pelo método JIS A 5015/92 para as amostras não tratada e tratada 2 .....  | 140 |
| Tabela 4.9 - Estatística descritiva da expansão obtida pelo método ASTM D 4792/00 para as amostras não tratada e tratada 2 .....   | 142 |
| Tabela 4.10 - Resumo dos resultados do ensaio de permeabilidade do CP 1 ao CP 6 para amostras de escória de aciaria LD não tratada e tratada 2, compactadas com as energias do Proctor normal e proctor modificado ..... | 146 |
| Tabela 4.11 - Resultados dos ensaios de Índice Suporte Califórnia (CBR) para as amostras de escória de aciaria LD não tratada e tratada 2 .....  | 147 |

## LISTA DE SIGLAS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland  
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ANOVA - ANalysis Of VAriance  
AS - Australian Standard  
ASA - Australian Slag Association  
ASTM - American Society for Testing and Materials  
BFS - Blast Furnace Slag  
BOF - Blast Oxygen Furnace  
BOS - Basic Oxigen Steelmaking  
BS - British Standard  
CBR - California Bearing Ratio  
CP - Corpo-de-prova  
CPD - Corpo-de-prova drenado  
CSN - Companhia Siderúrgica Nacional  
CST - Companhia Siderúrgica de Tubarão  
DER - Departamento de Estradas de Rodagem  
DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes  
EAF - Eletric Arc Furnace  
EGC - Escória Granulometricamente Corrigida  
EM - Especificação de Materiais  
EUA - Estados Unidos da América  
FA - Fly Ash  
GP - Gravel Poor Graded  
GS - Granulated Slag  
HTRB - Highway and Transportaion Research Board  
IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia  
IEMA – Instituto Estadual de Meio Ambiente  
ISC - Índice de Suporte Califórnia  
JIS - Japanese Industrial Standard  
LD - Linz e Donawitz  
ME - Método de Ensaio  
MG - Minas Gerais  
NBR - Norma Brasileira Registrada  
NM - Norma do Mercosul  
NP - Não Plástico  
NSA - National Slag Association  
OH - Open Hearth  
prEN - European Standard Project  
PRO - Procedimento  
PTM - Pennsylvania Testing Method  
SUC - Sistemas Unificado de Classificação  
SW - Sand Well Graded  
TFHR - Turner-Fairbank Highway Research  
UFES - Universidade Federal do Espírito Santo

# ESTUDO EXPERIMENTAL DE COMPACTAÇÃO E EXPANSÃO DE UMA ESCÓRIA DE ACIARIA LD PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO

Carlos Olympo Lima Raposo<sup>1</sup>

## RESUMO

A escória de aciaria LD é um subproduto gerado durante o processo de fabricação do aço em siderúrgicas que utilizam conversores a oxigênio. A utilização desse material em bases e sub-bases de pavimentos pode ser vantajosa em termos técnico, econômico e ambiental, comparados a agregados convencionais. Porém, problemas como sua natureza expansiva e a deficiência de critérios técnicos para sua aceitação têm limitado a utilização das escórias de aciaria em pavimentação. A expansão das escórias de aciaria é provocada principalmente pela hidratação dos óxidos de cálcio e magnésio livres presentes nesse material.

O objetivo desta dissertação é estudar experimentalmente a compactação e a expansão de uma escória de aciaria LD, e assim contribuir para a definição de critérios técnicos de avaliação da expansão desse material visando a sua utilização em bases e sub-bases de pavimentos. A escória de aciaria LD deste estudo é proveniente de uma siderúrgica da região metropolitana de Vitória, Espírito Santo. Neste trabalho, são apresentados ensaios laboratoriais de caracterização química, física e ambiental, ensaios de compactação com energias do Proctor normal e do Proctor modificado e ensaios de expansão. Os três métodos de ensaio de expansão utilizados foram os métodos: PTM-130/78, JIS A 5015/92 e ASTM D 4792/00.

Os resultados dos ensaios de compactação demonstraram que as amostras de escória de aciaria LD estudadas não apresentaram umidade ótima de compactação definida, tendo um comportamento típico de solos e materiais granulares. Análises estatísticas realizadas nos resultados dos ensaios de compactação mostraram ausência de diferenças estatisticamente significantes entre os dois procedimentos utilizados (com e sem reuso de material), entre as duas energias de compactação utilizadas (Proctor normal e Proctor modificado) e entre as duas amostras utilizadas (com e sem tratamento de redução de expansão).

As análises estatísticas dos resultados dos ensaios de expansão obtidos pelo método PTM-130/78, nas amostras de escória de aciaria estudadas, demonstraram que: a umidade de compactação não teve influência estatisticamente significativa nos resultados de expansão; a influência da temperatura nos resultados de expansão foi altamente significativa; e a influência da energia de compactação nos resultados de expansão foi estatisticamente significativa, sendo que a energia do Proctor modificado provocou menores valores de expansão em relação à energia do Proctor normal.

Neste trabalho, também se propõe um critério técnico para aceitação dos lotes de escória de aciaria LD segundo o requisito expansão utilizando o método PTM-130/78. Esse critério engloba o procedimento de amostragem, uma metodologia estatisticamente significativa para o cálculo do número mínimo de corpos-de-prova e o limite máximo de 3% de expansão determinada pelo método PTM-130/78.

Palavras-chave: escória de aciaria LD; compactação; expansão; ensaios de laboratório; bases e sub-bases; pavimentação.

---

<sup>1</sup> Eng. Civil, Mestre Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil/UFES, e-mail: carlosolympo@yahoo.com.br

# EXPERIMENTAL EVALUATION OF COMPACTION AND EXPANSIBILITY OF THE STEEL SLAG FOR USE IN PAVEMENTS

Carlos Olympo Lima Raposo<sup>2</sup>

## ABSTRACT

The steel slag or BOF (Basic Oxygen Furnace) slag is a by-product generated in integrated steel plants. The use of this material in bases and sub-bases of pavements may present technical, economical and environmental advantages compared to natural aggregates. However, problems, like the expansibility and the deficiency of technical criteria for its acceptance, limit the use of steel slags in pavements. The expansibility of steel slags is mainly generated by hydration of free calcium and magnesium oxides (CaO and MgO).

The purpose of this study is to evaluate compaction and expansibility of a steel slag using laboratory tests. And then contributing for definition of technical criteria of expansibility evaluation of this material for use in bases and sub-bases of pavements. The steel slag of this study is originated in a integrated steel plant located in Vitória, Espírito Santo, Brazil. In this work, the laboratory compaction tests were conducted using standard and modified effort, and for the expansibility tests three methods were used: PTM-130/78, JIS 5015/92 and ASTM D 4792/00.

The compaction tests of the steel slag did not yield optimum water content, showing the same characteristic of granular materials. Statistical analysis of compaction tests did not show significant differences between two procedures (with and without reuse of material), between two efforts of compaction (standard and modified effort) and between two different samples (with and without treatment for expansion reduction).

The statistical analysis of expansibility tests using method PTM-130/78 show that: The water content of compaction was not statistically significant in the expansion results; the influence of the temperature in the expansion results was statistically significant; and the influence of the effort of compaction in the expansion results was statistically significant.

Also a technical criterion for acceptance of lots of steel slag is proposed here, using PTM-130/78 test method. The criterion includes sampling procedure, a statistical significant methodology to calculate the minimum number of specimens and the maximum limit of 3% expansion using PTM-130/78 test method.

Keywords: steel slag; compaction; expansibility; laboratory tests; base and sub-base; pavement.

---

<sup>2</sup> Civil Engineer, M.Sc. of PPGEC/UFES, e-mail: carlosolympo@yahoo.com.br

## 1. INTRODUÇÃO

É crescente a demanda por agregados para o uso em obras de engenharia e em particular para obras rodoviárias. A carência de agregados tradicionais, aliada às exigências e limitações ambientais impostas na construção de pavimentos, tornou imperativa a investigação cuidadosa de materiais alternativos, procurando-se com isso soluções técnicas mais econômicas e que minimizem os impactos ao meio ambiente (ROHDE et al., 2003).

Juntamente com a carência de agregados para obras rodoviárias, grandes quantidades de resíduos<sup>3</sup> são gerados pelas indústrias siderúrgicas, apesar dos indiscutíveis benefícios trazidos à sociedade global. Em todo o mundo, as escórias de alto-forno e as escórias de aciaria são os resíduos sólidos gerados em maior quantidade durante a fabricação do aço, sendo aproximadamente 200 milhões de toneladas de escórias siderúrgicas geradas por ano (MASUERO et al., 1998; IBS, 2002; PENA, 2004).

No Brasil, oitavo maior produtor de aço bruto do mundo, o parque siderúrgico é composto por 26 usinas que tiveram um faturamento, em 2004, de mais de 17 bilhões de dólares e que geraram aproximadamente 22 milhões de toneladas de resíduos sólidos, considerando uma média de 700 kg de resíduos por tonelada de aço produzido (PEREIRA, 1995; MASUERO et al., 1998; IBS, 2002; CST, 2003a; IBS, 2005).

Diferentemente das escórias de alto-forno, que são utilizadas como matéria-prima para a fabricação de cimento, as escórias de aciaria têm seu emprego limitado como material de construção civil, não tendo destinação bem definida e às vezes se acumulando nos pátios de estocagem (Figura 1.1).

Tanto nas usinas integradas, que usam o conversor a oxigênio, como nas usinas semi-integradas, que usam forno de arco elétrico, são geradas de 70 a 170 kg de escória de aciaria por tonelada de aço produzido. Considerando a média de 120 kg de escória de aciaria por tonelada de aço, estima-se que em 2004 tenham sido geradas no Brasil cerca de 4 milhões de toneladas de escória de aciaria, para uma produção de 32,9 milhões de toneladas de aço (LITTLE; SETEPLA, 1999; IBS, 2005).

---

<sup>3</sup> Resíduo são todos os produtos gerados dentro do processo de produção ou consumo de um outro produto, independente de seu valor comercial (JOHN, 1996).





**Figura 1.1 - Pátio descoberto de estocagem de uma escória de aciaria**

Uma siderúrgica brasileira que usa conversor a oxigênio, ou processo LD, na produção do aço situa-se na região metropolitana de Vitória, Espírito Santo, Brasil, com uma produção anual em torno de 5 milhões de toneladas de aço e cerca de 470 mil toneladas de escória de aciaria LD. Por esta razão, o estudo e a ampliação do mercado de escória de aciaria nesta região torna-se interessante em termos técnico, econômico e ambiental.

As características físicas da escória de aciaria podem possibilitar a formação, após compactação, de um material com uma forte estrutura intertravada, com uma elevada resistência à deformação (JONES et al., 1996). Por essas características, as sub-bases e/ou bases de pavimentos construídas com escória de aciaria podem ter propriedades mecânicas melhores que as construídas com agregados convencionais.

As vantagens econômicas da utilização das escórias de aciaria como agregados para estradas são resultantes das possibilidades de implantação de camadas mais finas de bases e sub-bases para a mesma resistência à carga/compressão e durabilidade, em relação à aplicação de materiais convencionais, como areia e brita. Evidentemente, o custo do transporte até a obra é um fator determinante na escolha do agregado pelo construtor (IBS, 1999).

Sob a visão ambiental, a reciclagem ou a utilização de subprodutos traz benefícios representados pela redução das agressões ao meio ambiente, como as causadas pela deposição de resíduos em aterros e pela diminuição da extração predatória de recursos naturais, como a exploração de jazidas de agregados (MACHADO, 2000; ROHDE, 2002).

Além disso, a ampliação do mercado das escórias de aciaria interessa tanto às siderúrgicas quanto à sociedade em geral. As siderúrgicas têm a possibilidade de agregar valor ao seu subproduto, demonstrando compromisso social e com o meio ambiente. Já a sociedade tem a possibilidade de ganhos ambientais e econômicos (PENA, 2004).

Entretanto, a principal limitação no uso da escória de aciaria pode ser a expansão ou instabilidade volumétrica, que em valores elevados é uma característica indesejável para a utilização em camadas confinadas de pavimentos rodoviários. Essa expansão, entre outros mecanismos, é provocada pela hidratação dos óxidos de magnésio e cálcio livres quando em contato com a água (MACHADO, 2000; ROHDE, 2002; PENA, 2004).

Portanto, para viabilizar a aplicação da escória de aciaria em pavimentos rodoviários, pode ser necessário um tratamento para estabilizar a expansão a níveis aceitáveis, transformando os óxidos de magnésio e cálcio livres em compostos estáveis.

### **1.1 Justificativa**

Dentre os campos de aplicação da escória de aciaria, a pavimentação rodoviária é uma das mais importantes, em especial quando se considera que as rodovias brasileiras são responsáveis por, aproximadamente, 63% das cargas transportadas. Pode-se destacar que toda a rede pavimentada nacional conta com aproximadamente 150 mil quilômetros, perfazendo apenas 9% da rede total (pavimentada e não pavimentada). Supondo-se que uma parcela dessas rodovias não pavimentadas justificasse os serviços de pavimentação, seja pelo aumento do número de veículos, como pela importância regional ou estratégica, algumas centenas de milhares de quilômetros necessitariam ser pavimentados. Além disso, devido à escassez de recursos financeiros, quando se considera a totalidade de obras viárias a serem recuperadas ou implantadas, torna-se necessário empregar esforços para se utilizar materiais alternativos na construção rodoviária (BALTAZAR, 2001).

É nesse contexto que a escória de aciaria vem sendo utilizada na construção de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários, porém, problemas como sua natureza expansiva, a deficiência de critérios técnicos para detectar sua estabilização e práticas inadequadas do uso do material têm causado problemas de desempenho, contribuindo para o aumento da discriminação e da desconfiança da sociedade quanto à utilização das escórias de aciaria (PENA, 2004). Na Figura 1.2, pode-se observar uma dessas práticas inadequadas, onde a escória de aciaria foi utilizada como base e sub-base sem a correta avaliação da expansão, causando uma ruptura do revestimento asfáltico em alguns pontos do pavimento.

Assim, uma possível ampliação do mercado para a utilização da escória de aciaria, na construção de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários, passa pela definição de critérios técnicos e ensaios para a aceitação de lotes de escória de aciaria que foram submetidos a tratamentos, de modo a contornar o problema da expansão. Visando essa ampliação do

mercado de escória de aciaria, as siderúrgicas e as empresas interessadas devem, em ação conjugada, promover pesquisas para a definição de critérios técnicos de aceitação da escória de aciaria e valorizar o material, através da garantia de qualidade dos tratamentos e de critérios adequados de avaliação da expansão.



**Figura 1.2 - Expansão causada pela escória de aciaria utilizada no pavimento do estacionamento de um hospital da região metropolitana de Vitória, ES**

Para se avaliar o problema da expansão, têm sido desenvolvidos e adotados métodos experimentais de determinação da expansão das escórias de aciaria. Esses métodos são classificados de acordo com a aplicação da escória de aciaria, sendo usado um corpo-de-prova com cimento quando adicionada ao concreto e um corpo-de-prova<sup>4</sup> compactado quando utilizada em estradas (MACHADO, 2000). No entanto, de acordo com Emery (1978), muitos desses métodos têm se mostrado demorados, custosos e de difícil execução. Entre esses ensaios de expansão, podem-se destacar os ensaios que utilizam corpos-de-prova compactados e imersos em água quente, que são utilizados para avaliar a expansão das escórias de aciaria usadas em bases e sub-bases de pavimentos, que serão o enfoque desta pesquisa. Os métodos de ensaio de expansão, de corpos-de-prova compactados, encontrados na bibliografia foram os métodos PTM-130/78, JIS A 5015/92 e ASTM D 4792/00, desenvolvidos nos Estados Unidos e no Japão.

---

<sup>4</sup> A palavra corpo-de-prova será sempre definida neste estudo como a unidade de repetição dos ensaios de compactação, de permeabilidade, de índice de suporte Califórnia e de expansão.

Devido ao método de ensaio de expansão PTM-130/78 já ser utilizado pela siderúrgica em estudo e ser o método de ensaio especificado pelas normas rodoviárias brasileiras DNIT-PRO 263/94 e DNIT-EM 262/94<sup>5</sup>, foi realizado um estudo mais aprofundado desse método de ensaio. Além disso, esse ensaio é citado e utilizado na literatura internacional e nacional por Emery (1984), Kandhal e Hoffman (1997), Baltazar (2001), Nascimento (2003) e Branco (2004).

Além do estudo da expansão, fez-se necessário investigar as características de compactação da escória de aciaria LD utilizada neste estudo, pois os três métodos de ensaio de expansão encontrados na bibliografia, PTM-130/78, JIS A 5015/92 e ASTM D 4792/00, estabelecem que os corpos-de-prova devam ser compactados na umidade ótima obtida a partir de ensaio de compactação. Este estudo, também servirá para um melhor entendimento das características de compactação da escória de aciaria LD, visto que a compactação é fundamental em geotecnia e na construção de bases e sub-bases de pavimentos.

Nesse contexto, a pesquisa aqui relatada tem por objetivo estudar experimentalmente as características de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD tratada por molhagem e revolvimento diário, contribuindo para a definição de critérios técnicos de avaliação da expansão da escória de aciaria para utilização em bases e sub-bases de pavimentos rodoviários, sendo que este estudo experimental foi realizado a partir de três amostras, da mesma escória de aciaria LD, submetidas a diferentes períodos de tratamento.

Cabe esclarecer que este trabalho faz parte de um projeto multidisciplinar que tem por objetivo a avaliação de custo, avaliação ambiental e avaliação da resistência e durabilidade do pavimento construído com escória de aciaria tratada. Esse projeto é chamado de PAVIAMB, foi firmado a partir de um convênio entre CST/FINEP/UFES, e conta com a participação de pesquisadores de diversas áreas reunidos no Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas (NEXES), do Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção (LEMAC), do Laboratório de Caracterização de Resíduos (LACAR) e do Laboratório de Mecânica dos Solos (LAMES).

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar experimentalmente as características de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação através da realização de ensaios de laboratório.

---

<sup>5</sup> Normas técnicas específicas de escórias de aciaria para pavimentos rodoviários.

Como objetivos específicos, citam-se:

- realizar revisão bibliográfica sobre a escória de aciaria, suas características e utilização em bases e sub-bases de estradas;
- levantar informações sobre as características químicas, ambientais, físicas e mecânicas da escória de aciaria utilizada no estudo através de ensaios de laboratório;
- estudar os fatores que afetam o ensaio de compactação (umidade ótima, procedimento de ensaio, energia de compactação) na escória de aciaria estudada;
- estudar os fatores que afetam o ensaio de expansão (temperatura, umidade de compactação, energia de compactação) na escória de aciaria em estudo através do método PTM-130/78, assim como indicar um critério de aceitação da expansão deste método; e
- levantar dados de expansão da escória de aciaria em estudo através dos métodos JIS A 5015/92 e ASTM D 4792/00.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

Neste primeiro capítulo, introduziu-se a pesquisa, apresentado a justificativa do trabalho e os seus objetivos.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica que expõe os processos de geração da escória de aciaria, buscando também informar sobre o fenômeno da expansão da escória de aciaria LD, bem como a estabilização dessa expansão. Apresenta-se ainda uma revisão sobre as características físicas e mecânicas, características de compactação e características de expansão das escórias de aciaria, além dos métodos de ensaio de determinação da expansão estudados.

No capítulo 3 são apresentados os métodos utilizados e o planejamento experimental estatístico. Esse capítulo contém, também, a descrição da escória de aciaria utilizada no estudo, incluindo os processamentos, como: a produção, o tratamento, a amostragem e a preparação das amostras para os ensaios realizados neste estudo.

No capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de caracterização, compactação, expansão e complementares realizados nas amostras da escória de aciaria LD deste estudo com vistas à utilização em bases e sub-bases de pavimentos.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas a partir desta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

No capítulo 6 são listadas as referências bibliográficas utilizadas neste estudo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A escória de aciaria - processos de produção

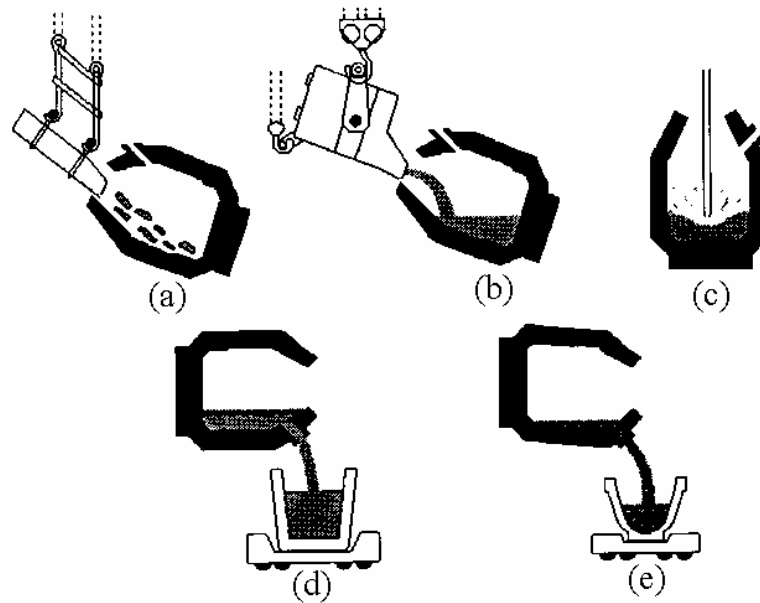
Os diferentes processos utilizados na produção, ou refino, do aço influenciam a composição química e as demais propriedades físico-químicas da escória de aciaria. Os três processos de produção existentes são caracterizados pelo emprego de diferentes fornos de refino: o conversor a oxigênio ou LD (Linz e Donawitz<sup>6</sup>) ou BOF (*Basic Oxigen Furnace*) ou BOS (*Basic Oxigen Steelmaking*), o forno de arco elétrico ou EAF (*Electric Arc Furnace*) e o Siemens-Martin ou OH (*Open Heart*), sendo que a utilização deste último processo está em declínio devido à baixa produtividade e, portanto, não será estudado (MACHADO, 2000; ROHDE, 2002; PENA, 2004).

O processo de refino em conversores a oxigênio, ou processo LD, transforma o ferro gusa misturado com sucata de ferro em aço, reduzindo os teores de carbono do ferro gusa de 4% para 0,1%, e também os teores de outros elementos como silício e fósforo. Nesse processo (Figura 2.1), com o conversor inclinado, a sucata é carregada por uma calha ou por um vagão-basculador, seguindo-se o ferro gusa líquido, em temperaturas de 1300 a 1450°C. Com o conversor colocado na posição vertical, introduz-se uma lança de oxigênio gasoso a alta pressão, onde ocorre inicialmente a oxidação do carbono, do fósforo e do silício em preferência ao ferro. Após fusão completa do metal no conversor, esses óxidos formados reagem com a cal (CaO), que é adicionada por meio de um silo montado sobre o conversor, formando a escória de aciaria. Neste processo, as reações exotérmicas de oxidação provêm energia necessária para manter ou elevar a temperatura do aço líquido (JIS A 5015, 1992; WITTENBORN; GREEN, 1998; KUEHN et al., 2000; ROBINSON, 2000; MACHADO, 2000; JUCKES, 2003; PENA, 2004).

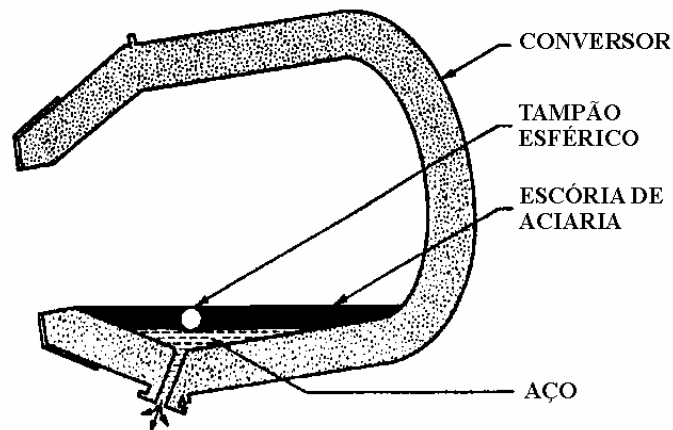
Ao final do processo de refino, o conversor é basculado para a posição inclinada, a fim de separar a escória de aciaria do aço líquido, devido às diferenças de densidade. No final do vazamento do aço, a escória de aciaria é retida no conversor com o “tampão flutuante”, feito em material refratário (Figura 2.2), com densidade maior que a da escória e menor que a do aço líquido, de modo a vedar o furo de corrida quando a escória começar a vazar. A etapa final é vazar a escória de aciaria, basculando completamente o conversor sobre o pote de escória (JIS A 5015, 1992; KNELLER et al., 1994; ARAUJO, 1997; MACHADO, 2000).

---

<sup>6</sup> Aciarias austríacas que utilizaram pela primeira vez este processo em escala industrial no mundo.



**Figura 2.1 - Seqüência de operação do conversor a oxigênio tipo LD ou BOF: (a) carregamento da sucata; (b) carregamento do ferro gusa líquido; (c) sopro de oxigênio; (d) vazamento do aço, e; (e) vazamento da escória de aciaria no pote de escória (ARAUJO, 1997; MACHADO, 2000)**



**Figura 2.2 - Conversor a oxigênio tipo LD ou BOF, separação entre o aço líquido e a escória de aciaria líquida com tampão esférico flutuante (ARAUJO, 1997)**

Depois de despejada no pote de escória, a escória de aciaria líquida ou parcialmente solidificada é conduzida a um pátio e lançada em baias, onde é resfriada, seja ao ar e/ou por aspersão de água, e posteriormente é transportada para um pátio de deposição. Para sua utilização em diferentes aplicações, a escória de aciaria é britada e separada de acordo com diferentes faixas granulométricas (JIS A 5015, 1992; KNELLER et al., 1994; ARAUJO, 1997; MACHADO, 2000).

No processo de produção do aço, além da cal virgem (CaO), adiciona-se também a dolomita (CaCO<sub>3</sub>.MgCO<sub>3</sub>) que tem a função de proteger o recobrimento refratário do conversor, aumentando a sua durabilidade. Portanto, a escória é o produto resultante da combinação de



óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), que provem da dolomita, com os elementos a serem retirados do ferro gusa e da sucata metálica (KNELLER et al., 1994; MACHADO, 2000).

O processo de produção do aço em forno elétrico, ou EAF, consiste na fusão de sucata de aço, gerada por um arco elétrico, formado entre o aço e os eletrodos de grafita ou carvão amorfo. Após a fusão da sucata, injeta-se oxigênio através de uma lança, a fim de promover as reações de oxidação do Carbono (C), Silício (Si) e Fósforo (P). Do mesmo modo que no conversor LD, a adição de CaO e MgO promovem as reações de refino que conduzem à formação de escória constituída de silicatos e óxidos. Neste tipo de escória podem ser encontrados outros óxidos, tais como  $TiO_2$  e  $Cr_2O_3$  devido a características deste processo de geração. (MACHADO, 2000; PENA, 2004).

Tanto nas usinas integradas, que usam o conversor a oxigênio, como as usinas semi-integradas, que usam forno de arco elétrico, são geradas de 100 a 170 kg de escória de aciaria por tonelada de aço, dependendo de características do processo de geração, das matérias-primas utilizadas e das diferentes especificações dos aços produzidos em cada siderúrgica. Para a escória de aciaria LD, são gerados, aproximadamente 110 kg de escória de aciaria por tonelada de aço (LITTLE; SETEPLA, 1999; KUEHN et al., 2000; GEYER, 2001; SBRIGHI; BATTAGIN, 2002; PENA, 2004).

A escória de aciaria LD é, geralmente, mais heterogênea, e possui maior quantidade de cal livre, em relação à escória de aciaria elétrica (JUCKES, 2003; PENA, 2004).

No Brasil, em 2004, foram produzidos um total de 32,9 milhões de toneladas de aço, sendo que 24,8 milhões de toneladas foram produzidos pelo processo LD, cerca de 76%. Com base nessa produção, estima-se que foram produzidos 2,72 milhões de toneladas de escória de aciaria LD, considerando uma média de 110 kg de escória de aciaria por tonelada de aço (IBS, 2005).

A escória de aciaria LD tem em sua composição química produtos resultantes da combinação dos elementos escorificantes com os elementos a serem retirados do ferro gusa e, ocasionalmente, também da sucata metálica, matéria-prima na fabricação do aço. Alguns dos produtos resultantes são os silicatos de cálcio e ferritas combinadas com óxidos de alumínio, de manganês, de cálcio e de magnésio, além de outras espécies químicas que aparecem em menor escala. Do ponto de vista mineralógico, as escórias de aciaria são compostas, em média, por  $\beta$ -silicato dicálcico (larnita), ferrita dicálcica, wüstita (FeO), cal livre (CaO) e

periclásio (MgO), entre outras espécies químicas citadas no Quadro 2.1 (MACHADO, 2000; PENA, 2004).

| Fase mineral                   | Fórmula  |
|--------------------------------|--|
| Silicato dicálcico – Larnita   | $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$                            |
| Silicato tricálcico            | $3\cdot\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$                                    |
| Silicato de magnésio           | $\beta\text{-}2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$                            |
| Ferrita dicálcica              | $2\cdot\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$                           |
| Mervinita                      | $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$                                 |
| Diopsita                       | $\text{Ca Mg}(\text{SiO}_3)_2$   |
| Brown millerita                | $4\cdot\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ |
| Bredigita                      | $\alpha\text{-CaO}\cdot\text{SiO}_2$                                   |
| Geledita                       | $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$                |
| Óxidos de alumínio e magnésio  | $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$                                 |
| Wüstita (óxido de ferro)       | FeO  |
| Periclásio (óxido de magnésio) | MgO  |
| Óxido de cálcio                | CaO  |

**Quadro 2.1 - Composição mineralógica típica das escórias de aciaria LD (MACHADO, 2000)**

A composição e os teores dos componentes químicos presentes na escória de aciaria são bastante variáveis em função das características peculiares a cada processo de geração de diferentes tipos de aço em cada siderúrgica, justificando a heterogeneidade do material. Assim, a composição química da escória de aciaria é função da matéria-prima utilizada, da tecnologia de produção do aço, do próprio aço produzido, e até mesmo do revestimento do alto forno. (IHOBE, 1999; AMARAL, 1999; MOTZ; GEISELER, 2001; SBRIGHI; BATTAGIN, 2002).

O Quadro 2.2 mostra a composição química da escória de aciaria LD publicada por pesquisadores internacionais, e o Quadro 2.3 mostra a composição química da escória de aciaria LD proveniente de diferentes usinas siderúrgicas brasileiras. Nota-se nos quadros a reconhecida variabilidade da composição química da escória de aciaria LD. Os óxidos de cálcio e magnésio podem estar livres, hidratados ou combinados com os outros óxidos, sendo que a análise química não separa essas três formas, mostrando apenas a soma na forma de CaO e MgO.

A escória de aciaria também pode possuir teores muito pequenos de alumínio, flúor, cromo, zinco, níquel, chumbo, cádmio, vanádio e outros elementos, mas que não chegam a oferecer perigo ao meio ambiente (WITTENBORN et al., 1998; GEISELER, 1999; LITTLE; SETEPLA, 1999).

| Autores                   | CaO     | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO        | MnO   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | S     | Fe total |
|---------------------------|---------|------------------|--------------------------------|------------|-------|-------------------------------|-------|----------|
| NSA (s.d.)                | 42      | 15               | 5                              | 8          | 5     | 0,8                           | 0,08  | 24       |
| GEORGE; SORRENTINO (1980) | 47      | 13               | 1                              | 6          | 5     | 2                             | < 0,1 | 25       |
| MURPHY et al. (1997)      | 35      | 18               | 3,6                            | 11,5       | 6,5   | -                             | -     | -        |
| GEISELER (1999)           | 48 - 54 | 11 - 18          | 1 - 4                          | 1 - 4      | 1 - 4 |                               |       | 14 - 19  |
| LITTLE; SETEPLA (1999)    | 36 - 46 | 11 - 15,5        | 0,8 - 4                        | 5,5 - 12,5 | -     | -                             | -     | 14 - 22  |
| MOTZ; GEISELER (2001)     | 45 - 55 | 12 - 18          | < 3                            | < 3        | < 5   | < 2                           | -     | 18       |
| MOTZ; GEISELER (2001)     | 42 - 50 | 12 - 15          | < 3                            | 5 - 8      | < 5   | < 2                           | -     | 15 - 20  |
| FILEV (2003)              | 44,3    | 13,8             | 1,5                            | 6,4        | 5,3   | -                             | 0,07  | 17,5     |

Quadro 2.2 - Composições químicas da escória de aciaria LD segundo diferentes autores, valores em porcentagem

| Siderúrgica               | CaO   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | MnO  | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | S    | Fe total |
|---------------------------|-------|------------------|--------------------------------|------|------|-------------------------------|------|----------|
| ACESITA                   | 44,81 | 15,47            | 2,42                           | 7,32 | 2,09 | 1,18                          | 0,06 | 14,06    |
| AÇOMINAS                  | 45,58 | 12,01            | 0,75                           | 9,48 | 6,59 | 2,23                          | -    | 16,71    |
| BELGO MINEIRA (Monlevade) | 47    | 15               | 1,5                            | 8    | 3    | -                             | -    | 19       |
| COSIPA                    | 38,69 | 11,17            | 1,29                           | 9,76 | 6,42 | 1,44                          | 0,06 | 22,29    |
| CSN                       | 35    | 15               | 4                              | 6    | 3,5  | 0,7                           | 0,34 | 19,7     |
| CST                       | 45,2  | 12,2             | 0,8                            | 5,5  | 7,1  | 2,75                          | 0,07 | 18,8     |
| GERDAU - COCAIS           | 36,2  | 15,4             | 0,93                           | 12,5 | 5,8  | 1,01                          | 0,04 | 21       |
| MANNESMANN                | 43    | 15               | 0,8                            | 7    | 3    | 1,6                           | 0,2  | 22       |
| USIMINAS                  | 41,4  | 11               | 1,4                            | 6,2  | 6,3  | 1,8                           | -    | 22       |

Quadro 2.3 - Composição química típica da escória de aciaria LD nacional, valores em porcentagem (IBS, 1999)

## 2.2 A expansão da escória de aciaria LD

A principal dificuldade que existe quanto à utilização da escória de aciaria LD como material para pavimentação é a possibilidade de expansão. Essa expansão ocorre devido a reações envolvendo certos compostos presentes na escória de aciaria. Dentre essas reações expansivas as hidratações do óxido de cálcio livre ou cal livre (CaO) e do óxido de magnésio ou periclásio (MgO) são as mais importantes e maiores responsáveis pela desintegração e enfraquecimento por diferença de volume molar nas suas reações (GEISELER; SCHLOSSER, 1988; MOTZ; GEISELER, 1998; MACHADO, 2000; ROHDE, 2002; BRANCO, 2004; PENA, 2004).

O CaO se apresenta na forma livre ou combinada na forma de silicatos ou em solução sólida, sendo que a forma livre é a que desenvolve a expansão no material e alcança teores de até 10% do total de CaO. O CaO livre se expande durante a sua transformação em hidróxido de

cálcio, conforme a equação (2.1), causando desagregação do material e um aumento de volume de 99,4% em relação ao CaO.



Embora seja em menor escala, ocorre também a formação de  $\text{CaCO}_3$  (aragonita ou calcita) por carbonatação do  $\text{Ca(OH)}_2$ , conforme a equação (2.2), gerando um aumento de volume de 11% em relação ao hidróxido de cálcio (OKAMOTO et al., 1981).



A expansão devido ao CaO é influenciada por fatores como o teor e o tipo de CaO, a porosidade e o tamanho dos grãos da escória de aciaria.

Quanto maior a porosidade, mais superfície é exposta e mais rápida será a hidratação do CaO. Diferentes fatores alteram a porosidade da escória de aciaria, como o fluxo de gás liberado durante o resfriamento, que forma canais internos na escória de aciaria (WACHSMUTH et al., 1981; PENA, 2004).

O tamanho dos grãos de escória de aciaria é também importante, pois com a redução da granulometria, mais superfície é exposta, possibilitando uma hidratação mais rápida do CaO. Além disso, as frações menores que 8  $\mu\text{m}$  apresentam maiores teores de cálcio e menores teores de ferro, quando comparadas às frações mais grossas, possibilitando uma maior expansão dessas frações (GEYER, 2001; PENA, 2004).

O óxido de magnésio (MgO) contido na escória de aciaria LD é proveniente do uso da dolomita no forno, para minimizar o desgaste do revestimento refratário, e do próprio material refratário desgastado, podendo chegar a um teor total de até 10% na escória de aciaria LD. O MgO se apresenta na forma livre (periclásio), propícia à expansão, e também quimicamente combinado ou em solução sólida, em geral apresentando comportamento estável. (MACHADO, 2000; THOMAS, 2000; SBRIGHI; BATTAGIN, 2002; ROHDE, 2002).

O periclásio origina-se, principalmente, da dissolução incompleta da dolomita durante o refino. Este composto normalmente se forma quando existem teores maiores que 3% de MgO total na escória de aciaria, o que ocorre na maior parte das aciarias. Para controlar o problema, pesquisadores sugerem que o tamanho do grão seja o menor possível, para facilitar a dissolução e a reação completa desse óxido (PENA, 2004).

A reação expansiva de hidratação do MgO na forma de periclásio forma o hidróxido de magnésio (brucita), conforme a equação (2.3), um composto que tem variação de volume de 119,5% em relação ao MgO (MACHADO, 2000; SBRIGHI; BATTAGIN, 2002).

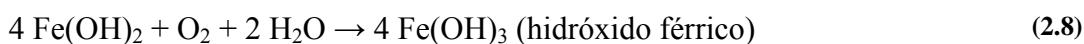


O periclásio causa uma expansão mais tardia que a expansão ocasionada pelo óxido de cálcio livre, visto que o periclásio se hidrata mais lentamente, expandindo por um longo período de tempo (MACHADO, 2000; ROHDE, 2002; BRANCO, 2004; PENA, 2004).

A expansão devido ao óxido de magnésio, a exemplo do que ocorre com o CaO, é também influenciada por fatores como o teor e tipo da espécie na escória de aciaria, a porosidade e o tamanho dos grãos.

Além das reações com o CaO e MgO, a corrosão e a oxidação do ferro metálico residual e a mudança na forma alotrópica do C<sub>2</sub>S também são responsáveis, em menor escala, pela expansão da escória de aciaria (MACHADO, 2000; ROHDE, 2002; BRANCO, 2004; PENA, 2004).

A escória de aciaria possui em sua composição um alto teor de ferro metálico (Fe<sup>0</sup>), que após processos de corrosão e oxidação pode aparecer sob a forma de Fe<sup>+2</sup> e Fe<sup>+3</sup>, sendo estes os estados de corrosão e oxidação mais comuns. As equações (2.4) a (2.6) descrevem as principais reações de oxidação e as equações (2.7) e (2.8) descrevem as reações de corrosão (MACHADO, 2000; ROHDE, 2002).



No Quadro 2.4 é apresentado um resumo das características de algumas das espécies químicas presentes na escória de aciaria juntamente com o valor da variação de volume ou expansão relativo a cada espécie química. Observa-se no Quadro 2.4 que na maioria das transformações, seja por hidratação, carbonatação ou oxidação, ocorre um significativo aumento de volume em relação às dimensões originais do cristal, sendo que esse fenômeno conduz à expansão destrutiva da escória de aciaria (MACHADO, 2000).

Outro fator que contribui para a expansão da escória de aciaria LD é a transformação alotrópica<sup>7</sup> do silicato dicálcico ou ortossilicato de cálcio ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ou  $\text{C}_2\text{S}$ ) da fase  $\beta$  (larnita) para a fase  $\gamma$  (calco-olivina), que pode ocorrer durante o resfriamento ou mesmo a temperaturas ambientes. Porém, existe um aumento de apenas 10,4% no volume, sendo uma alteração que contribui para o agravamento dos efeitos gerais da expansão causada pelo CaO e pelo MgO e que causa o fenômeno de esfarelamento ou desagregação (MACHADO, 2000; THOMAS, 2000; ROHDE, 2002).

| Fórmula                              | Nome             | Densidade relativa | Varição de volume (%)*        |
|--------------------------------------|------------------|--------------------|-------------------------------|
| MgO                                  | Periclásio       | 3,58               | Em relação ao MgO             |
| Mg(OH) <sub>2</sub>                  | Brucita          | 2,36               | 119,5                         |
| CaO                                  | Cal              | 3,38               | Em relação ao CaO             |
| Ca(OH) <sub>2</sub>                  | Portlandita      | 2,24               | 99,4                          |
| CaCO <sub>3</sub>                    | Calcita          | 2,93               | 105,9                         |
|                                      | Aragonita        | 2,71               | 122,6                         |
| CaCO <sub>3</sub> Mg CO <sub>3</sub> | Dolomita         | 2,87               | 287,3                         |
| Fe <sup>0</sup>                      | Ferro (metálico) | 7,86               | Em relação ao Fe <sup>0</sup> |
| FeO                                  | Wüstita          | 5,7                | 77,4                          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | Hematita         | 5,24               | 328,7                         |
| Fe(OH) <sub>2</sub>                  | Hidróxido        | 3,4                | 271,7                         |
| FeO(OH)                              | Goetita          | 4,28               | 192                           |

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

**Quadro 2.4 - Características de alguns compostos químicos presentes na escória de aciaria (WEAST, 1971; MACHADO, 2000)**

### 2.3 Estabilização da expansão da escória de aciaria

Com alguma frequência os materiais, em geral, disponíveis para construção podem não preencher totalmente os requisitos necessários para seu uso como bases ou sub-bases de estradas. O processo de melhoramento do material para atender os requisitos necessários é chamado de *estabilização*. Numa visão mais ampla, a estabilização inclui compactação, drenagem, pré-adensamento, e proteção superficial da erosão e infiltração da umidade. Entretanto, o termo *estabilização* é mais utilizado na prática de engenharia no que se refere ao aspecto de melhoramento do material: a alteração do próprio material (SOWERS, 1979).

<sup>7</sup> A alotropia é o fenômeno pelo qual certos elementos podem apresentar-se sob formas diferentes e com propriedades diferentes. O diamante e a grafita são estados de alotropia do carbono, por exemplo (PENA, 2004).

Na escória de aciaria, geralmente, o que precisa ser estabilizado é a expansão. Normalmente, quando esse material é avaliado quanto à expansão sem ter passado por nenhum tipo de estabilização ou tratamento, não consegue atender aos requisitos mínimos. Portanto, faz-se necessário algum método de estabilização antes da utilização da escória de aciaria para utilização em pavimentação, podendo-se utilizar os métodos de estabilização através da mistura de materiais ou algum tratamento específico para redução da expansão da escória de aciaria.

### **2.3.1 Estabilização da expansão pela utilização de misturas**

Nesse tipo de estabilização, utiliza-se a adição de escória de alto forno (bruta e/ou granulada) e/ou cinza volante (*fly ash*) que reagem quimicamente com os óxidos de cálcio e magnésio livres da escória de aciaria, reduzindo a expansão<sup>8</sup>. Normalmente, a escória de alto-forno e a cinza volante têm dimensão inferior à escória de aciaria, podendo ocorrer um preenchimento de vazios da escória de aciaria. Esse preenchimento de vazios aumenta o peso específico aparente seco e o intertravamento das partículas gerando, também, uma estabilização mecânica. Além disso, a escória granulada de alto-forno e a cinza volante têm propriedades aglomerantes, se ativadas corretamente, gerando uma cimentação na mistura com escória de aciaria. Essa cimentação também pode ser observada, em menor intensidade, na escória de aciaria pura devido ao efeito da carbonatação do óxido de cálcio.

A escória granulada de alto-forno tem de 95 a 99% de suas partículas vitrificadas. Essas partículas, em presença de água, passam muito lentamente da forma instável para um estado estável de cristal de hidróxido de cálcio-alumina-sílica. Entretanto, a adição de um ativador químico, como a cal, torna essa reação mais rápida e faz com que o material ganhe resistência rapidamente, o que é essencial para a rápida liberação da estrada para o tráfego. A escória de aciaria contém boa quantidade de cal livre, cerca de 2 a 4%, que combinada à escória granulada de alto-forno e à água presente na mistura, agrega ganho de resistência com o tempo à mistura (LEMASS, s.d.).

A cal juntamente com a água interfere na velocidade de hidratação da escória granulada de alto-forno, devido à elevação do pH da água até no máximo 12,5, o que possibilita a ruptura das ligações Ca-O, Mg-O, Si-O e Al-O e a posterior formação de ligações cimentícias (SILVA, 1998). Acredita-se que ocorra alguma ruptura da escória granulada durante a

---

<sup>8</sup> Já que os óxidos de cálcio e magnésio que reagirem com a escória de alto-forno e/ou com a cinza volante não sofrerão hidratação e, também, não sofrerão uma conseqüente expansão.

compactação, aumentando um pouco a superfície específica da escória granulada de alto-forno e expondo uma maior quantidade desse material às reações de hidratação, porém esse tipo de ativação mecânica torna-se secundária em relação à ativação provocada pela cal. O material estabilizado desta maneira tem tido um uso substancial na França como material de base e sub-base de estradas (HEATON, 1989).

As cinzas volantes, segundo Heaton (1989), são resíduos fundamentalmente sílico-aluminosos, finamente divididos, provenientes da combustão do carvão mineral pulverizado, utilizado em usinas termoelétricas. São consideradas materiais pozolânicos, à semelhança das cinzas vulcânicas ácidas, por apresentarem capacidade de reação com a cal, em presença de água, originando a formação de compostos novos com propriedades aglomerantes. Nagao et al. (1989) observaram que a adição de cinzas volantes à escória de aciaria, na proporção de 1 a 2%, é uma medida efetiva para o aumento da resistência no ensaio de compressão simples.

Como a efetividade das misturas usadas para bases e sub-bases depende das proporções dos materiais, das propriedades dos materiais usados, do tipo de cura utilizado e de outros fatores, pesquisas têm sido desenvolvidas sobre o assunto e algumas serão comentadas a seguir.

Uma das misturas pesquisadas é composta de 60% de escória de aciaria do tipo LD menor que 25 mm com 40% de escória granulada de alto-forno. Ensaio de resistência à compressão simples de amostras de uma base, curadas durante 28 dias em câmara úmida, resultaram em 5,0 MPa e, após 7 dias em cura a vapor, a resistência foi de 3,0 MPa. Este tipo de base tem sido usado na área de Wollongong, Austrália, e uma mistura similar vem sendo usada nos últimos 10 anos na região de Newcastle, Austrália (ASA, 2002).

Outra mistura é composta de 95% de escória de aciaria LD e 5% de cinza volante (*fly ash*) dando resultados similares à primeira mistura. O Quadro 2.5 mostra resultados laboratoriais da resistência à compressão simples para uma base de pavimento construído com esse tipo de mistura, onde os corpos-de-prova foram moldados e submetidos a diferentes períodos de cura (ASA, 2002).

| Condição de cura do ensaio | Resistência à Compressão Simples (MPa) |
|----------------------------|--|
| 28 dias em câmara úmida    | 5,9                                    |
| 90 dias em câmara úmida    | 7,4                                    |
| 7 dias em cura a vapor     | 6                                      |

**Quadro 2.5 - Resultados de ensaios de resistência à compressão simples da mistura de 95% de escória de aciaria e 5% de cinza volante (ASA, 2002)**



Muitos tipos de misturas foram testadas pelas empresas que processam escória de aciaria em Newcastle, Austrália. Uma mistura chamada de *MIX 3* tem sido usada extensivamente na área de Newcastle. Essa mistura utiliza 70% de escória de aciaria LD menor que 20 mm com 25% de escória granulada de alto-forno e 5% de cinza volante. As médias de resistência à compressão simples obtidas em laboratório são mostradas no Quadro 2.6. Os resultados obtidos em estradas locais ensaiadas depois de 6 anos de construção mostraram que o material alcança resistências em torno de 10 MPa (ASA, 2002). O ganho de resistência com o tempo desse tipo de mistura pode ser atribuído:

- à cal livre e à cal contida na escória de aciaria, que reagem inicialmente com a cinza volante;
- a alguma cal livre e cal contida remanescentes, que reagem com a escória de alto-forno;
- à ação cimentante dos materiais da escória de aciaria.

| Condição de cura do ensaio | Resistência à Compressão Simples (MPa) |
|----------------------------|--|
| 7 dias em câmara úmida     | 1,2                                    |
| 14 dias em câmara úmida    | 2,3                                    |
| 28 dias em câmara úmida    | 3,8                                    |
| 35 dias em câmara úmida    | 5                                      |

**Quadro 2.6 - Resultados de ensaios de resistência à compressão simples da mistura de 70% de escória de aciaria, 25% de escória granulada de alto-forno e 5% de cinza volante (ASA, 2002)**

A mistura *MIX 3* tem uma distribuição de partículas levemente mais fina que outros materiais convencionais de base. Tal material, durante a construção, tem a vantagem de melhorar a trabalhabilidade e facilitar o espalhamento e a compactação. Essa melhor trabalhabilidade e o ganho de resistência com o tempo provêm uma rápida construção e benefícios de custo para toda a vida do pavimento, comparado com materiais convencionais (ASA, 2002).

A escória de aciaria também tem sido misturada com calcário em pó e cinza volante para se obter um material de base com características cimentantes. Como o calcário em pó é inerte comparado à escória granulada de alto-forno, as resistências finais alcançadas por esse tipo de mistura são menores do que a mistura *MIX 3*. Resultados de resistência à compressão simples desse tipo de mistura são apresentados no Quadro 2.7. Corpos-de-prova retirados de pavimentos, depois de aproximadamente 12 meses, têm apresentado uma resistência à compressão simples em torno de 6 MPa (ASA, 2002).

| Condição de cura do ensaio | Resistência à Compressão Simples (MPa) |
|----------------------------|--|
| 7 dias em câmara úmida     | 0,5                                    |
| 14 dias em câmara úmida    | 1,5                                    |
| 28 dias em câmara úmida    | 2,5                                    |
| 35 dias em câmara úmida    | 3,2                                    |

**Quadro 2.7 - Resultados de ensaios de resistência à compressão simples da mistura de escória de aciaria, calcário em pó e cinza volante (ASA, 2002)**

Em uma pesquisa desenvolvida no Japão, Nagao et al. (1987) usaram diferentes proporções de escória de aciaria LD (EALD), escória granulada de alto-forno (EGAF) e escória bruta de alto-forno<sup>9</sup> (EBAF). A escória de aciaria apresentou dimensões menores que 30 mm e foi exposta ao ar por um período de 18 meses, a escória bruta de alto-forno foi curada por 2,5 meses e possuía dimensões menores que 25 mm, e a escória granulada de alto-forno possuía dimensões menores que 5 mm, podendo ser moída (X) ou não moída (0), dependendo da mistura. Foram utilizadas duas escórias granuladas de alto-forno de diferentes origens: uma de Yamata (Y), com densidade relativa igual a 2, e outra de Nagoya (N), com densidade relativa igual a 2,5 (NAGAO et al., 1987). As granulometrias das misturas com escória de aciaria foram de três tipos diferentes, conforme está apresentado no Quadro 2.8.

| Tipo     | Faixa granulométrica (mm) |        |         |           |             |         |
|----------|---------------------------|--------|---------|-----------|-------------|---------|
|          | 30 a 13                   | 13 a 8 | 8 a 2,5 | 2,5 a 0,4 | 0,4 a 0,074 | < 0,074 |
| <b>A</b> | 40                        | 25     | 10      | 15        | 7           | 3       |
| <b>B</b> | 30                        | 22,5   | 12,5    | 17,5      | 11          | 6,5     |
| <b>C</b> | 20                        | 20     | 15      | 20        | 15          | 10      |

**Quadro 2.8 - Faixa granulométrica das misturas de escórias em % retida (NAGAO et al., 1987)**

No Quadro 2.9, apresentam-se os resultados de ensaios laboratoriais de 24 misturas usando proporções superiores a 50% de escória de aciaria LD. Os ensaios de resistência à compressão simples e CBR com energia de compactação do Proctor modificado estão de acordo com a norma japonesa JIS A 5015. Pode-se observar que todas as misturas experimentadas apresentaram um CBR superior a 120% (NAGAO et al., 1987).

No Quadro 2.10, observam-se os resultados de ensaios de resistência à compressão simples de corpos-de-prova de cinco diferentes tipos de misturas utilizando uma escória de aciaria LD (EALD), uma escória granulada de alto-forno (EGAF) e uma cinza volante (CV), segundo um trabalho desenvolvido por Heaton (1996), em Newcastle, Austrália. Onde se pode observar um ganho de resistência com o tempo para as misturas curadas de 7 a 140 dias. Os corpos-de-

<sup>9</sup> Escória de alto-forno resfriada lentamente e com estrutura cristalina.

prova com 100% de escória de aciaria não puderam ser ensaiados devido à ruptura após a imersão em água.

| Nº / Tipo da mistura | Mistura |        |        |               | Tipo de granulometria ** | % menor que 5mm | Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> ) | Resist. Comp. Simples (MPa) | CBR no Proctor Modificado (%) |
|----------------------|---------|--------|--------|---------------|--------------------------|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
|                      | EALD %  | EBAF % | EGAF % | Tipo de EGAF* |                          |                 |                                     |                             |                               |
| 1 / B                | 100     |        |        |               | B                        | 47,5            | 2110                                | 1,17                        | 168                           |
| 2 / B                |         | 100    |        |               | B                        | 47,5            | 1920                                | 1,71                        | 160                           |
| 3 / I                | 50      | 30     | 20     | N0            | B                        | 48,5            | 1960                                | 2,37                        | 182                           |
| 4 / I                | 50      | 30     | 20     | N0            | A                        | 36,7            | 1940                                | 1,94                        | 203                           |
| 5 / I                | 50      | 30     | 20     | N0            | C                        | 63,8            | 1960                                | 2,24                        | 186                           |
| 6 / I                | 50      | 30     | 20     | NX            | B                        | 47,5            | 2030                                | 2,87                        | 251                           |
| 7 / II               | 65      | 30     | 5      | N0            | B                        | 47,5            | 2030                                | 2,10                        | 171                           |
| 8 / II               | 65      | 30     | 5      | N0            | A                        | 35,0            | 2000                                | 1,87                        | 187                           |
| 9 / II               | 65      | 30     | 5      | NX            | B                        | 47,5            | 2100                                | 1,96                        | 162                           |
| 10 / II              | 65      | 20     | 15     | N0            | B                        | 47,5            | 2020                                | 2,11                        | 159                           |
| 11 / II              | 65      | 20     | 15     | N0            | A                        | 35,0            | 1950                                | 1,72                        | 177                           |
| 12 / II              | 65      | 20     | 15     | NX            | B                        | 47,5            | 2070                                | 2,78                        | 189                           |
| 13 / III             | 75      | 15     | 10     | N0            | B                        | 47,4            | 2070                                | 1,81                        | 166                           |
| 14 / III             | 75      | 15     | 10     | N0            | A                        | 35,0            | 1990                                | 1,70                        | 138                           |
| 15 / III             | 75      | 15     | 10     | NX            | B                        | 47,5            | 2090                                | 2,32                        | 170                           |
| 16 / III             | 75      | 10     | 15     | N0            | B                        | 47,5            | 2060                                | 2,25                        | 145                           |
| 17 / III             | 75      | 10     | 15     | N0            | A                        | 34,9            | 2070                                | 1,41                        | 153                           |
| 18 / III             | 75      | 10     | 15     | NX            | B                        | 47,5            | 2090                                | 2,84                        | 185                           |
| 19 / IV              | 50      | 30     | 20     | Y0            | B                        | 48,3            | 1720                                | 2,11                        | 121                           |
| 20 / IV              | 65      | 20     | 15     | Y0            | B                        | 47,5            | 1870                                | 2,34                        | 128                           |
| 21 / IV              | 75      | 10     | 15     | Y0            | B                        | 47,5            | 1870                                | 2,10                        | 139                           |
| 22 / V               | 50      | 30     | 20     | N0            | B                        | 48,1            | 1920                                | 1,68                        | 162                           |
| 23 / V               | 65      | 20     | 15     | N0            | B                        | 47,5            | 2000                                | 1,78                        | 156                           |
| 24 / V               | 75      | 10     | 15     | N0            | B                        | 47,5            | 2010                                | 1,87                        | 139                           |

\* N = Nagoya; Y = Yamata; 0 = não moída; X = moída.

\*\* Granulometria segundo o Quadro 2.8.

**Quadro 2.9 - Resultados de ensaios de laboratório de misturas utilizando diferentes proporções e granulometrias de uma escória de aciaria (EALD) com escória bruta de alto-forno (EBAF) e escória granulada de alto-forno (EGAF) (NAGAO et al., 1987)**

|                                | 7 dias a 65°C | 7 dias    | 14 dias | 28 dias   | 90 dias   | 140 dias |
|--------------------------------|---------------|-----------|---------|-----------|-----------|----------|
| 100% Escória de aciaria (EALD) | 0             | 0         | 0       | 0         | 0         | 0        |
| 80%EALD:20%EGAF                | 0,6           | 0,7       | -       | 1,3       | 1,9       | 1,8      |
| 95%EALD:5%CV                   | 2,8           | 1,1       | -       | 3,1       | 5,3       | 7,3      |
| 95%EALD<20mm:5%CV              | 4,4           | 2,3       | 3,7     | 5,5       | -         | -        |
| 95%EALD<40mm:5%CV              | 6,1           | 3,1       | 4,6     | 5,9       | 7,4       | -        |
| 80%EALD:17%EGAF:3%CV           | 2,5           | 1,1       | -       | 3,0       | 4,5       | 5,2      |
|                                | 3,7           | 2,5       | 4,4     | 5,3       | 6,6       | -        |
| 70%EALD:25%EGAF:5%CV           | 3,5 a 5,8     | 0,8 a 3,4 | -       | 2,7 a 6,3 | 5,9 a 9,9 | -        |
|                                | -             | -         | -       | -         | 2,9 a 8,5 | -        |

**Quadro 2.10 - Variação da resistência à compressão simples (MPa) com o tempo de diferentes misturas com escória de aciaria (HEATON, 1996)**

### 2.3.2 Tratamento da escória de aciaria nos estados líquido e sólido

Além das misturas usadas com sucesso, pode-se utilizar um tratamento para diminuir a expansão da escória de aciaria, onde os tratamentos podem ser classificados de acordo com o

estado em que a escória de aciaria se encontra. Assim, existem tratamentos com a escória de aciaria no estado líquido e com a escória de aciaria no estado sólido.

O tratamento da escória de aciaria no estado líquido pode ser feito pela introdução de aditivos ou adições que reduzirão o teor de cal livre. Um dos tratamentos é a adição de sílica e oxigênio à escória de aciaria ainda líquida, onde utiliza-se areia como fonte de sílica. Essa adição leva à oxidação do FeO que é uma reação exotérmica, provendo desta maneira calor para o processo de assimilação da areia pela escória de aciaria ainda líquida. Como resultado obtém-se uma escória de aciaria com alto teor de sílica o que causa uma redução no teor de cal livre presente na mesma escória de aciaria, devido à dissolução da cal livre e posterior combinação com a sílica (KUEHN et al., 2000; MOTZ; GEISELER, 2001; JUCKES, 2003; PENA, 2004).

Uma outra maneira de tratamento da escória de aciaria no estado líquido é a injeção de areia molhada ou mesmo de água a esse material. Ainda que o resultado dos testes empregando este tipo de tratamento tenham sido satisfatórios na redução do potencial de expansão das amostras a ele submetidas, os custos de materiais, equipamentos e procedimentos mostram-se proibitivos na maioria dos casos. Deve-se estar atento ao risco de explosões quando se mistura água à escória de aciaria líquida, principalmente devido à existência de concentrações de metais derretidos nesse material, que aumentam consideravelmente a possibilidade de explosão ao entrarem em contato com a água (JUCKES, 2003).

Não ocorrendo nenhum tratamento na fase líquida, a escória de aciaria no estado sólido é transportada para um pátio ao ar livre, onde é britada e empilhada. Após esse processo a escória de aciaria pode ser tratada através da exposição ao tempo em condições ambientes de temperatura e umidade, esse tratamento é chamado de *weathering* e que pode vir acompanhado de aspersões de água ao longo do tempo (ANDERSON, 1984; TOSTICARELLI et al., 1985; GUMIERI et al., 2000; KUEHN et al., 2000; ROBINSON, 2000; THOMAS, 2000; AZEVEDO, 2001; GEYER, 2001).

No Japão, um período mínimo de 3 meses é necessário antes que a escória de aciaria possa ser avaliada quanto à expansão (JIS, 1992; FARRAND; EMERY, 1995). No estado da Pensilvânia, EUA, um período mínimo de 6 meses é necessário antes que a escória de aciaria seja ensaiada quanto à expansão. Se a escória de aciaria for reprovada quanto à expansão após esse período mínimo de 6 meses de cura, é necessário um período adicional de cura de no mínimo 2 meses (EMERY, 1987; FARRAND; EMERY, 1995). Na França, as escórias de aciaria recém produzidas, que serão usadas na construção de estradas, devem permanecer

estocadas ao ar livre por um período mínimo de um ano já com a granulometria final de utilização em bases e sub-bases rodoviárias (VERHASSELT; CHOQUET, 1987).

Porém, comprovou-se que o armazenamento ao ar sem molhagem não oferece garantias de estabilização da expansão, mas que os melhores resultados foram obtidos quando as pilhas de escória de aciaria tinham uma altura máxima de 1,5 a 2,0 metros (GEYER, 2001).

Algumas desvantagens do método de estabilização ao tempo são os períodos prolongados e as grandes áreas para a disposição do material, além da geração de partículas muito finas e de um material heterogêneo (GEISELER; SCHLOSSER, 1988; GEISELER et al., 1998; KUEHN et al., 2000; MOTZ; GEISELER, 2001). A eficiência desse método é influenciada por uma série de variáveis que devem ser observadas, como a granulometria, a disposição, a forma e o tamanho das pilhas e as condições ambientais do local de armazenamento. Todos estes fatores podem influenciar, principalmente, na retenção de umidade na pilha o que favorece a hidratação de óxidos livres (THOMAS, 2000).

Uma variação do método de estabilização *weathering* é, além da molhagem, a aeração e mistura por meio de movimentação ou revolvimento da escória de aciaria. Este procedimento é utilizado em algumas usinas brasileiras.

No caso de uma siderúrgica localizada na região metropolitana de Vitória, Espírito Santo, Brasil, além do período de cerca de três anos que a escória de aciaria fica exposta ao tempo no pátio de estocagem, a escória de aciaria destinada ao uso de bases e sub-bases de pavimentos sofre um tratamento adicional. A estabilização é intensificada através de molhagem e revolvimento diário do material, que é espalhado em pátio aberto, ficando com uma altura máxima de 0,5 m. Tal processo é feito com o objetivo de acelerar as reações da escória de aciaria com a água e com o ar, que promovem a sua expansão. Juntamente com a expansão da escória de aciaria, ocorre a cimentação da camada superficial do material, que retarda as reações nas camadas internas das pilhas. Por tal motivo, é realizado o revolvimento, rompendo a camada endurecida e possibilitando uma estabilização mais rápida e homogênea da pilha (CST, 2003; CST, 2003b; CST, 2003c).

Independente do tipo de estabilização ou tratamento, a expansão da escória de aciaria deve ser checada através de um ensaio de expansão, que deve ter procedimentos e critérios especificados (VERHASSELT; CHOQUET, 1987; MOTZ; GEISELER, 2001). Além disso, uma prática de controle de qualidade específica deve ser estabelecida para cada fonte de escória de aciaria, incluindo quem produz o aço e quem processa a escória de aciaria. O

propósito desse controle é assegurar que um material de qualidade adequada seja produzido para o uso em pavimentação (FARRAND; EMERY, 1995).

## **2.4 Caracterização física e mecânica da escória de aciaria**

O comportamento das construções rodoviárias, perante carregamento, depende das características físicas e propriedades mecânicas dos materiais utilizados nessas construções. Durante os últimos 30 anos, as características da escória de aciaria vêm sendo pesquisadas e comparadas com as propriedades de materiais convencionais (MOTZ; GEISELER, 1998; MOTZ; GEISELER, 2001).

Neste item, apresenta-se uma revisão bibliográfica das características e propriedades técnicas relevantes à caracterização física e mecânica da escória de aciaria, visando à utilização desse material para construção de bases e sub-bases de pavimentos.

Algumas das características e propriedades da escória de aciaria que devem ser levadas em conta na aplicação de bases e sub-bases são:

- granulometria;
- limites de consistência;
- massa específica dos sólidos;
- massa específica no estado solto ou massa unitária;
- absorção;
- resistência ao desgaste;
- CBR (*California Bearing Ratio*) ou Índice de Suporte Califórnia (ISC);
- módulo de resiliência (deformabilidade).

Além desses itens, a compactação e a expansão da escória de aciaria são de fundamental importância para a aplicação desse material em bases e sub-bases de pavimentos. Uma revisão bibliográfica sobre a compactação das escórias de aciaria é feita nos itens 2.5 e 2.6 desta dissertação.

### **2.4.1 Granulometria**

A distribuição granulométrica é uma das características que assegura maior estabilidade aos pavimentos, devido ao maior atrito interno obtido por entrosamento. As porcentagens exigidas devem ser tais que as partículas menores preencham os vazios deixados pelas maiores, obtendo-se assim, um conjunto com maior estabilidade (PIZA, 1970). Dessa forma entende-se que o material *bem graduado* tem maior estabilidade que os demais.

O DNIT especifica através da norma ES-303/97, que a composição granulométrica do material deve ser enquadrada em uma das faixas de granulometria apresentadas no Quadro

2.11. Além disso, a porcentagem que passa na peneira nº 200 não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira nº 40.

A análise granulométrica é padronizada pela ABNT, através da NBR 7181/84, enquanto que o DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes utiliza a ME 80-94 para análise granulométrica por peneiramento.

O DNIT especifica, através da norma EM 262/94 para escórias de aciaria para pavimentos rodoviários, que a composição granulométrica das escórias de aciaria utilizadas em bases e sub-bases deve manter a proporção de 40% na faixa menor que 12,7 mm e de 60% na faixa de 12,7 a 50,8 mm de abertura nominal e deve atender à granulometria de projeto (MACHADO, 2000; BALTAZAR, 2001). Deve-se atentar que a granulometria da escória de aciaria usada em pavimentos é obtida por britagem, podendo ser selecionada de acordo com o necessário.

| Designação do DNER | Abertura Nominal (mm) | Faixas (% que passa) |         |         |          |
|--------------------|-----------------------|----------------------|---------|---------|----------|
|                    |                       | A                    | B       | C       | D        |
| 2"                 | 50,8                  | 100                  | 100     | -       | -        |
| 1"                 | 25,4                  | -                    | 75 - 90 | 100     | 100      |
| 3/8"               | 9,5                   | 30 - 65              | 40 - 75 | 50 - 85 | 60 - 100 |
| Nº 4               | 4,8                   | 25 - 55              | 30 - 60 | 35 - 65 | 50 - 85  |
| Nº 10              | 2,0                   | 15 - 40              | 20 - 45 | 25 - 50 | 40 - 70  |
| Nº 40              | 0,42                  | 8 - 20               | 15 - 30 | 15 - 30 | 25 - 45  |
| Nº 200             | 0,074                 | 2 - 8                | 5 - 15  | 5 - 15  | 5 - 20   |

**Quadro 2.11 - Faixas granulométricas do DNIT para materiais de bases granulares (DNIT-ES 303/97)**

#### **2.4.2 Limites de consistência**

Os limites de consistência, também conhecidos como limites de Atterberg, são estabelecidos arbitrariamente a partir de ensaios padronizados e caracterizam o comportamento do material que passa na peneira de 0,42 mm de abertura na presença de água. Os ensaios para obtenção do limite de liquidez e limite de plasticidade são padronizados pela ABNT através da NBR 6459 e da NBR 7180, respectivamente.

Apesar das inegáveis virtudes do conhecimento dos limites de consistência, geralmente, estes não permitem definir de forma única, a desejada composição mineralógica de um material. Porém procura-se frequentemente substituir a determinação direta da mineralogia, pela sua determinação indireta através dos limites de consistência, que são de determinação relativamente simples e econômica (LAMBE; WHITMAN, 1969).

A norma do DNIT-ES 303/97 de materiais para bases granulares especifica que a fração que passa na peneira nº40 (0,42 mm) deverá apresentar limite de liquidez menor ou igual a 25% e índice de plasticidade menor ou igual a 6%.

Hadjadji et al. (2002) concluem que os finos das escórias de aciaria analisadas, obtidos por processo de britagem, são não plásticos e por ter apresentado tal comportamento, essas escórias de aciaria analisadas foram consideradas como não sensíveis à água, característica geralmente exigida para os materiais granulares utilizados na construção de rodovias.

### **2.4.3 Massa específica dos grãos**

O ensaio de massa específica para a escória de aciaria pode ser executado segundo duas diferentes normas da ABNT, a NBR 6508/84 e a NBR 6458/84.

A NBR 6508/84 especifica a determinação da massa específica de grãos de solos que passam na peneira 4,8 mm de abertura, onde o material seco é pesado e utiliza-se um frasco, chamado de picnômetro, com água destilada para fazer a medida de volume do material ensaiado.

A NBR 6458/84 especifica a determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água de grãos de pedregulhos retidos na peneira 4,8 mm de abertura, onde a massa seca da amostra é medida em balança e o volume é medido em balança hidrostática. Para o cálculo da massa específica dos grãos, utiliza-se o volume da amostra sem os vazios permeáveis. E, para o cálculo da massa específica aparente dos grãos utiliza-se o volume da amostra com os vazios permeáveis, sendo essa massa específica aparente um pouco menor que a massa específica dos grãos.

A massa específica das escórias de aciaria LD e EAF (forno a arco elétrico) comparadas com a massa específica de alguns tipos de materiais convencionais é apresentada no Quadro 2.12, onde se pode observar que as escórias de aciaria LD têm valores variando entre 3200 e 3700 kg/m<sup>3</sup>, que são superiores aos valores de massa específica encontrados para basalto e granito, agregados naturais mais comuns para uso rodoviário. Esses valores de massa específica são influenciados pelo tipo de aço que originou a escória de aciaria e pelo tipo de processo de desmetalização<sup>10</sup> utilizado e pela granulometria do material, que em dimensões maiores pode ter mais poros impermeáveis, reduzindo o valor da massa específica que utiliza água para determinar o volume.

O DNIT estabelece através da especificação EM 262/94 que o valor de massa específica deve estar entre 3000 kg/m<sup>3</sup> e 3500 kg/m<sup>3</sup> determinada através da norma NBR 9937/87, que tem o mesmo procedimento da NBR 6458, para o uso da escória de aciaria na construção de sub-bases, bases e misturas betuminosas para estradas (MACHADO, 2000; BALTAZAR, 2001).

---

<sup>10</sup> Retirada de parte dos metais existentes na escória, diminuindo a massa específica da escória de aciaria.



| Autores                             | Método de ensaio | Basalto     | Granito     | Pedra calcária | Escória de Aciaria EAF | Escória de Aciaria LD |
|-------------------------------------|------------------|-------------|-------------|----------------|------------------------|-----------------------|
| GEISELER (1996)                     | prEN 1097-6      | 2800 a 3100 | 2600 a 2800 | -              | 3200 a 3800            | 3000 a 3700           |
| HEATON (1996)                       | ASI 141.5        | -           | -           | -              | -                      | 3500                  |
| JONES et al. (1996)                 | BS 812/1995      | 2850        | -           | -              | 3500                   | 3530                  |
| BALTAZAR (2001)                     | NBR 9937         | -           | -           | -              | -                      | 3470                  |
| MOTZ & GEISELER (2001); MOTZ (2002) | prEN 1097-6      | -           | 2500        | -              | 3500                   | 3300                  |
| ASA (2002)                          | ASI 141.5        | -           | -           | -              | 3300                   | 3300 a 3400           |
| ROHDE (2002)                        | DNER-ME 081/1994 | -           | -           | -              | 3410 a 3520            | -                     |
| MASLEHUDDIN et al. (2003)           | ASTM C 127       | -           | -           | 2540           | -                      | 3510                  |
| BRANCO (2004) fração graúda         | DNER-ME 081/98   | -           | -           | -              | 3300                   | -                     |
| BRANCO (2004) fração miúda          | DNER-ME 084/95)  | -           | -           | -              | 3510                   | -                     |
| PENA (2004)                         | NBR-9937         | -           | -           | -              | -                      | 3550                  |
| DNER EM 262/1994                    | NBR-9937         | -           | -           | -              | 3000 a 3500            | 3000 a 3500           |

Quadro 2.12 - Valores de massa específica dos grãos ( $\text{kg/m}^3$ ) de alguns autores para algumas rochas e escórias de aciaria LD e forno elétrico (EAF)

#### 2.4.4 Massa específica no estado solto

A massa específica no estado solto ou massa unitária é necessária para a transformação de dosagem em massa para volume, muito usada nos serviços de transporte e pavimentação. Depende da massa específica dos grãos, da granulometria e da forma dos grãos (PIZA, 1970).

O ensaio, bastante simples, é executado colocando-se a escória de aciaria em um recipiente de forma paralelepípedica, com o auxílio de uma pá, a uma altura de 100 a 120 mm do topo do recipiente, evitando a segregação do material, preenchendo por completo o recipiente e arrasando o topo. A massa da escória de aciaria dividida pelo volume do recipiente é massa específica aparente seca no estado solto ou massa unitária, de acordo com a NBR 7251/82.

A especificação DNIT-EM 262/94 para escórias de aciaria para pavimentos rodoviários estabelece um valor para massa unitária da escória de aciaria entre  $1500 \text{ kg/m}^3$  e  $1700 \text{ kg/m}^3$ , determinados pela NBR 7251/82 (DNIT, 1994; MACHADO, 2000; BALTAZAR, 2001). No Quadro 2.13, pode-se observar os valores de massa específica no estado solto de diferentes autores para as escórias de aciaria LD e Forno Elétrico (EAF) comparados com basalto, onde se podem observar valores entre  $1700 \text{ kg/m}^3$  e  $1920 \text{ kg/m}^3$ .

| Autores                    | Método de ensaio | Basalto | Escória de Aciaria EAF | Escória de Aciaria LD |
|----------------------------|------------------|---------|------------------------|-----------------------|
| <b>MAW (1979)</b>          | BS 812           | 1520    | 1720                   | 1700 a 1800           |
| <b>JONES et al. (1996)</b> | BS 812/1995      | 1520    | 1750                   | 1800                  |
| <b>HEATON (1996)</b>       | ASI 141.5        | -       | -                      | 1700                  |
| <b>BALTAZAR (2001)</b>     | NBR 7251         | -       | -                      | 1920                  |
| <b>PENA (2004)</b>         | NBR-7251         | -       | -                      | 1807                  |
| <b>DNER EM 262/1994</b>    | NBR-7251         | -       | 1500 a 1700            | 1500 a 1700           |

Quadro 2.13 - Valores de massa específica no estado solto ( $\text{kg/m}^3$ ) de alguns autores para basalto e escórias de aciaria LD e forno elétrico (EAF)

A única desvantagem da escória de aciaria relacionada à massa específica aparente seca no estado solto, cerca de 20% maior que materiais convencionais, é o aumento da carga de transporte (JUKES; THOMAS, s.d.; IBS, 1999).

#### 2.4.5 Absorção

É a capacidade de o material reter água nos poros, calculado como o aumento da massa do material, devido ao preenchimento dos poros permeáveis por água, expressa em porcentagem de sua massa seca, de acordo com a NBR 9937/87.

A especificação do DNIT-EM 262/94 para escórias de aciaria para pavimentos rodoviários estabelece uma absorção entre 1 e 2%, em massa (DNIT, 1994; MACHADO, 2000; BALTAZAR, 2001). No Quadro 2.14, são apresentados os valores de absorção de diferentes autores para as escórias de aciaria LD e Forno Elétrico (EAF) comparados com alguns tipos de materiais convencionais, onde se pode observar que as escórias de aciaria LD têm valores de absorção variando entre 0,2 e 4%.

| Autores                            | Método de ensaio | Basalto | Granito   | Pedra calcária | Escória de Aciaria EAF | Escória de Aciaria LD |
|------------------------------------|------------------|---------|-----------|----------------|------------------------|-----------------------|
| <b>GEISELER (1996)</b>             | prEN 1097-6      | <0,5    | 0,3 a 1,2 | -              | 0,2 a 1                | 0,2 a 1               |
| <b>JONES et al. (1996)</b>         | BS 812/1995      | 1,9     | -         | -              | 0,5                    | 0,9                   |
| <b>BALTAZAR (2001)</b>             | NBR 9937         | -       | -         | -              | -                      | 1,62                  |
| <b>MOTZ; GEISELER (2001)</b>       | prEN 1097-6      | -       | 0,5       | -              | 0,7                    | 1                     |
| <b>ASA (2002) fração miúda</b>     | AS1141.5         | -       | -         | -              | 2 a 4                  | 2 a 4                 |
| <b>ASA (2002) fração graúda</b>    | AS1141.6         | -       | -         | -              | 1 a 2                  | 1 a 2                 |
| <b>ROHDE (2002)</b>                | DNER-ME 081/1994 | -       | -         | -              | 1,8 a 2,9              | -                     |
| <b>MASLEHUDDIN et al. (2003)</b>   | ASTM C 127       | -       | -         | 2,2            | -                      | 0,85                  |
| <b>BRANCO (2004) fração graúda</b> | DNER-ME 081/98   | -       | -         | -              | 4,5                    | -                     |
| <b>PENA (2004)</b>                 | NBR-9937         | -       | -         | -              | -                      | 1,23                  |
| <b>DNER EM 262/1994</b>            | NBR-9937         | -       | -         | -              | 1 a 2                  | 1 a 2                 |

Quadro 2.14 - Valores de absorção (%) de alguns autores para algumas rochas e escórias de aciaria LD e Forno elétrico (EAF)

### 2.4.6 Abrasão *Los Angeles*

O material granular empregado na construção de pavimentos deve suportar os esforços de compactação e ação abrasiva causada pelo trânsito. A compactação e a ação abrasiva do trânsito originam cargas concentradas nos pontos de contato das partículas, sendo que nos materiais de granulometria aberta essas cargas são mais intensas devido ao número reduzido de pontos de contato. Nesses pontos de contato (concentração de esforços) haverá abrasão ou fratura que originam patologias no pavimento (PIZA, 1970).

Um ensaio utilizado para medir a abrasão dos materiais utilizados na construção de bases e sub-bases é o ensaio de abrasão *Los Angeles*, que permite determinar a abrasão sofrida pelo material, quando colocado na máquina *Los Angeles* juntamente com a carga abrasiva, formada por esferas de aço padronizadas. A abrasão é convencionalmente expressa pela porcentagem em massa do material, que, após o ensaio, passa pela peneira de malha 1,7 mm. Portanto, quanto maior o valor da abrasão *Los Angeles*, mais abrasão o material sofreu. O ensaio de abrasão *Los Angeles* é padronizado pela ABNT através da norma NBR NM 51:2000.

A especificação do DNIT-ES-303/97 de materiais para bases granulares estabelece que o material retido na peneira nº10 não deverá apresentar abrasão superior a 55%, quando submetido ao ensaio *Los Angeles*. E, a especificação DNIT-EM 262/94 referente às escórias de aciaria para pavimentos rodoviários estabelece um limite máximo de abrasão *Los Angeles* de 25% para escórias de aciaria utilizadas como sub-base, base e revestimento, determinada pela norma NBR NM 51:2000 (DNIT, 1994; MACHADO, 2000; BALTAZAR, 2001).

No Quadro 2.15 são apresentados os valores de abrasão *Los Angeles* segundo diferentes autores para as escórias de aciaria LD e Forno Elétrico (EAF) comparados com alguns materiais convencionais, onde se pode observar que as escórias de aciaria LD têm valores variando entre 14 e 20%, que são valores inferiores ao limite máximo de 25% estabelecido pela especificação DNIT-EM 262/94 para escórias de aciaria.

| Autores                   | Método de ensaio | Basalto | Pedra calcária | Escória de Aciaria EAF | Escória de Aciaria LD |
|---------------------------|------------------|---------|----------------|------------------------|-----------------------|
| JONES et al. (1996)       | ASTM C 131       | 13      | -              | 15                     | 14                    |
| MAW (1979)                | ASTM C 131       | 13      | -              | 15                     | 15                    |
| BALTAZAR (2001)           | NBR 6465         | -       | -              | -                      | 20                    |
| ASA (2002)                | AS1141.23        | -       | -              | 16                     | 12 a 18               |
| ROHDE (2002)              | DNIT-ME 035/94   | -       | -              | 36 a 43                | -                     |
| MASLEHUDDIN et al. (2003) | ASTM C 131       | -       | 40,44          | -                      | 18,46                 |
| PENA (2004)               | NBR NM 51/2000   | -       | -              | -                      | 13                    |

Quadro 2.15 - Valores de abrasão *Los Angeles* (%) segundo diferentes autores para algumas rochas e escórias de aciaria LD e Forno elétrico (EAF)

#### **2.4.7 CBR ou Índice de suporte Califórnia**

O ensaio de CBR (*California Bearing Ratio*) ou Índice de Suporte Califórnia (DNIT, 1964) é um ensaio empírico proposto inicialmente em 1920 para estimar a resistência e compressibilidade dos solos. Nesse ensaio, a resistência à penetração de um pistão rígido é medida, e as pressões correspondentes às penetrações de 2,5 mm e 5,0 mm são expressas em termos de percentagem de duas pressões padrão, sendo considerado, como valor do CBR, o maior dos dois (HIGHT; STEVENS, 1982; CERATTI; LOPES, 1985). O CBR é padronizado pela ABNT através da NBR 9895/1997.

Sabe-se que as escórias de aciaria têm altos valores de CBR, sendo alcançados valores superiores aos estabelecidos na especificação do DNIT-ES 303/97 de materiais para bases granulares, que é um CBR mínimo de 60% em rodovias com tráfego previsto para o período de projeto de número de repetições de passagem do eixo padrão (N) inferiores a  $5 \times 10^6$  e um CBR mínimo de 80% em rodovias com tráfego previsto para o período de projeto de N superiores a  $5 \times 10^6$ . Nagao et al. (1989) obtiveram um CBR para uma escória de aciaria LD compactada com energia de Proctor modificado igual a 168%. Rohde (2002) obteve valores de CBR variando entre 120% e 216% para seis amostras de escória de aciaria EAF de uma mesma siderúrgica nacional compactadas com energia do Proctor modificado.

#### **2.4.8 Módulo de resiliência**

Após pesquisas de campo realizadas para medição das deflexões dos pavimentos na Califórnia, Estados Unidos, Francis Hveem compreendeu que o trincamento progressivo dos revestimentos asfálticos tinha origem na fadiga do revestimento, devido à repetição de pequenas deformações resilientes. Hveem preferiu usar este termo ao invés de deformação elástica sob o argumento de que as deformações nos pavimentos são muito maiores do que nos sólidos elásticos como o concreto e o aço. Portanto, o termo deformação resiliente passou a significar a deformação recuperável dos pavimentos quando submetidos a carregamentos repetidos, isto, como uma forma de distingui-la daquelas que ocorrem em outras estruturas onde as cargas não são repetidas tão aleatoriamente quanto à frequência, duração e intensidade como a do tráfego de veículos (MEDINA, 1997; PINTO; PREUSSLER, 2002).

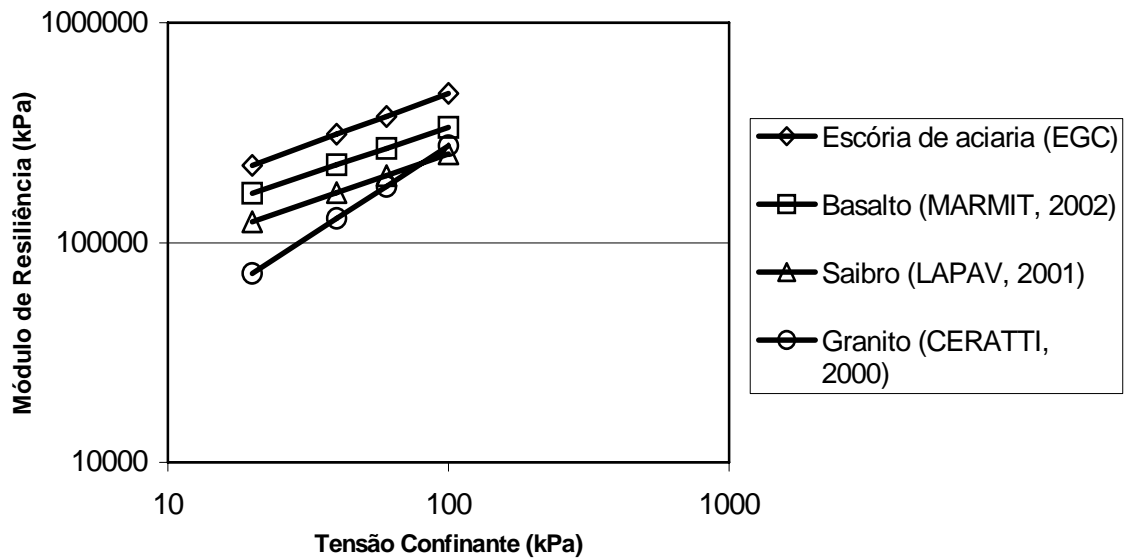
Logo, na abordagem mecanística do dimensionamento de pavimentos, o módulo de resiliência ou módulo resiliente passou a ser o parâmetro de projeto mais importante. A determinação do módulo de resiliência é feita em laboratório através do ensaio triaxial de carga repetida de curta duração e seu valor depende de uma série de fatores que variam com o tipo de material

analisado, condições climáticas, estado de tensões e outros (MEDINA, 1997; PINTO; PREUSSLER, 2002).

Na bibliografia consultada, ainda não existe um número muito grande de pesquisas que incluam o módulo de resiliência das escórias de aciaria. Apesar disso, serão apresentados a seguir os resultados de três pesquisas nacionais que investigaram o módulo de resiliência das escórias de aciaria.

Alvarenga (2001) analisou e comparou as propriedades resilientes e custos de pavimentos flexíveis utilizando escória de aciaria como base, onde a escória de aciaria utilizada era proveniente da Companhia Siderúrgica Nacional, localizada no município de Volta Redonda, Rio de Janeiro. Alvarenga (2001) utilizou o método de dimensionamento mecanístico baseado no módulo de resiliência e concluiu que a escória de aciaria estudada mostrou-se adequada para o uso como camada de base. O módulo de resiliência da escória de aciaria foi comparado com o de uma brita de pedreira e concluiu-se que o módulo foi muito parecido. Concluiu-se também, que o módulo de resiliência da escória de aciaria era pouco sensível à variação de umidade. Para a região investigada, e empreendimentos realizados até 120 km de distância do centro gerador de escória de aciaria, esse material além de atender às prescrições de ordem técnica, era economicamente vantajoso.

Em outra pesquisa, Rohde et al. (2003) investigaram as características resilientes de uma escória de aciaria de forno elétrico granulometricamente corrigida (EGC) para atender a faixa C do DNIT. Na Figura 2.3 são apresentados os resultados de módulo de resiliência desse material comparados aos módulos resiliência de uma brita de basalto (MARMIT, 2002), uma brita de granito (CERATTI, 2000) e de um saibro (LAPAV, 2001). Observa-se nessa Figura 2.3 que a escória granulometricamente corrigida (EGC) apresenta módulo de resiliência superior aos outros materiais granulares para qualquer nível de tensão confinante, o que comprova o seu excelente comportamento quanto a deformações elásticas. Segundo Rohde et al. (2003), tal diferença pode ser função da forma e da superfície rugosa do material, que garantiriam um maior intertravamento entre as partículas de escória de aciaria em relação aos materiais convencionais.



**Figura 2.3 - Módulos de resiliência da EGC e de materiais granulares convencionais (ROHDE et al., 2003)**

Parente et al. (2003) investigaram o comportamento mecânico de misturas de solo e escória de aciaria, a partir de resultados de ensaios triaxiais cíclicos (módulo de resiliência). Na Figura 2.4 são apresentados os módulos de resiliência de duas misturas de solo e escória de aciaria, comparados com misturas do mesmo solo com agregados convencionais oriundos do desmonte de rocha (brita).

A Figura 2.4 ilustra para esses materiais ensaiados a variação do módulo de resiliência com a tensão desvio<sup>11</sup>. Parente et al. (2003) optaram por essa apresentação, em razão do bom desempenho do modelo correspondente e por possibilitar a construção de um gráfico bi-dimensional. Deve-se destacar que o equipamento para a realização dos ensaios triaxiais cíclicos só permitiu a leitura de deslocamentos para tensões desvio cíclicas superiores a 100 kPa ou 0,1 MPa. Observa-se na Figura 2.4 que os valores de módulo de resiliência das misturas solo-escória foram superiores aos módulos obtidos para misturas solo-brita e solo sem agregado para qualquer nível de tensão desvio. Segundo Parente et al. (2003), esse comportamento pode ser justificado pela rugosidade ou aspereza da escória de aciaria proporcionar um maior intertravamento da mistura. Observou-se também que os módulos de resiliência decrescem com o aumento da tensão desvio em todas as misturas analisadas (PARENTE et al., 2003).

<sup>11</sup> Diferença entre tensões principais ou  $(\sigma_1 - \sigma_3)$

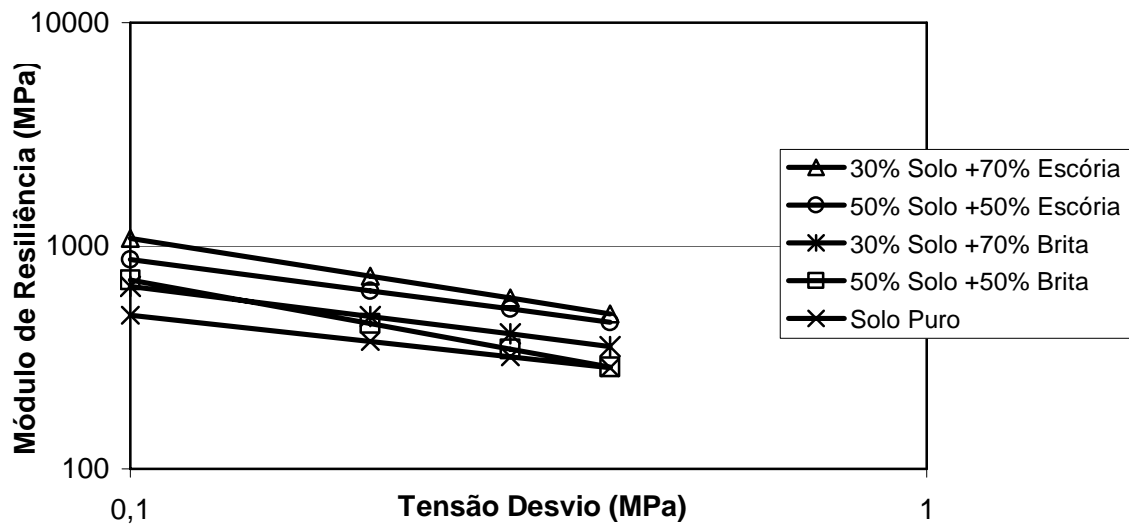


Figura 2.4 - Módulo de resiliência para misturas solo-escória, solo-brita e solo puro (PARENTE et al., 2003)

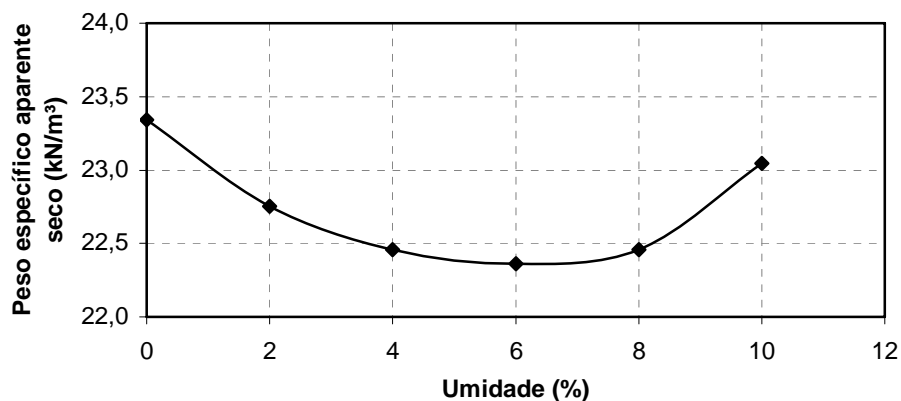
## 2.5 Características de compactação da escória de aciaria

A compactação é entendida como ação mecânica por meio da qual se impõe ao solo ou material particulado uma redução do índice de vazios. O efeito da compactação resulta na alteração das propriedades mecânicas e hidráulicas do material, entre elas, o acréscimo de resistência ao cisalhamento e a redução da compressibilidade e da permeabilidade.

Nos ensaios de compactação, para uma dada energia, são determinadas as relações entre teores de umidade e pesos específicos aparentes secos de um determinado tipo de solo. A umidade ótima é aquela em que se obtém o máximo peso específico aparente seco de um solo sob uma determinada energia de compactação. Esta relação é nítida e única no caso de solos coesivos, mas no caso de solos granulares, como areia limpa, tal umidade ótima não é definida. A escória de aciaria é um material granular, não coesivo, e, portanto, é de se suspeitar que não exiba umidade ótima.

Num estudo realizado por Heaton (1989) em trechos de pavimentos experimentais, usando escória de aciaria e misturas com escória de aciaria, foram feitos ensaios de compactação com energias do Proctor normal ( $600 \text{ kJ/m}^3$ ) e do Proctor modificado ( $2700 \text{ kJ/m}^3$ ). Entretanto observou-se uma variação de apenas 6% no peso específico aparente seco correspondente à umidade ótima, nos dois tipos de ensaios. Utilizando a energia do Proctor normal, o peso específico aparente seco foi igual a  $23,2 \text{ kN/m}^3$  e do Proctor modificado, foi igual a  $24,6 \text{ kN/m}^3$ . O aumento de 6% no peso específico aparente seco não foi tão significativo quanto o aumento de peso específico alcançado em solos argilosos.

Machado (2000) executou o ensaio de compactação em uma escória de aciaria LD com energia do Proctor normal e observou um comportamento semelhante a um solo arenoso e com variação de apenas 4% entre o máximo peso específico aparente seco ( $23,3 \text{ kN/m}^3$ ) e o mínimo ( $22,4 \text{ kN/m}^3$ ), como pode ser observado na Figura 2.5. Segundo Machado (2000), essa diferença de 4% não foi muito representativa e a umidade ótima adotada foi de 6%, somente por questões de trabalhabilidade do material. Os corpos-de-prova com umidades inferiores a 6% apresentaram elevada pulverulência e os com umidades superiores a 6% não conseguiam mais reter água, ocorrendo drenagem de água através do molde cilíndrico.



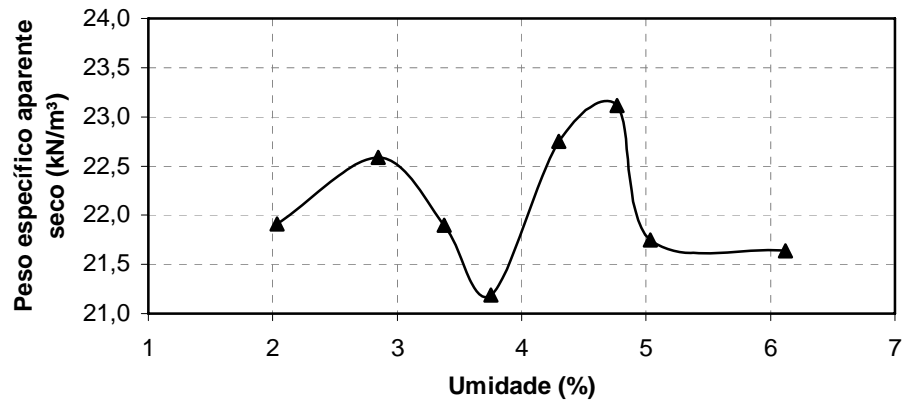
**Figura 2.5 - Curva de compactação da escória de aciaria LD (MACHADO, 2000)**

Masuero et al. (2000) executaram o ensaio de compactação numa escória de aciaria EAF com dois anos e meio de idade e definiram uma umidade ótima de 9%, mas não mostraram as curvas de compactação.

Baltazar (2001) executou ensaio de compactação numa escória de aciaria LD da empresa Açominas, localizada no município de Ouro Branco, Minas Gerais, e encontrou uma umidade ótima de 8 %, mas também não apresentou as curvas de compactação.

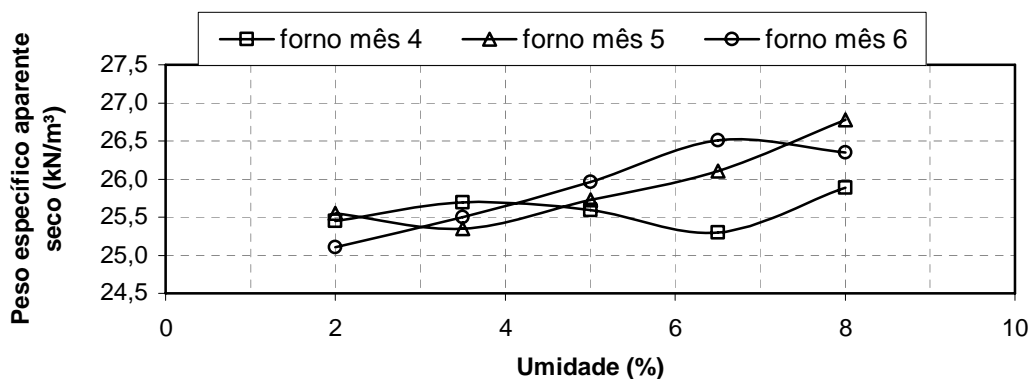
Rohde (2002) executou um ensaio de compactação com energia do Proctor modificado numa escória de aciaria EAF produzida na região metropolitana de Porto Alegre. Com a granulometria original, Rohde (2002) obteve curvas de compactação com formas “irregulares”, apresentando dois picos bem definidos, como pode ser observado na Figura 2.6. Supõe-se que a forma “regular” seria a de uma curva de compactação de solo coesivo. Segundo a mesma pesquisadora, a umidade ótima seria 4,76%, correspondente ao máximo valor de peso específico aparente seco, porém após a realização do ensaio CBR, nos corpos-de-prova do ensaio de compactação, observou-se que o maior valor do CBR não correspondia à umidade ótima, nem aproximadamente (ROHDE, 2002).





**Figura 2.6 - Curva de compactação da escória de aciaria EAF (ROHDE, 2002)**

Na mesma pesquisa, Rohde (2002) após observar valores de CBR inferiores aos esperados, resolveu corrigir granulometricamente a escória de aciaria EAF para que se enquadrasse na faixa C do DNIT. A seguir, executaram-se novos ensaios de compactação com energia do Proctor modificado na escória granulometricamente corrigida (EGC). Os resultados encontrados por Rohde (2002), nos ensaios de compactação da EGC, impossibilitaram a determinação do peso específico aparente seco máximo e da umidade ótima, pois as curvas não apresentaram uma forma típica de solos coesivos, como mostrado na Figura 2.7. A ocorrência de diferentes formatos das curvas de compactação não foi explicada e sugeriu-se que a questão fosse explorada em estudos futuros. Para definir a umidade de moldagem, optou-se por seguir o critério de trabalhabilidade do material, sendo a umidade definida como a máxima umidade possível sem causar a drenagem de água pelo molde e perda de material fino. Essa umidade foi de  $5 \pm 0,2\%$  para todas as amostras, apesar de Rohde (2002) afirmar que a curva de compactação da amostra curada por 6 meses (forno mês 6) apresentou a forma típica de solos coesivos (Figura 2.7).



**Figura 2.7 - Curvas de compactação da escória EGC estocadas por 4, 5 e 6 meses (ROHDE, 2002)**

Branco (2004) executou ensaios de compactação com energia do Proctor modificado numa escória de aciaria EAF com granulometria modificada para que o corpo-de-prova pudesse ser moldado, o que não foi conseguido com o material no estado original. Nas duas primeiras tentativas do ensaio de compactação foram encontradas curvas de compactação com formatos, ditos, “não característicos” (Figura 2.8). No presente estudo, se entendeu que formato “característico” seria uma curva de compactação típica de solos coesivos.

Nesse mesmo trabalho de Branco (2004), para que a curva de compactação dessa amostra de escória de aciaria apresentasse formato “característico”, os valores obtidos na terceira tentativa foram “interpolados” e a curva foi “manipulada” para apresentar um ramo ascendente e outro descendente, além de um pico dito bem definido (Figura 2.9). A umidade ótima de compactação foi de 6,4%, correspondente ao maior peso específico aparente seco,  $24,7 \text{ kN/m}^3$ . Não foi descrito como foi feita a manipulação dos dados para se encontrar a curva da Figura 2.9 e não se descreveu drenagem de água durante a compactação no trabalho Branco (2004). Além disso, é contraditório que a maioria dos pesos específicos entre 24 e  $26,7 \text{ kN/m}^3$  obtidos nas tentativas 1 e 2 (Figura 2.8), sejam maiores que o máximo peso específico aparente seco ( $24,7 \text{ kN/m}^3$ ) obtido na curva “manipulada” (Figura 2.9).

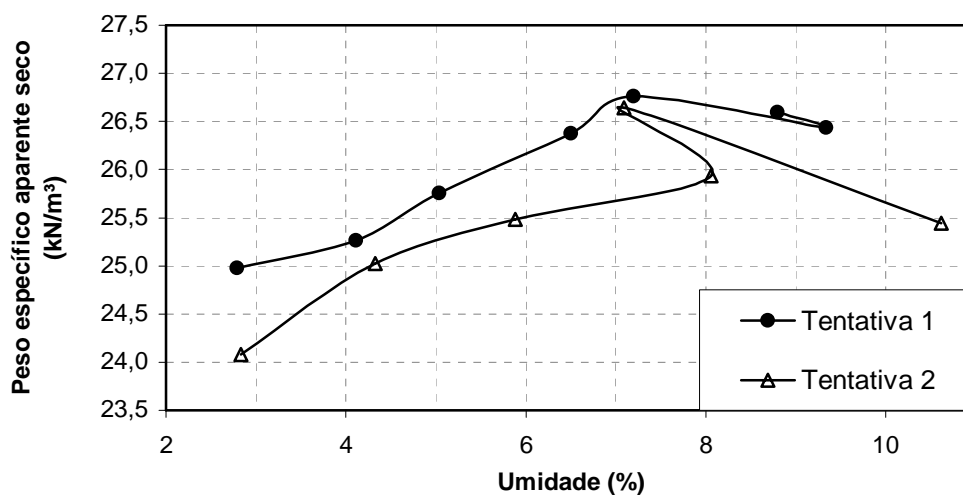
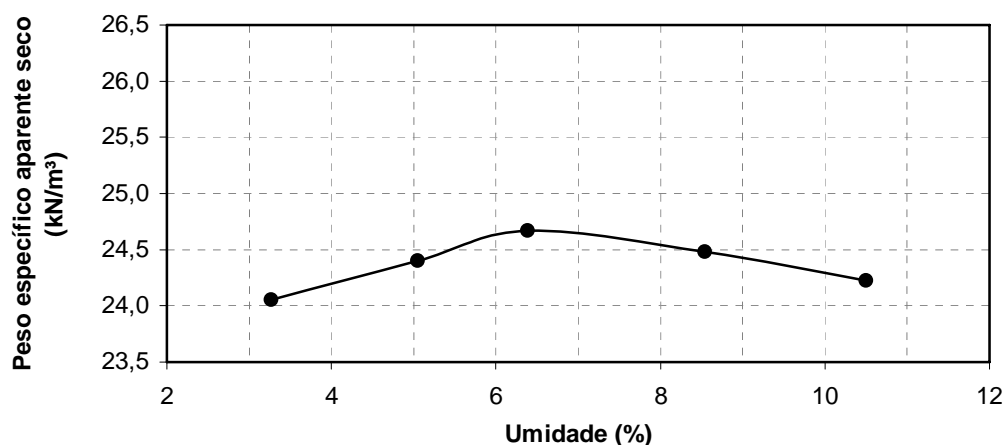


Figura 2.8 - Curvas de compactação da escória de aciaria, tentativas 1 e 2 (BRANCO, 2004)



**Figura 2.9 - Curva de compactação “manipulada” da escória de aciaria, tentativa 3 (BRANCO, 2004)**

Através da revisão de literatura feita sobre as características de compactação das escórias de aciaria, observou-se que há uma contradição sobre a umidade ótima do material. Autores, como Masuero et al. (2000) e Baltazar (2001), apenas citam a umidade ótima, não mostrando as curvas de compactação. Porém, autores, como Machado (2000) e Rohde (2002), encontraram curvas de compactação diferentes das curvas de solos coesivos e adotaram uma umidade de moldagem por questão de trabalhabilidade do material. E, existe também o trabalho de Branco (2004), que apesar de ter encontrado curvas de compactação diferentes dos solos coesivos, “manipulou” os dados para encontrar uma curva típica e uma umidade ótima.

## **2.6 Características e métodos de determinação da expansão da escória de aciaria**

Para viabilizar a utilização da escória de aciaria em pavimentos, é imprescindível assegurar a estabilidade volumétrica *in situ*. Por esse motivo, as normas rodoviárias DNIT-PRO 263/94 e EM 262/94 prescrevem que a expansão da escória de aciaria para uso em pavimentos rodoviários não deve ser superior a 3%, determinada pelo Método PTM 130/78, desenvolvido pelo Departamento de Transportes da Pensilvânia e adaptado pelo DMA-1/DER-MG/82.

A norma NBR 11804/91 de aplicabilidade geral e não específica para escórias de aciaria, tomada como referência para a norma DNIT-PRO 263/94, específica na utilização em pavimentos que o material não deve ter expansão superior a 1% em sub-bases e a 0,5% em bases. Porém, essa expansão é obtida através da fase de imersão em água do ensaio CBR que tem uma duração de 4 dias e a amostra é imersa em água a temperatura ambiente,

diferentemente dos ensaios de expansão específicos para escória de aciaria que utilizam água aquecida e maiores períodos de imersão.

Numa pesquisa realizada sobre os requisitos para utilização da escória de aciaria, Farrand e Emery (1995) identificaram quatro agências com significativa experiência no uso de escória de aciaria e em ensaios estabelecidos para medir a expansão volumétrica devido à cal livre. Essas agências são listadas no Quadro 2.16, onde se observa, também, os ensaios e alguns dos critérios utilizados para avaliar a expansão das escórias de aciaria em cada agência.

| <b>Especificação</b>      | <b>Pensilvânia</b> | <b>Bélgica</b> | <b>Alemanha</b> | <b>Japão</b>   |
|---------------------------|--------------------|----------------|-----------------|----------------|
| <b>Cal livre</b>          | Não                | Sim (<4,5%)    | Não             | Não            |
| <b>Impurezas</b>          | Não                | Não            | Sim             | Não            |
| <b>Cura ao ar</b>         | Sim (>6 meses)     | Sim            | Não             | Sim (>3 meses) |
| <b>Ensaio de expansão</b> | Sim                | Sim            | Sim             | Sim            |

**Quadro 2.16 - Ensaio de materiais requeridos pelas agências chave no uso de escória de aciaria (FARRAND; EMERY, 1995)**

Dentre as agências analisadas, apenas a Bélgica utiliza um ensaio para determinação da quantidade de cal livre da escória de aciaria que tem um limite máximo de 4,5% para a utilização em pavimentação. Quanto à análise de impurezas, apenas a Alemanha realiza algum tipo de ensaio para verificar se existe a contaminação da escória de aciaria. Na maioria das agências exige-se um período mínimo de cura ao ar ou período de estocagem antes da utilização da escória de aciaria. Apesar das diferentes exigências sobre os requisitos para utilização da escória de aciaria, existe um consenso que é necessário algum tipo de ensaio de expansão para se avaliar a escória de aciaria.

Farrand e Emery (1995) recomendam três ensaios para avaliação da qualidade da escória de aciaria:

- o ensaio petrográfico para avaliar a contaminação da escória de aciaria por outras partículas;
- o ensaio de ruptura em autoclave, que é um ensaio acelerado, com duração igual a uma hora, para dar uma informação rápida sobre a expansão volumétrica da escória de aciaria, e;
- o ensaio de expansão (ASTM D 4792/00), no qual a amostra fica imersa sete dias em água quente, sendo a expansão dada pela variação de altura da amostra.

Tais ensaios são recomendados para dar uma melhor indicação das características e propriedades da escória de aciaria para uso pavimentação. Métodos de análise química, como o de determinação de cal livre, são de difícil execução e dão somente uma medida indireta da qualidade da escória de aciaria, sendo que boa parte deles não são voltados para a área de pavimentação (FARRAND; EMERY, 1995).

Para o uso em pavimentação, destacam-se os métodos de ensaio de expansão que utilizam amostras compactadas de acordo com um ensaio de compactação de solos, como os métodos da norma PTM-130/78, da norma japonesa JIS A 5015/92 e da norma americana ASTM D 4792/00. Nessas normas, utilizam-se corpos-de-prova cilíndricos e as medidas de expansão são feitas com o material imerso em água quente, para acelerar as reações, e calculadas em função do aumento da altura (MASUERO et al., 2000; MACHADO, 2000).

O método de ensaio PTM-130/78 do Departamento de Transportes da Pensilvânia, 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 diária de água. A temperatura é mantida em  $71 \pm 3^\circ\text{C}$  dentro de uma estufa, e as medidas de expansão são feitas por mais 7 dias nesta condição. A porcentagem de expansão total é igual à variação de altura do corpo-de-prova após os 14 dias. Este método considera que alguns materiais podem expandir mais rapidamente na condição saturada que em condição submersa (KAMDHAL; HOFFMAN, 1997).

A norma JIS (*Japanese Industrial Standard*) A 5015/92 especifica um método e critérios de ensaios de expansão para escórias de aciaria. O ensaio consiste na moldagem de corpos-de-prova cilíndricos de escória de aciaria, compactados na umidade ótima estabelecida no ensaio de compactação. Durante o ensaio, os corpos-de-prova são submersos em água e sujeitos a ciclos diários, por período de 6 horas, de aquecimento a uma temperatura de  $80^\circ\text{C}$ . Medindo-se diariamente a variação da altura do corpo-de-prova.

O método ASTM D 4792/00 (*Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions*) consiste na imersão de corpos-de-prova cilíndricos, compactados na umidade ótima, em água à temperatura de  $70 \pm 3^\circ\text{C}$ . Após a imersão, fazem-se medições diárias da variação de altura do corpo-de-prova por no mínimo 7 dias.

Todos os três métodos de expansão citados anteriormente recomendam que se utilizem três corpos-de-prova para a determinação da expansão, apesar da sabida heterogeneidade das escórias de aciaria. Além da quantidade de corpos-de-prova, podem-se avaliar os limites de expansão máxima para cada um dos três ensaios estudados, onde as normas rodoviárias brasileiras DNIT-PRO 263/94 e EM 262/94 prescrevem que a expansão determinada pelo método PTM 130/78 não deve ser superior a 3% para escórias de aciaria utilizadas em pavimentos rodoviários. No caso do método da norma japonesa JIS A 5015/92, a própria norma estabelece o limite máximo da expansão em 2% determinado aos 10 dias de ensaio. Para o método ASTM D 4792/00, a norma americana ASTM D 2940/03 especifica que os materiais para bases e sub-bases de rodovias e aeroportos sujeitos à hidratação, tais como escórias de aciaria, não devem ter uma expansão superior a 0,5% determinada aos 7 dias de ensaio. Porém, nenhuma das normas estabelece um critério claro para aceitação ou rejeição dos lotes de escória de aciaria devido à expansão dos referidos métodos de ensaio.

Os ensaios de expansão citados anteriormente serão mais bem detalhados no item 3.5 - Métodos de determinação da expansão.

Os ensaios de expansão de amostras compactadas, apesar de serem bastante utilizados, são alvos de alguns questionamentos. Machado (2000) comenta que os métodos que têm como base o ensaio de compactação, com penetração de água no material, além de serem lentos e serem de difícil execução, possuem grande dispersão de resultados, o que seria atribuído à diversidade de condições experimentais dos métodos de ensaio e à grande heterogeneidade do material. No entanto, tal dispersão parece ser oriunda do material em si e Machado (2000) não propõe alternativa.

É sabido que os corpos-de-prova do ensaio de compactação apresentam vazios, e que tal característica varia de acordo com o grau de compactação e com a granulometria utilizada para o ensaio, entre outros fatores. Para isso, deve-se estudar a influência desses fatores nos ensaios de expansão, que deve ser feito como uma simulação aproximada das condições de trabalho do pavimento, como grau de compactação, granulometria e sobrecargas.

Apesar das críticas aos ensaios de expansão de escória de aciaria de amostras compactadas, esses são utilizados por vários autores, tais como Emery (1984), Farrand e Emery (1995), Kandhal e Hoffman (1997) e Machado (2000), entre outros.

Devido à heterogeneidade da escória de aciaria, função das características peculiares a cada processo de geração de diferentes tipos de aço em cada siderúrgica, é bastante complexa a

comparação de resultados de ensaio de expansão de diferentes lugares e materiais. No entanto, todas as técnicas utilizadas comprovam a instabilidade dimensional das escórias de aciaria e a necessidade de critérios mais rígidos de avaliação do fenômeno.

### 3. MÉTODOS E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo tem por objetivo apresentar a produção da escória de aciaria deste estudo, identificar as amostras e o processo de amostragem realizados, além de apresentar as metodologias utilizadas para os ensaios de caracterização, compactação, expansão e para os ensaios adicionais deste estudo.

A escória de aciaria LD utilizada neste estudo foi gerada por uma siderúrgica da região metropolitana de Vitória, Espírito Santo, onde foram realizados todos os processamentos iniciais e o tratamento por molhagem e revolvimento, conforme detalhado no item 3.1.

#### 3.1 Produção da escória de aciaria LD analisada neste estudo

Para avaliar a escória de aciaria LD da siderúrgica, foram coletadas e submetidas à caracterização três amostras<sup>12</sup> de uma escória de aciaria provenientes de um mesmo lote, submetidas a diferentes períodos de tratamento.

O lote de escória de aciaria foi formado a partir de 421 corridas de aço, produzidas em 9 dias consecutivos, basculadas em baias (Figura 3.1a) e resfriadas com jatos de água (Figura 3.1b).



(a)



(b)

**Figura 3.1 - Geração da escória de aciaria LD do estudo: (a) lançamento da escória de aciaria nas baias de resfriamento; (b) resfriamento da escória de aciaria com jato de água**

Após o resfriamento nas baias, a escória de aciaria foi transportada para um pátio descoberto (Figura 3.2a) e depois de 8 dias sofreu recuperação metálica<sup>13</sup>, britagem e peneiramento (Figura 3.2b), para ficar com uma granulometria de 0 a 19 mm. Como a quantidade do lote de

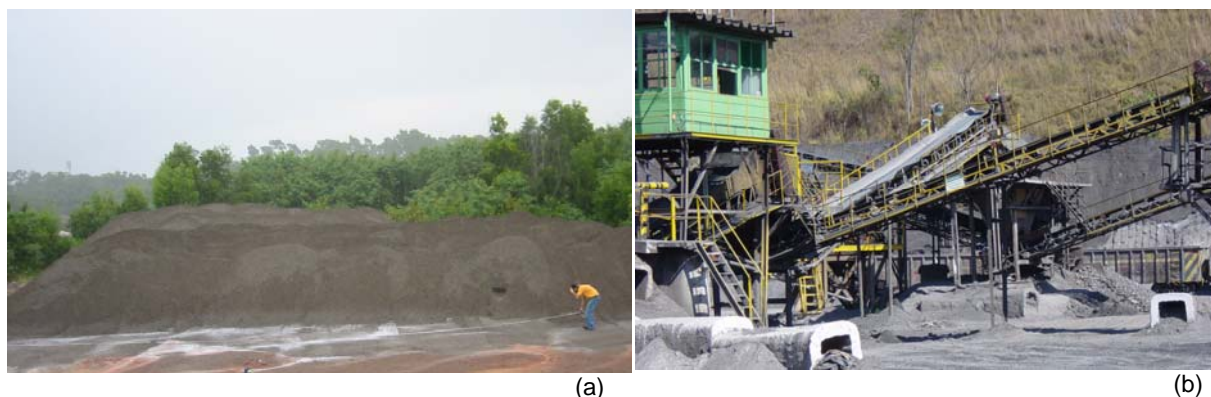
---

<sup>12</sup> A palavra amostra será sempre definida neste estudo como o material proveniente de uma amostragem do lote de escória de aciaria LD do estudo. Por esse motivo, não será usada a palavra amostra para definir a quantidade de repetições de determinado ensaio.

<sup>13</sup> Na recuperação metálica, aproximadamente 30% da escória de aciaria com maior teor de ferro retorna para aproveitamento nos processos siderúrgicos.



escória de aciaria era muito grande, estimada em 2800 toneladas, esse processo de britagem e peneiramento levou 7 dias para ser concluído.



**Figura 3.2 - Estocagem e processamento da escória de aciaria do estudo: (a) estocagem da escória de aciaria em pátio descoberto; (b) planta de britagem, separação magnética e granulométrica**

Após um período de 2 meses de estocagem ao ar e com um lote estimado de 2800 toneladas de escória de aciaria LD, foi feito um procedimento de amostragem, descrito no item 3.2, que resultou em uma amostra representativa de 1200 kg. Essa amostra de escória de aciaria LD foi chamada neste trabalho de amostra *não tratada*.

Posteriormente à primeira amostragem, o restante do lote de escória de aciaria foi estocado ao ar no pátio da siderúrgica durante mais 2 meses e meio, e depois passou por um tratamento de molhagem e revolvimento do material por um período adicional de 1 mês. Após o tratamento, que visa reduzir os níveis de expansão a valores aceitáveis, foi feita a segunda amostragem, também descrita no item 3.2, onde foi coletada uma amostra representativa de 1200 kg, que foi chamada de amostra *tratada 1*.

Após terem passado quatro meses e meio de estocagem ao ar desde a coleta da amostra *tratada 1*, verificou-se que essa amostra não atendeu ao requisito expansão, e então, o mesmo lote de escória de aciaria foi tratado por um período adicional de 2 meses para alcançar uma expansão dentro dos níveis aceitáveis. Após a segunda etapa de tratamento, realizou-se uma nova amostragem, coletando-se uma amostra representativa de 1200 kg, que foi chamada de amostra *tratada 2*.

As datas de geração, amostragem, período de estocagem ao ar e período de tratamento das amostras de escória de aciaria analisadas nesta pesquisa são mostradas no Quadro 3.1.

O tratamento utilizado na escória de aciaria LD deste trabalho foi feito com molhagem e revolvimento do material, buscando a hidratação dos elementos instáveis, principalmente a cal livre e o óxido de magnésio livre, para reduzir os níveis de expansão a valores inferiores ao

máximo de 3% estabelecido pelas normas rodoviárias DNIT-PRO 263/94 e DNIT-EM 262/94 determinados pelo método PTM-130/78. Esse tratamento, utilizado na escória de aciaria LD deste estudo, foi patenteado pela siderúrgica do estudo.

| Amostra     | Data de geração         | Data das amostragens | Período acumulado de estocagem ao ar | Período acumulado de tratamento |
|-------------|-------------------------|----------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Não tratada | 31/08/2003 a 08/09/2003 | 11/11/2003           | 2 meses                              | -                               |
| Tratada 1   |                         | 17/02/2004           | 4,5 meses                            | 1 mês                           |
| Tratada 2   |                         | 31/08/2004           | 9 meses                              | 3 meses                         |

**Quadro 3.1 - Identificação, geração e amostragem das amostras de escória de aciaria LD do estudo**

No tratamento utilizado, a escória de aciaria LD foi espalhada num pátio aberto com o auxílio de uma moto niveladora, ficando com uma altura máxima de 0,5 m, e a molhagem foi feita com o auxílio de caminhões tanque utilizando bicos aspersores (Figura 3.3).



**Figura 3.3 - Molhagem da escória de aciaria LD do estudo durante o tratamento utilizado**

Além da molhagem, também foi feito o revolvimento diário do material, com o auxílio de uma moto niveladora, para que o tratamento fosse o mais uniforme possível (Figura 3.4).



**Figura 3.4 - Revolvimento da escória de aciaria LD do estudo durante o tratamento utilizado**

### **3.2 Amostragem da escória de aciaria LD analisada neste estudo**

O processo de amostragem da escória de aciaria LD foi realizado na siderúrgica em estudo de acordo com procedimentos de amostragem especialmente elaborados para cada amostra deste estudo. Esses procedimentos foram feitos, de acordo com as seguintes normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR NM 26:2001 - Amostragem de agregados e NBR 10007:2004 - Amostragem de resíduos sólidos, já que não existe norma específica para amostragem da escória de aciaria.

A amostragem é tão importante quanto o ensaio, por isto, devem ser tomadas todas as precauções necessárias para que se obtenha amostras representativas quanto às suas naturezas e características (NBR NM 26/2001).

A metodologia da amostragem foi dividida em quatro partes, sendo que as três primeiras referem-se às amostragens feitas na usina siderúrgica do estudo correspondente às três amostras deste estudo: não tratada; tratada 1 e; tratada 2. E a quarta parte refere-se ao procedimento de redução de amostras de campo, realizado no laboratório, que foi igualmente realizado para as três amostras deste estudo.

Os procedimentos de amostragem das três amostras utilizadas neste estudo foram bastante semelhantes, porém, como a disposição ou formato do lote de escória de aciaria mudou durante as amostragens, os três procedimentos tiveram que ser adequados aos formatos encontrados na siderúrgica e foram descritos em separado neste estudo. O lote de escória de aciaria LD deste estudo durante o procedimento de amostragem: da amostra não tratada foi disposto na forma de 112 montes de descarregamento de caminhões; da amostra tratada 1 foi disposto na forma de um retângulo com dimensões de 100 m por 35 m e uma altura média de 0,4 m; e, da amostra tratada 2 foi disposto em duas áreas de formato irregular com 242 m<sup>2</sup> e 2847 m<sup>2</sup> e altura variando de 0,3 a 0,4 m.

#### **3.2.1 Amostra não tratada**

A amostragem foi realizada no lote de escória de aciaria LD formado por sucessivos descarregamentos de caminhões referentes a nove dias de produção de escória de aciaria, totalizando 112 montes de descarregamento e uma massa total estimada em 2800 toneladas, conforme Figura 3.5. A partir dos 112 montes de descarregamento, foram amostrados 66 montes escolhidos aleatoriamente, sendo que foi retirada de cada monte, com o auxílio de uma pá (Figura 3.6a), uma amostra parcial abrangendo toda a altura e profundidade do monte (Figura 3.6b), resultando em aproximadamente 50 kg por monte. Após a retirada de cada amostra parcial, estas foram dispostas numa superfície plana e dura para formarem um monte



que foi homogeneizado e auxiliou a formação de uma pilha tronco-cônica de aproximadamente 3300 kg que sofreu um quarteamento. Após a realização da amostragem, a amostra não tratada foi enviada à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) acondicionada em três tonéis de 0,2 m<sup>3</sup> devidamente lacrados e identificados. Um resumo do procedimento de amostragem da amostra não tratada pode ser observado na Figura 3.7.



**Figura 3.5 - Formato do lote de escória de aciaria LD do estudo em 112 montes de descarregamento**

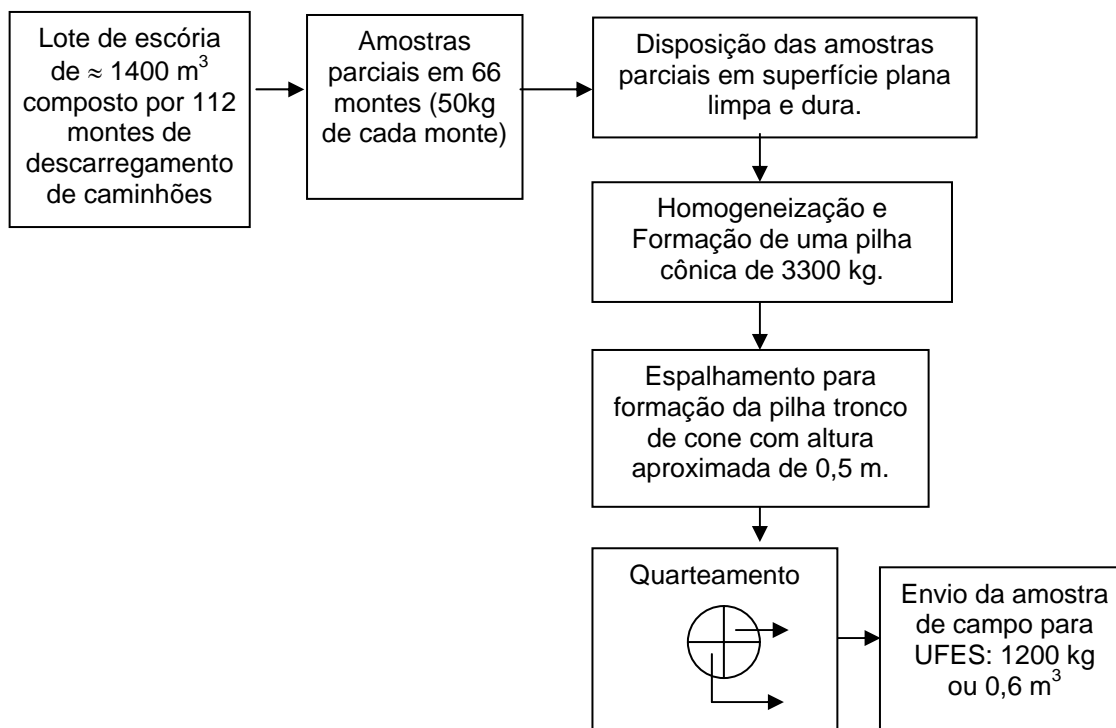


(a)



(b)

**Figura 3.6 - Etapas da amostragem da escória de aciaria LD não tratada: (a) retirada da amostra parcial com pá; (b) retirada das amostras parciais em vários pontos dos montes de descarregamento**



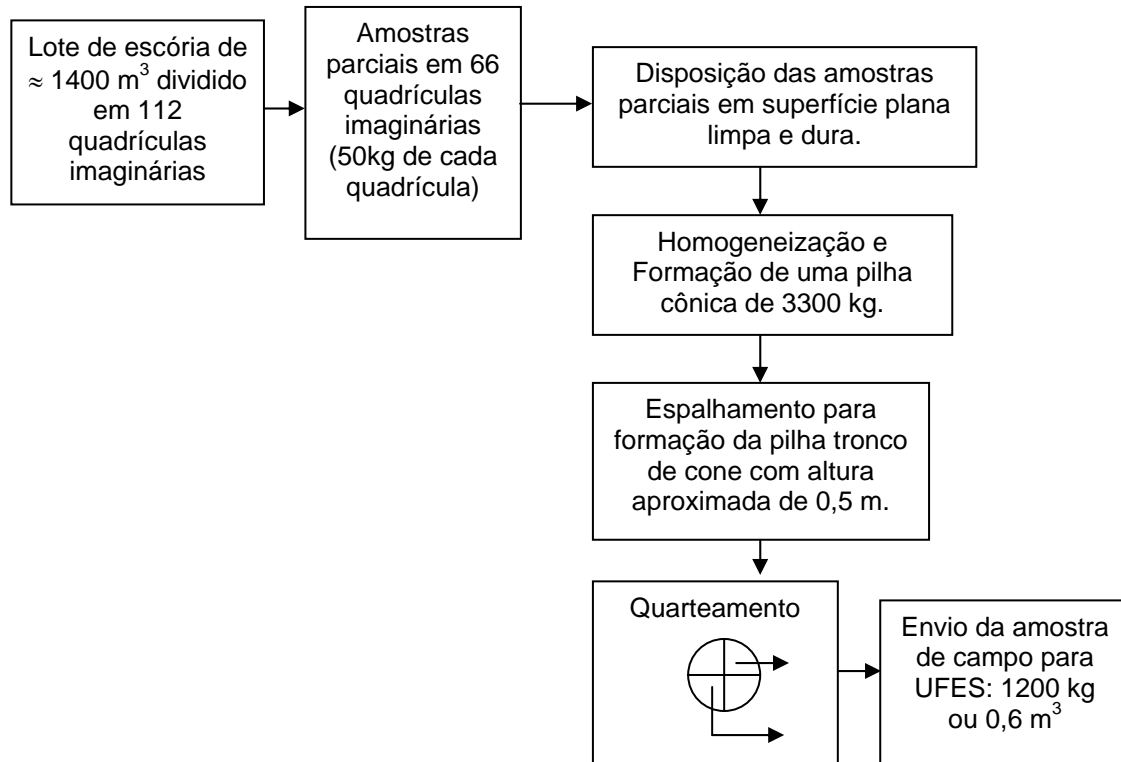
**Figura 3.7 - Resumo do procedimento de amostragem da amostra de escória de aciaria LD não tratada (SILVA et al., 2005)**

### 3.2.2 Amostra tratada 1

O saldo do lote de escória de aciaria, remanescente na siderúrgica, foi tratado durante um mês, conforme procedimento da siderúrgica, com massa aproximada de 2800 toneladas e dimensões de 100 m x 35 m x 0,4 m. Para realização da amostragem da escória de aciaria tratada 1, este volume foi dividido em 112 quadrículas imaginárias, para simular os 112 montes da primeira amostragem. Deste total, foram amostradas 66 quadrículas escolhidas aleatoriamente, sendo que foi retirada de cada quadrícula, com o auxílio de pá e carrinho de mão, uma amostra parcial de 50 kg abrangendo toda a área e espessura da mesma (Figura 3.8a), o procedimento de amostragem está sintetizado no esquema da Figura 3.9. Após a retirada de cada amostra parcial, essas foram dispostas numa superfície plana e dura (Figura 3.8b) para formarem um monte que foi homogeneizado com o auxílio de uma retro-escavadeira (Figura 3.8c). Também com o auxílio de uma retro-escavadeira, formou-se uma pilha tronco-cônica de aproximadamente 3300 kg que foi dividida em quatro partes iguais (Figura 3.8d). Destas quatro partes, duas partes opostas da pilha foram colocadas em tonéis metálicos de 0,2 m<sup>3</sup> de capacidade (Figura 3.8e) que foram devidamente lacrados, identificados e enviados à UFES (Figura 3.8f).



**Figura 3.8 - Etapas da amostragem da escória de aciaria LD tratada 1 e tratada 2: (a) retirada da amostra parcial; (b) formação da pilha cônica através das amostras parciais; (c) homogeneização e formação da pilha cônica; (d) quarteamento da pilha tronco-cônica; (e) retirada das partes opostas para colocação nos tonéis; (f) tonéis lacrados e identificados para serem enviados à UFES**



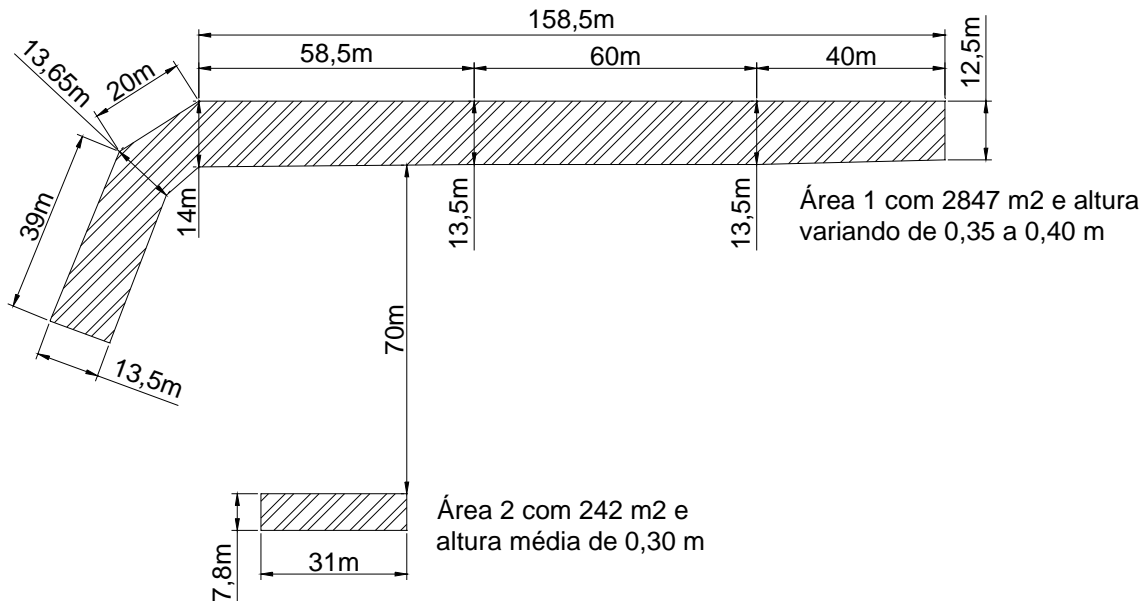
**Figura 3.9 - Resumo do procedimento de amostragem das amostras de escória de aciaria LD tratada 1 e tratada 2 (SILVA et al., 2005)**

### 3.2.3 Amostra tratada 2

O saldo do lote de escória de aciaria, remanescente da segunda amostragem, permaneceu estocado por quatro meses, e em seguida, foi novamente submetido a um tratamento por um período adicional de dois meses, conforme procedimento da siderúrgica. O volume aproximado de 1400 m<sup>3</sup> estava disposto em dois setores na forma de leiras, conforme Figura 3.10. Esses dois setores foram divididos em 112 quadrículas imaginárias, sendo a maior área dividida em 104 quadrículas com dimensões médias de 6 m por 4 m, conforme a Figura 3.11, e a menor área dividida em 8 quadrículas com dimensões médias de 7 m por 4 m, conforme a Figura 3.12. Assim como na amostra tratada 1, do total de 112 quadrículas imaginárias, foram amostradas 66 quadrículas escolhidas aleatoriamente, sendo que foi retirada de cada quadrícula, com o auxílio de pá e carrinho de mão, uma amostra parcial de 50 kg abrangendo toda a área e espessura da mesma (Figura 3.8a). Após a retirada de cada amostra parcial, estas foram dispostas numa superfície plana e dura (Figura 3.8b) para formarem um monte que foi homogeneizado com o auxílio de uma retro-escavadeira (Figura 3.8c) que também auxiliou a formação de uma pilha tronco-cônica de aproximadamente 3300 kg que foi dividida em quatro partes iguais (Figura 3.8d). Destas quatro partes, duas partes opostas da pilha foram colocadas em tonéis metálicos de 0,2 m<sup>3</sup> de capacidade (Figura 3.8e) que foram devidamente



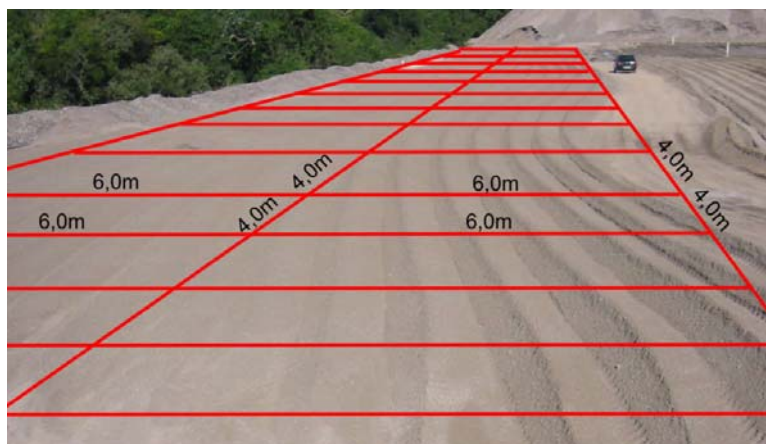
lacrados, identificados e enviados à UFES (Figura 3.8f). O procedimento de amostragem da amostra tratada 2, assim como a amostra tratada 1, está sintetizado na Figura 3.9.



**Figura 3.10 - Planta baixa sem escala das duas áreas de escória de aciaria LD, utilizados durante a coleta da amostra tratada 2, com um volume aproximado de 1400 m<sup>3</sup>**

Após a realização da amostragem, a amostra tratada 2 foi enviada à UFES acondicionada em três tonéis de 0,2 m<sup>3</sup> devidamente lacrados e identificados.

Para todas as amostras deste estudo, após a homogeneização e quarteamento, foram feitos, adequadamente, o acondicionamento, identificação e transporte até a UFES.



**Figura 3.11 - Esquema representativo das quadrículas sobre o setor 1 - 104 quadrículas**



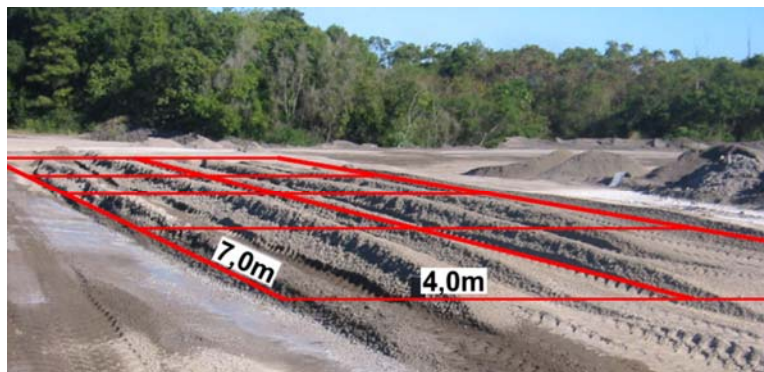


Figura 3.12 - Esquema representativo das quadriculas sobre o setor 2 - 8 quadriculas

### 3.2.4 Redução da amostra de campo no laboratório

Após os procedimentos de amostragem das três amostras de escória de aciaria LD deste estudo, foi realizada a redução de amostra de campo para ensaios de laboratório, conforme a NBR NM 27/2001, obtendo-se então, a quantidade suficiente para a realização dos ensaios de caracterização, de compactação, de expansão e complementares, descritos nos itens 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6.

As três amostras de escória de aciaria enviadas em caminhões pela usina siderúrgica deste estudo chegaram a UFES em três tonéis. Os tonéis foram retirados dos caminhões com o auxílio de uma *paleteira*, em seguida armazenaram-se os tonéis no interior do laboratório em área coberta, para em seguida iniciar o procedimento de redução de amostra de campo.

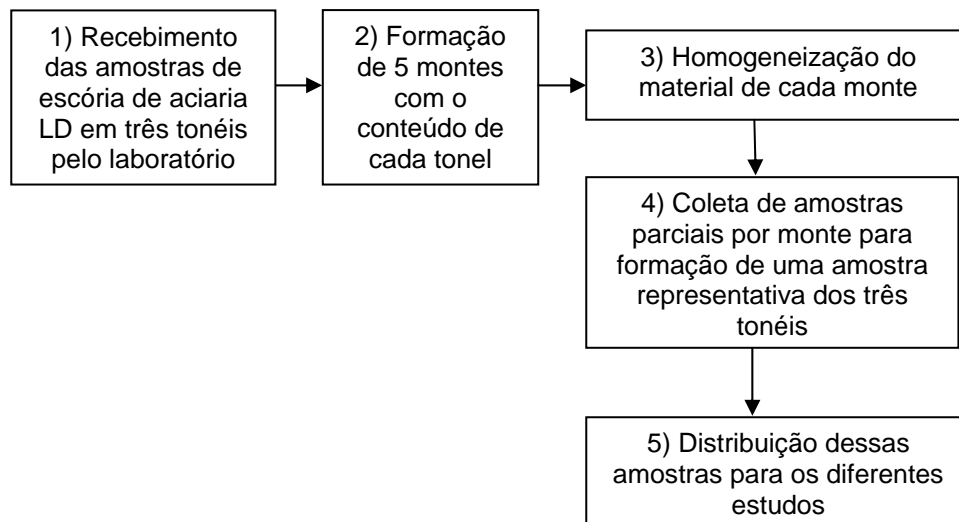
O procedimento padrão utilizado no laboratório foi realizado retirando-se as tampas dos tonéis e identificando-se as amostras através da colocação de etiquetas no interior dos tonéis com registro de sua procedência para controle interno do manuseio da mesma.

Posteriormente, o conteúdo dos tonéis foi retirado, formando-se cinco montes de volumes aproximadamente iguais para cada tonel (Figura 3.13a). Esse procedimento foi realizado com o auxílio de um guincho manual (Figura 3.13b), devido ao elevado peso do tonel, e de uma enxada (Figura 3.13c), tendo-se assim quinze montes no piso do laboratório (Figura 3.13d), que foi totalmente limpo de modo a evitar contaminação das amostras.

Para a obtenção de cada quantidade de escória de aciaria LD necessária à realização dos ensaios de caracterização, de compactação, de expansão e complementares, foram retiradas pequenas porções de cada monte com o auxílio de uma concha de capacidade de aproximada de 1 kg. Na Figura 3.14 apresenta-se uma síntese do procedimento de redução das amostras de campo realizado no laboratório da UFES.



**Figura 3.13 - Redução da amostra de campo na UFES: (a) cinco montes de escória de aciaria LD por tonel; (b) retirada da escória do tonel com guincho; (c) retirada da escória com enxada; (d) divisão dos três tonéis em quinze pilhas**



**Figura 3.14 - Procedimento de redução de amostra de campo das três amostras deste estudo (SILVA et al., 2005)**

### 3.3 Métodos de ensaios de caracterização química, física e ambiental

Os métodos de ensaios de caracterização realizados nas amostras de escória de aciaria e as respectivas normas são apresentados no Quadro 3.2.

| Métodos de ensaios             | Normas                   |
|--------------------------------|--------------------------|
| Análise química                | -                        |
| Angulosidade                   | -                        |
| Granulometria por peneiramento | NBR 7181/84              |
| Limites de consistência        | NBR 7180/84, NBR 6459/84 |
| Massa específica dos grãos     | NBR 6508/84, NBR 6458/84 |
| Massa unitária no estado solto | NBR 7251/82              |
| Absorção                       | NBR 9937/87              |
| Abrasão <i>Los Angeles</i>     | NBR NM 51/2000           |
| Lixiviação                     | NBR 10005/87             |
| Solubilização                  | NBR 10006/87             |

**Quadro 3.2 - Métodos de ensaios de caracterização química, física e ambiental com suas respectivas normas**

### 3.3.1 Análise química

A análise química feita com material granular foi realizada no laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Para esta análise química, foram colhidos grãos de cada amostra reduzida que apresentaram diferenças de cor, porosidade aparente, entre outros e, em seguida, esses grãos foram moídos em um moinho pulverizador, até uma graduação, menor ou igual à do cimento (SILVA et al., 2005).

As amostras foram analisadas quimicamente através de complexometria (dióxido de silício, óxido de alumínio, óxido de ferro, óxido de cálcio, óxido de magnésio, enxofre, óxido de sódio, óxido de potássio, ferro metálico e óxido de cálcio livre) e por absorção atômica (anidrido fosfórico).

### 3.3.2 Angulosidade - análise visual

As partículas podem apresentar bordas ou cantos mais ou menos agudos - afiados - e a esta característica geométrica dá-se o nome de *angulosidade das partículas*.

A análise da angulosidade foi feita por observação visual. Para a classificação, comparou-se a angulosidade do material com os padrões encontrados na bibliografia (Figura 3.15). Para fins de registro da angulosidade foram feitas fotografias.



**Figura 3.15 - Diferentes níveis de angulosidade das partículas (SOWERS; SOWERS, 1980)**

### **3.3.3 Granulometria por peneiramento**

Foram feitos ensaios de granulometria por peneiramento de acordo com as recomendações da norma brasileira NBR 7181/84, Solo - Análise Granulométrica. A classificação da escória de aciaria foi feita com base nos Sistemas Unificado de Classificação - SUC (ASTM D 2487/90) e *Highway and Transportation Research Board* - HTRB, também conhecido como Sistema Rodoviário ou Sistema AASHTO ou HRB. O SUC é um sistema que se aplica de uma forma geral a todos os tipos de obras de engenharia, enquanto o sistema HTRB é específico para obras rodoviárias e de pavimentação. Verificou-se também, se a granulometria das amostras da escória de aciaria LD estudadas se enquadram nas faixas de granulometria para bases estabilizadas do DNIT, através da especificação ES-303/97.

### **3.3.4 Limites de consistência**

Para a determinação dos limites de consistência utilizaram-se os métodos de ensaio da norma brasileira NBR 7180/84, Solo - Determinação do limite de Plasticidade, e NBR 6459/84, Solo - Determinação do limite de Liquidez. Tais procedimentos utilizam apenas a fração do material que passa pela peneira n°40 com 0,42 mm de abertura.

### **3.3.5 Massa específica dos sólidos**

Para avaliar a massa específica da escória de aciaria foram utilizados dois procedimentos de ensaio, um para grãos que passam na peneira de 4,8 mm, conforme a NBR 6508/84, e outro para grãos retidos na peneira de 4,8 mm, conforme a NBR 6458/84. Com os resultados desses dois ensaios de massa específica e a proporção de material contendo frações passada e retida na peneira de 4,8 mm, obtida do ensaio de granulometria, calculou-se a massa específica dos grãos de material em sua totalidade, em conformidade com a norma da ABNT NBR 6458/84.

### **3.3.6 Massa unitária no estado solto**

A massa unitária do agregado em estado seco foi determinada de acordo com o procedimento descrito na NBR 7251/82. A quantidade de escória de aciaria utilizada neste ensaio foi, pelo menos, o dobro do volume do recipiente de forma paralelepípedica especificado pela norma.

### **3.3.7 Absorção**

A absorção da escória de aciaria foi determinada de acordo com o procedimento descrito na NBR 9937/87 para fração retida na peneira de 4,8 mm de abertura.

### **3.3.8 Abrasão Los Angeles**

A abrasão *Los Angeles* foi determinada de acordo com o procedimento descrito na NBR NM 51/00. Esse ensaio foi realizado com a graduação B especificada na referida norma, onde o

material, seco em estufa, foi pesado em duas frações com diferentes granulometrias de 2,5 kg cada uma e, posteriormente, colocado juntamente com a carga abrasiva de esferas metálicas, dentro do tambor cilíndrico da máquina *Los Angeles*.

### **3.3.9 Caracterização ambiental**

Para se classificar um resíduo sólido segundo a norma NBR 10004/2004, este deverá apresentar características de reatividade, corrosividade, toxicidade, inflamabilidade, ou patogenicidade fora dos limites estabelecidos pela mesma norma. Cabe ressaltar que o enfoque dado na caracterização ambiental desta dissertação foi somente em relação a sua toxicidade

Logo, buscando verificar a possibilidade de contaminação do meio ambiente, foram avaliadas as características de toxicidade, conforme a norma brasileira NBR 10004/2004 (Classificação de Resíduos Sólidos), para os metais e não metais das três amostras de escória de aciaria LD deste estudo. Para isto foram realizados os ensaios de lixiviação e solubilização conforme recomendações da NBR 10005/2004 e da NBR 10006/2004, respectivamente. Analisou-se a característica de toxicidade no que diz respeito a metais e semi-metais como prata, alumínio, arsênio, bário, cádmio, cromo, cobre, ferro, mercúrio, manganês, sódio, chumbo, selênio e zinco, e não-metais como cloreto, fluoreto e sulfato. (SILVA, 2005; VANCINI, 2005).

A preparação das amostras para os testes de lixiviação e solubilização foi realizada no Laboratório de Caracterização Ambiental de Resíduos da UFES (LACAR) pela equipe da área ambiental do projeto PAVIAMB (SILVA, 2005).

As análises de metais foram feitas em espectrofotômetro de absorção atômica, atomizador de tubos de grafite e gerador de hidretos, obtendo-se leituras na ordem de miligrama por litro (mg/L) e micrograma por litro ( $\mu\text{g/L}$ ) em concentração. As análises de fluoretos foram feitas utilizando-se um fluorímetro digital, as de sulfatos foram feitas utilizando-se um espectrofotômetro colorimétrico e as análises de cloretos foram feitas por titulometria (SILVA, 2005).

As análises de metais, cloretos, fluoretos foram realizadas no Laboratório de Caracterização Ambiental de Resíduos da UFES (LACAR), e as análises de sulfatos foram realizadas no Laboratório de Saneamento da UFES (LABSAN).

## **3.4 Métodos de ensaio de compactação**

Foram executados ensaios de compactação segundo os procedimentos da norma brasileira NBR 7182/86. Os corpos-de-prova foram moldados utilizando energia especificada, dependendo da investigação, igual a 100% do Proctor normal ( $600 \text{ kJ/m}^3$ ) e a 100% do

Proctor modificado ( $2700 \text{ kJ/m}^3$ ). Para a compactação, foi utilizado um compactador eletromecânico que substituiu a compactação manual.

Inicialmente, na execução dos ensaios de compactação, foram utilizados dois procedimentos, um com reuso de material e outro sem reuso de material, sobre as amostras preparadas com secagem prévia ao ar. No procedimento com reuso de material utilizou-se uma quantidade de 15 kg para a realização de todo o ensaio, em torno de dez determinações, e no procedimento sem reuso de material utilizou-se uma quantidade de 7 kg de material para determinação de cada ponto da curva de compactação. O procedimento com reuso de material gera uma economia de material utilizado no ensaio de compactação, mas suscita a possibilidade de fragmentação de partículas que poderia alterar a granulometria e o peso específico aparente do material em cada reuso.

No estudo das características de compactação foram avaliadas as amostras de escória de aciaria não tratada e tratada 1. Com o objetivo de verificar a diferença entre os procedimentos com e sem reuso de material, visando uma economia de material utilizado no ensaio, foram realizados ensaios de compactação com energia do Proctor normal na amostra tratada 1 utilizando os dois procedimentos. Com o objetivo de verificar o efeito de diferentes energias de compactação, Proctor normal e modificado, nas características de compactação, foram realizados ensaios de compactação utilizando o procedimento sem reuso de material na amostra não tratada. Os fatores de variação e as categorias investigadas no ensaio de compactação da escória de aciaria do estudo estão no Quadro 3.3.

| Fatores de variação            | Categoria dos fatores de variação  |
|--------------------------------|--|
| Amostras da escória de aciaria | Amostras não tratada e tratada 1 (energia Proctor normal e procedimento sem reuso) |
| Procedimento de ensaio         | Com e sem reuso de material (amostra tratada 1)                                    |
| Energia de compactação         | Proctor normal e Proctor modificado (amostra não tratada)                          |

**Quadro 3.3 - Fatores e variáveis estudadas para o ensaio de compactação**

#### **3.4.1 Ensaio de compactação com reuso de material**

Este procedimento de ensaio foi aplicado somente às amostras de escória de aciaria tratada 1, utilizando a energia do ensaio Proctor normal.

Nos ensaios de compactação com reuso de material, foram separados 15 kg de escória de aciaria, que foi colocada em estufa a  $105^\circ\text{C}$  por 24 horas para secagem prévia. Após o período de 24 horas, o material foi retirado da estufa e acondicionado em sacos plásticos impermeáveis até atingir a temperatura ambiente.

Após a escória de aciaria atingir a temperatura ambiente, ela foi retirada dos sacos plásticos, despejada numa bandeja e fez-se a primeira compactação sem adição de água ao material.

Após compactar o primeiro molde em 5 camadas de 12 golpes, o material foi retirado do cilindro. Separou-se, então, uma mostra para o ensaio de umidade (cerca de 0,5 kg) e o restante do material retornou para a bandeja. Adicionou-se água (1 a 2%) ao material e fez-se homogeneização para iniciar a próxima compactação com umidade de 1 a 2% maior.

Continuou-se com o procedimento até que a água adicionada não fosse mais absorvida pela escória de aciaria. Ou seja, ao tentar-se adicionar água para alcançar umidades superiores, cerca de 14%, observava-se que o adicional de água era expulso e drenava na compactação.

Após essas observações, decidiu-se que todos os corpos-de-prova que apresentassem drenagem durante a compactação deveriam ser retirados do molde cilíndrico e tomavam-se porções do topo, do meio e da base do corpo-de-prova para determinação da umidade, separadamente.

#### **3.4.2 Ensaio de compactação sem reuso de material**

O procedimento sem reuso de material foi aplicado às amostras de escória de aciaria LD tratada 1 e não tratada. Nesse procedimento, o material foi compactado somente uma vez, não havendo reaproveitamento de material. Calculou-se a quantidade total de material para cada ensaio de compactação, multiplicando-se o número de vezes que se fará a compactação pela quantidade necessária de material usada em cada compactação, cerca de 7 kg de escória de aciaria.

Calculada a quantidade para o ensaio, o material foi separado e seco ao ar. Para estimar-se a água a ser adicionada em cada ensaio, foi retirada uma amostra representativa de 0,5 kg para ensaio de umidade higroscópica. O material foi separado em bandejas metálicas com 7 kg de escória de aciaria cada e com o resultado de umidade higroscópica, calculou-se a quantidade de água a ser adicionada em cada bandeja, com incrementos de umidade variando de 1 a 2%.

Para se obter umidades inferiores à umidade higroscópica, cerca de 3,5 %, a escória de aciaria foi seca em estufa a 105°C por 24 horas, retirada da estufa, resfriada até a temperatura ambiente e adicionou-se água para se obter uma quantidade de material com umidade superior a 0% e inferior ao valor da umidade higroscópica.

A quantidade de água calculada foi adicionada ao material em cada uma das bandejas. Posteriormente, o material foi homogeneizado e iniciou-se a compactação em 5 camadas com o número de golpes correspondente a energia desejada, sendo 12 golpes por camada para a



energia do Proctor normal e 56 golpes por camada para a energia do Proctor modificado, utilizando o equipamento de compactação eletro-mecânico (Figura 3.16a). Após a compactação retirou-se o molde cilíndrico do equipamento de compactação e determinou-se a massa do conjunto, numa balança eletrônica com capacidade de 50 kg (Figura 3.16b).



(a)



(b)

**Figura 3.16 - Equipamentos elétricos utilizados na compactação e pesagem dos corpos-de-prova com escória de aciaria LD: (a) compactador eletro-mecânico; (b) balança eletrônica com capacidade de 50 kg**

Para se determinar o peso específico aparente seco do corpo-de-prova compactado, necessita-se saber a umidade representativa do corpo-de-prova, para isso foram utilizados três diferentes procedimentos.

Um quando o corpo-de-prova foi utilizado para a realização de outros ensaios (CBR e expansão pelo método PTM-130/78). Nestes casos, a determinação da umidade foi feita com porção de 0,5 kg do material remanescente da bandeja.

Um segundo procedimento, quando o corpo-de-prova foi utilizado somente para o ensaio de compactação. Neste caso, do material retirado do molde, retiravam-se amostras de 0,5 kg para determinação da umidade do próprio corpo-de-prova.

E um terceiro procedimento, para os corpos-de-prova que apresentavam drenagem durante a compactação, com o objetivo de verificar a variabilidade da umidade ao longo do corpo-de-prova. Neste caso, os corpos-de-prova eram retirados do molde cilíndrico e tomavam-se porções do topo, do meio e da base do corpo-de-prova para determinação da umidade, separadamente.



Como os corpos-de-prova que apresentavam drenagem foram retirados do molde cilíndrico, somente os corpos-de-prova que não apresentavam drenagem durante a compactação foram utilizados para a realização de outros ensaios. Além disso, nos corpos-de-prova com drenagem, a umidade do material remanescente da bandeja era superior à umidade do material do corpo-de-prova. Logo, esta umidade não seria válida para o cálculo do peso específico aparente seco.

### 3.5 Métodos de determinação da expansão

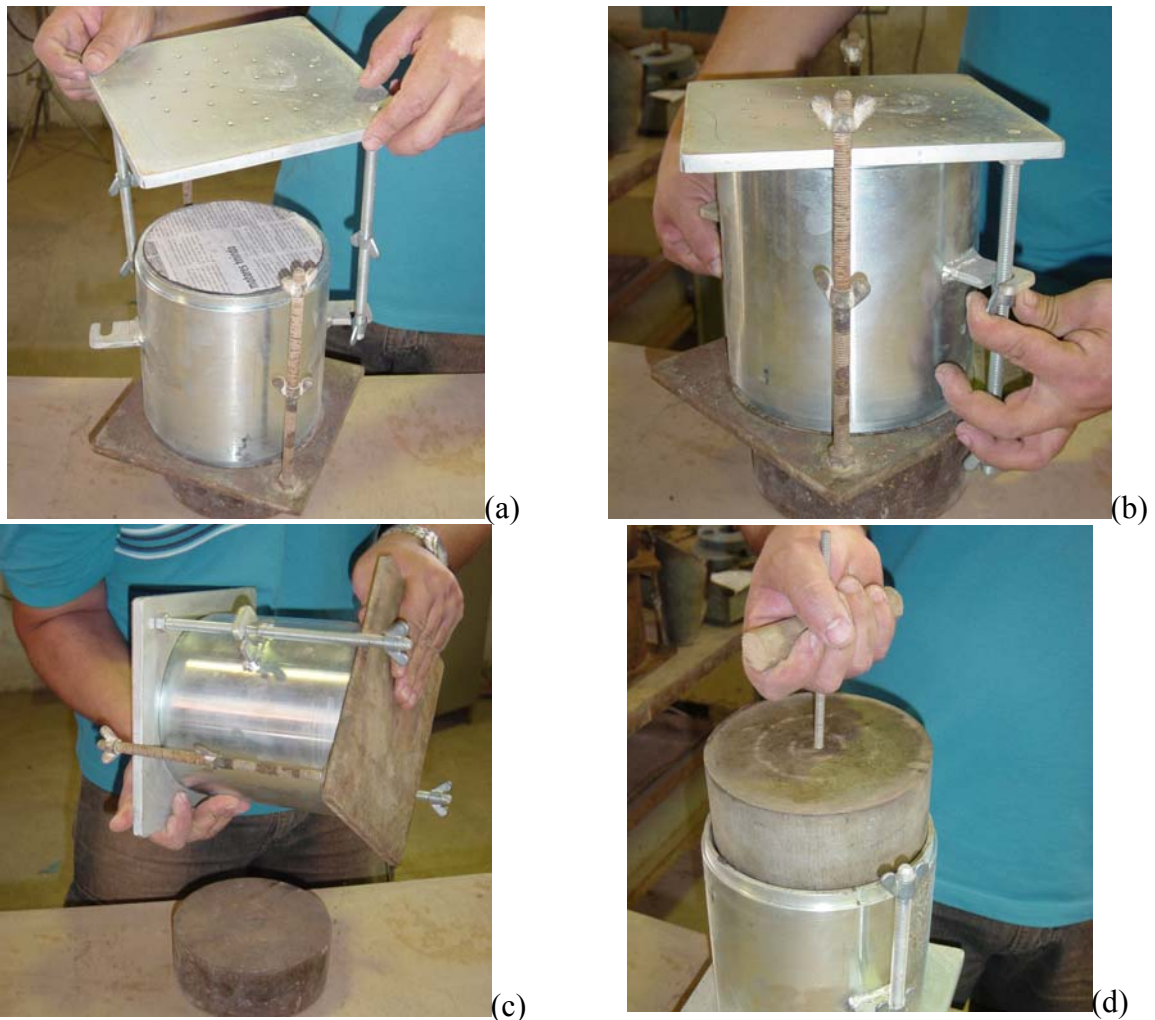
Para o estudo das características de expansão, foram utilizados três métodos de ensaio encontrados na bibliografia que utilizam corpos-de-prova compactados, os métodos PTM-130/78, JIS A 5015/92 e ASTM D 4792/00. Nesses três ensaios de expansão realizados neste estudo, os corpos-de-prova foram compactados em moldes cilíndricos de aço galvanizado de 150 mm de diâmetro<sup>14</sup>, utilizando a energia especificada para cada método de ensaio de expansão e o procedimento do ensaio de compactação sem reuso de material. Porém, nesses ensaios de expansão, deve-se proceder a inversão do molde para a retirada do disco espaçador e montagem do aparato de leitura da expansão, composto de prato perfurado com haste ajustável, sobrecarga em forma de anel, tripé porta extensômetro e extensômetro ou relógio comparador com precisão de 0,01 mm (Figura 3.17).



Figura 3.17 - Aparelhagem necessária para se fazer a leitura da expansão

<sup>14</sup> Esse molde cilíndrico é o mesmo molde utilizado no ensaio CBR e no ensaio de compactação deste estudo.

A inversão do corpo-de-prova em solos coesivos é relativamente fácil, pois o solo coesivo úmido se prende à parede do molde cilíndrico fazendo com que o solo compactado não saia do molde. Porém, com a escória de aciaria compactada isso nem sempre ocorre, podendo acarretar a perda de escória de aciaria de dentro do molde e a necessidade de se reiniciar a compactação. Para se evitar esse problema, ao término da compactação da última camada, colocou-se o conjunto base-cilindro-disco espaçador-amostra em cima de um outro disco espaçador, colocando-se em seguida uma outra base de cilindro (Figura 3.18a), fixando-a ao cilindro (Figura 3.18b). Em seguida, fez-se a inversão do cilindro, tomando-se o cuidado de segurar os dois pratos para que não escapasse nenhum material (Figura 3.18c). Além desse cuidado, deve-se ter bastante força durante a inversão do molde, pois o conjunto tem uma massa de aproximadamente 25 kg. Posteriormente, retirou-se o disco espaçador de dentro do molde cilíndrico com o auxílio de um *saca disco espaçador* (Figura 3.18d), que foi aparafusado num furo previamente feito no disco espaçador.



**Figura 3.18 - Procedimento de inversão do corpo-de-prova: (a) colocação de outra base no cilindro; (b) fixação da base no cilindro; (c) inversão do corpo-de-prova; (d) retirada do disco espaçador**

Além da inversão dos corpos-de-prova, recomenda-se, através da norma ASTM D 4792/00, que se passe algum produto para reduzir a corrosão dos moldes metálicos, assim como um óleo para motor. Esse procedimento foi realizado em todos os ensaios de expansão deste estudo.

### 3.5.1 Ensaio de expansão pelo método PTM-130/78

O ensaio de expansão PTM-130 foi basicamente desenvolvido por J. J. Emery na *McMaster University* em Ontário, Canadá. Posteriormente, alterou-se a temperatura de imersão do corpo-de-prova originando a norma ASTM D 4792/00. O Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais fez uma adaptação originando o ensaio DMA-1/DER-MG/92.

No ensaio PTM-130, após o material ter sido compactado em moldes cilíndricos com a energia do Proctor normal e procedimento do ensaio de compactação, instalou-se a aparelhagem necessária para se acompanhar a expansão vertical (Figura 3.17), colocando-se o papel filtro e o prato perfurado com a sobrecarga (Figura 3.19a), e em seguida o tripé com o extensômetro de precisão 0,01 mm (Figura 3.19b). Após essa montagem, o corpo-de-prova foi imerso em um banho-maria com água a  $71 \pm 3^\circ\text{C}$  (Figura 3.19c).

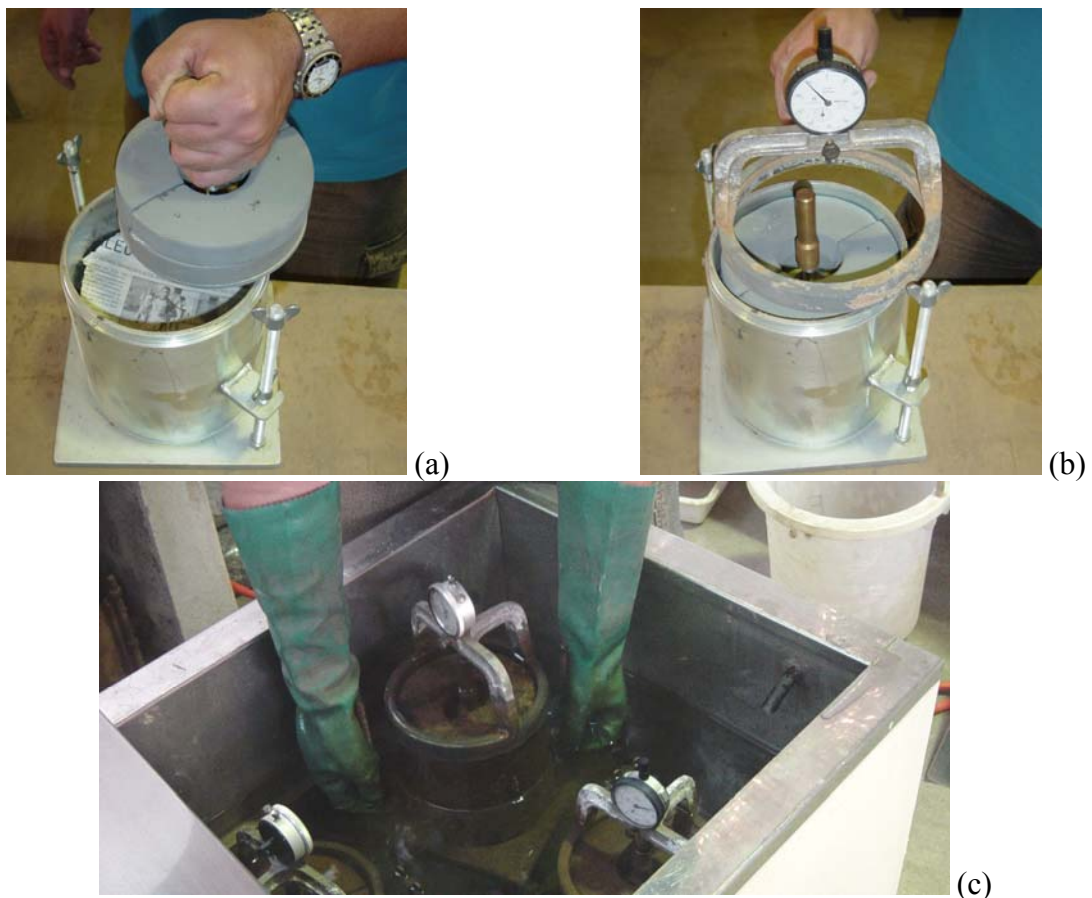


Figura 3.19 - Montagem e submersão do corpo-de-prova para o ensaio de expansão pelo método PTM-130/78: (a) instalação do prato perfurado com peso anelar; (b) instalação do tripé com extensômetro; (c) submersão do corpo-de-prova no banho-maria com água a  $71^\circ\text{C}$



A fase de imersão dos corpos-de-prova foi feita em dois banhos-maria elétricos com capacidade para 10 e 20 corpos-de-prova cada (Figura 3.20). Esses banhos-maria elétricos foram especialmente projetados para os ensaios de expansão com escória de aciaria, tendo revestimento interno e tampa em aço inoxidável, controle de temperatura microprocessado e conjunto motor-bomba para circulação da água quente.



(a)



(b)

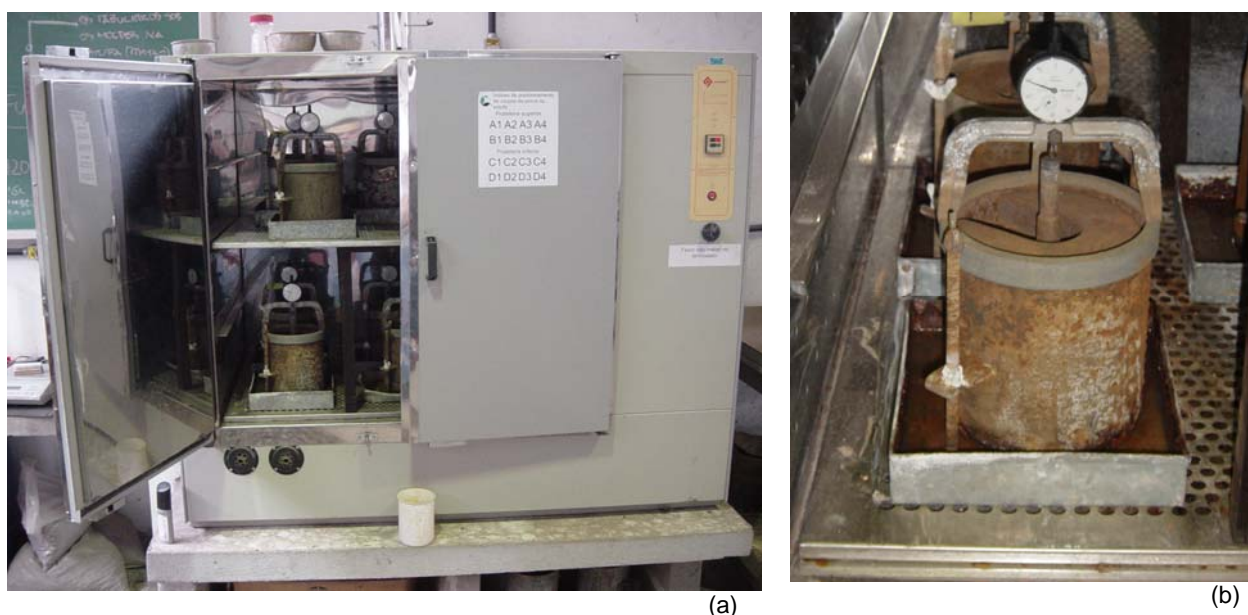
**Figura 3.20 - Banhos-maria elétricos utilizados para determinação da expansão das amostras de escória de aciaria LD do estudo: (a) com capacidade para 10 corpos-de-prova durante a realização do ensaio e sem a tampa; (b) com capacidade de 20 corpos-de-prova com as tampas**

Durante os sete primeiros dias de ensaio pelo método PTM-130/78 foram feitas leituras diárias com o corpo-de-prova ainda imerso. Em seguida, o corpo-de-prova foi retirado do banho-maria e levado para uma estufa elétrica à mesma temperatura de  $71 \pm 3^\circ\text{C}$ . Essa estufa foi adquirida especialmente para os ensaios com escória de aciaria e possui circulação forçada de ar, controle de temperatura microprocessado e capacidade de 16 corpos-de-prova (Figura 3.21a). Nessa etapa da estufa, tomou-se o cuidado de colocar cada corpo-de-prova dentro de uma bandeja para evitar que a água do corpo-de-prova pudesse danificar a estufa (Figura 3.21b).

Na norma do ensaio PTM-130/78, item 7.4, diz-se que o corpo-de-prova deve ser mantido na condição de “saturação” (não submersa) por mais 7 dias, fazendo-se as leituras diárias da expansão por igual período.

Pela mesma norma, item 7.6, essa condição “saturada” seria garantida pela adição diária de pelo menos meio litro de água no topo do corpo-de-prova, no mínimo duas horas antes da leitura da expansão. Como a norma não cita a temperatura da água adicionada, estabeleceu-se

que a água estaria à temperatura de  $71 \pm 3^\circ\text{C}$  e por motivos práticos ela seria adicionada após a leitura diária da expansão.



**Figura 3.21 - Estufa elétrica utilizada no ensaio de expansão pelo método PTM-130/78: (a) estufa com corpos-de-prova do ensaio (b) detalhe do corpo-de-prova com bandeja metálica durante o ensaio**

Para se conhecer os valores de expansão das escórias de aciaria deste estudo pelo método PTM-130/78, foram realizados ensaios de expansão por esse método nas três amostras estudadas: não tratada; tratada 1; e tratada 2. Apesar do método PTM-130/78 especificar a temperatura de  $71^\circ\text{C}$  na realização do ensaio, foi investigado o efeito do aumento da temperatura desse ensaio nos resultados da expansão, com o objetivo de verificar a importância do controle da temperatura durante o ensaio e, considerando que as reações químicas normalmente acontecem mais rapidamente com o aumento da temperatura utilizada (FINE; BEALL, 1990; ATKINS, 1998). Para isso, foram realizados ensaios utilizando as temperaturas de  $71^\circ\text{C}$  e  $80^\circ\text{C}$  na amostra tratada 1. A temperatura de  $80^\circ\text{C}$  foi escolhida devido o método JIS A 50015/92 especificar tal temperatura. Como a metodologia do ensaio PTM-130/78 descreve que os corpos-de-prova devem ser compactados na umidade ótima, foram executados ensaios de expansão com diferentes umidades de compactação, variando de 0 a 10%, nas amostras tratada 1 e não tratada, com o objetivo de verificar o efeito da umidade de compactação na expansão obtida por esse método.

Além disso, apesar do método PTM-130/78 especificar a energia do Proctor normal, foi investigado o efeito do aumento da energia de compactação na expansão determinada por esse método. Essa investigação foi realizada com o objetivo de se estudar a interferência da energia de compactação na expansão, já que as bases e sub-bases de pavimentos rodoviários,

geralmente, são compactadas com energia superior ao Proctor normal. Para isso, foram realizados ensaios de expansão com energia do Proctor normal e Proctor modificado na amostra não tratada.

Os fatores de variação e as categorias investigadas no ensaio de expansão da escória de aciaria LD pelo método PTM-130/78 estão no Quadro 3.4.

| Fatores de variação            | Categoria dos fatores de variação                         |
|--------------------------------|---|
| Amostras da escória de aciaria | Amostras não tratada, tratada 1 e tratada 2               |
| Temperatura do ensaio          | 71°C e 80°C (amostra tratada 1)                           |
| Umidade de compactação         | Variando de 0 a 10% (amostras não tratada e tratada 2)    |
| Energia de compactação         | Proctor normal e Proctor modificado (amostra não tratada) |

**Quadro 3.4 - Fatores e variáveis estudadas para o ensaio de expansão PTM-130/78**

O método de ensaio PTM-130/78 recomenda que para cada amostra sejam ensaiados 03 (três) corpos-de-prova. Porém, devido à heterogeneidade das escórias de aciaria em geral e ao tamanho do lote de escória utilizado no estudo (1400 m<sup>3</sup>), esse número de corpos-de-prova se mostra insuficiente para se avaliar estatisticamente os resultados de expansão.

Para se calcular o número de corpos-de-prova do ensaio pelo método PTM-130/78, foram utilizados resultados de ensaios realizados pela siderúrgica em estudo.

De posse do resultado de desvio padrão (s), igual a 0,4%, fornecido pelos resultados da expansão pelo método PTM-130/78 da siderúrgica, foi calculado, em (3.1), o número mínimo de corpos-de-prova (n), com precisão (d) de 0,2% e um valor na tabela normal (z) correspondente ao nível de confiança de 95% (COCHRAN, 1977).

$$n = \left( \frac{zs}{d} \right)^2 \quad (3.1)$$

Os resultados desse cálculo demonstraram uma variabilidade que justificaria o ensaio com pelo menos 15 corpos-de-prova pelo método PTM-130/78.

### 3.5.2 Ensaios de expansão pelo método JIS A 5015/92

A norma japonesa JIS (*Japanese Industrial Standard*) A 5015 foi estabelecida em 1979, e revisada em 1985 e em 1992, visando à utilização da escória de aciaria em pavimentação e fixando critérios qualitativos e quantitativos que devem ser atendidos para este fim (PENA, 2004). Essa norma descreve um método de ensaio de expansão, denominado “Método de ensaio de expansão em água para escória siderúrgica”. Esse método, assim como os demais utilizados, usa corpos-de-prova compactados em moldes cilíndricos metálicos, obtidos através

do ensaio de compactação, porém a amostra de escória de aciaria ensaiada deve ser preparada para atender à granulometria especificada no Quadro 3.5.

|             |        |        |        |        |        |         |         |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| Abertura    | 31,5mm | 26,5mm | 13,2mm | 4,75mm | 2,36mm | 0,425mm | 0,075mm |
| % que passa | 100    | 97,5   | 70     | 47,3   | 35     | 20      | 6       |

**Quadro 3.5 - Distribuição granulométrica da escória de aciaria exigida pelo método JIS A 5015/92**

Os corpos-de-prova, após compactação com energia do Proctor modificado e repouso de 24h sem perda de umidade, foram submersos em um banho-maria com água e sujeitos a ciclos de aquecimento diários de 6 horas à temperatura de 80°C. Após esse período de 6 horas o banho-maria era desligado e depois de 18 horas sem aquecimento o banho-maria era religado<sup>15</sup>. Portanto, a cada período de 24 horas, a água do banho-maria ficava 6 horas à temperatura de 80°C e 18 horas sem aquecimento, repetindo-se o processo por 10 dias. A expansão, assim como no método PTM-130/78, foi medida diariamente através de um extensômetro instalado no topo de cada corpo-de-prova, e a expansão foi expressa em porcentagem da altura do corpo-de-prova aos 10 dias desse ensaio.

Para se conhecer os valores de expansão das escórias de aciaria deste estudo, foram realizados ensaios de expansão pelo método JIS A 5015/92 nas amostras de escória de aciaria LD não tratada e tratada 2.

O método de ensaio de expansão da JIS A 5015/92 recomenda que sejam realizados 03 corpos-de-prova, porém, para este estudo, foram realizados 05 (cinco) corpos-de-prova para cada uma das amostras não tratada e tratada 2.

### **3.5.3 Ensaio de expansão pelo método ASTM D 4792/00**

No método de ensaio de expansão ASTM D 4792/00, assim como no método PTM-130/78, após o material ter sido compactado com energia do Proctor normal em moldes cilíndricos, os corpos-de-prova foram submersos em um banho-maria com água a  $70 \pm 3^\circ\text{C}$  e instalou-se um extensômetro no topo de cada corpo-de-prova para acompanhar-se a expansão vertical. A fase de imersão dos corpos-de-prova foi feita em dois banhos-maria elétricos com capacidade para 10 e 20 corpos-de-prova cada.

Assim como a norma recomenda, a leitura inicial do extensômetro foi tomada 30 minutos após a colocação do corpo-de-prova no banho-maria, para permitir a expansão térmica dos

---

<sup>15</sup> No momento de religar o banho-maria a água estava com temperaturas em torno de 50°C.

aparatos utilizados. Essa medida é a leitura inicial que permite determinar a expansão em relação às leituras subsequentes.

A partir da primeira leitura, fizeram-se leituras diárias no mesmo horário durante pelo menos sete dias. Se a taxa de expansão não tiver uma pronunciada redução após esse período, o ensaio pode continuar para se obterem dados adicionais. Porém, a norma ASTM D 2940/03, para utilização de escórias de aciaria em bases e sub-bases, estabelece uma expansão máxima 0,5% medida aos sete dias de ensaio.

Para se conhecer os valores de expansão das escórias de aciaria deste estudo, foram realizados ensaios de expansão pelo método ASTM D 4792/00 nas amostras não tratada e tratada 2.

O método de ensaio de expansão da ASTM D 4792/00 recomenda que sejam realizados 03 corpos-de-prova, porém, neste estudo, foram realizados 05 (cinco) corpos-de-prova para cada uma das amostras não tratada e tratada 2.

### **3.6 Ensaios adicionais**

Como ensaios adicionais desta pesquisa, será apresentada a metodologia utilizada durante a realização dos ensaios de permeabilidade a carga variável (NBR 14545/00) e CBR ou Índice de suporte Califórnia (NBR 9895/87).

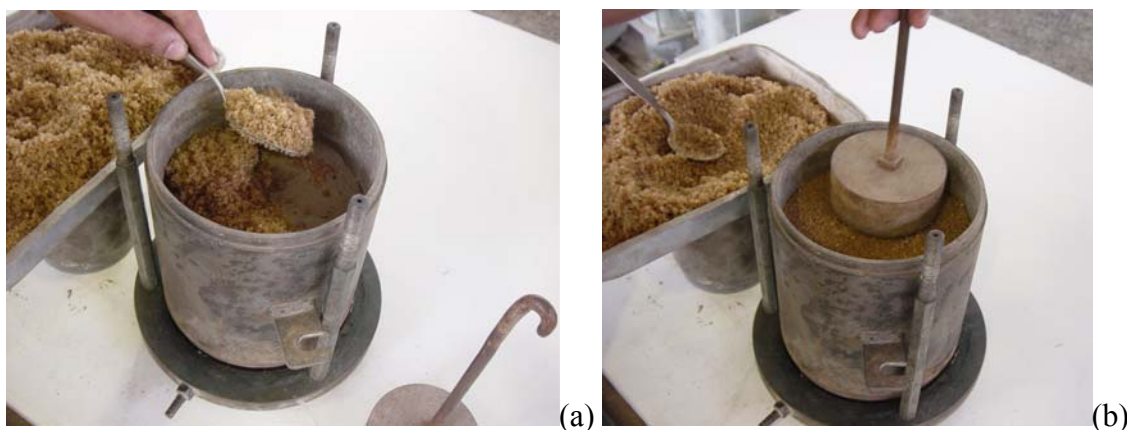
#### **3.6.1 Permeabilidade a carga variável**

Para determinação do coeficiente de permeabilidade das amostras de escória de aciaria LD não tratada e tratada 2, foram realizados os procedimentos descritos na norma NBR 14545/00 Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos a carga variável.

O material em estudo foi compactado em um molde cilíndrico com determinada energia de compactação, Proctor normal ou Proctor modificado. Uma vez realizada a compactação do corpo-de-prova, colocou-se uma manta geotêxtil sobre o corpo-de-prova para impedir o carreamento de partículas durante a percolação da água.

Em seguida, o corpo-de-prova foi invertido para permitir a retirada do disco espaçador. O espaço deixado pelo disco espaçador foi preenchido com uma areia grossa de grãos arredondados (Figura 3.22a), que foi levemente compactada (Figura 3.22b). Essa areia não afetou a determinação da permeabilidade da escória de aciaria, pois tem permeabilidade muito maior ( $1,79 \times 10^{-4}$  m/s) em relação à escória de aciaria deste estudo.





**Figura 3.22 - Preparação do corpo-de-prova para o ensaio de permeabilidade: (a) colocação da areia sobre o material compactado; (b) leve compactação da areia**

A preparação do corpo-de-prova foi finalizada com a colocação de outra manta geotêxtil, agora sobre a camada de areia, e pelo acoplamento do topo do permeâmetro ao molde cilíndrico.

Terminada a moldagem e preparação da escória de aciaria no molde, o corpo-de-prova foi submetido a um fluxo ascendente de água através de um orifício existente na base do permeâmetro para promover a saturação do corpo-de-prova durante aproximadamente três horas. Em seguida, realizaram-se as leituras do nível de água na bureta graduada e dos respectivos intervalos de tempo em que o escoamento se processou, sendo feitas seis repetições por corpo-de-prova, para então se calcular o coeficiente de permeabilidade como a média das seis determinações.

Na determinação do coeficiente de permeabilidade foram avaliadas as amostras de escória de aciaria não tratada e tratada 2. Com o objetivo de verificar o efeito de diferentes energias de compactação no coeficiente de permeabilidade das amostras de escória de aciaria não tratada e tratada 2 foram realizados ensaios em corpos-de-prova compactados com energias do Proctor normal e do Proctor modificado. Os fatores de variação e as categorias investigadas para o ensaio de permeabilidade da escória de aciaria estão no Quadro 3.6.

| Fatores de variação            | Categoria dos fatores de variação   |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| Amostras da escória de aciaria | Amostras não tratada e tratada 2    |
| Energia de compactação         | Proctor normal e Proctor modificado |

**Quadro 3.6 - Fatores e variáveis estudadas para o ensaio de permeabilidade**

### 3.6.2 Índice de Suporte Califórnia - CBR

Neste estudo, os ensaios de CBR, ou Índice de suporte Califórnia, foram executados conforme as recomendações da norma brasileira NBR 9895/87 da ABNT, sendo, entretanto, necessário

o apoio de outras normas para a preparação dos materiais que foram submetidos ao ensaio de índice de suporte Califórnia. Estas normas de apoio são a NBR 6457 - amostras de solo na preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização e a NBR 7182 - ensaio de compactação. Apesar da norma NBR 9895/87 de índice de suporte Califórnia recomendar que os corpos-de-prova sejam compactados na umidade ótima obtida no ensaio de compactação, os corpos-de-prova foram compactados sem a adição de água ao material. A justificativa dessa metodologia pode ser melhor explicada através do item 4.3.6 - Determinação da umidade ótima, na apresentação e análise dos resultados do ensaio de compactação.

Na determinação do CBR foram avaliadas as amostras de escória de aciaria LD não tratada e tratada 2. Com o objetivo de verificar o efeito de diferentes energias de compactação nos resultados do CBR das amostras de escória de aciaria foram realizados ensaios em corpos-de-prova compactados com as energias do Proctor normal e do Proctor modificado. Os fatores de variação e as categorias que foram estudadas para o ensaio de índice de suporte Califórnia da escória de aciaria deste estudo estão no Quadro 3.7.

| Fatores de variação            | Categoria dos fatores de variação   |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| Amostras da escória de aciaria | Amostras não tratada e tratada 2    |
| Energia de compactação         | Proctor normal e Proctor modificado |

**Quadro 3.7 - Fatores e variáveis estudadas para o ensaio de índice de suporte Califórnia - CBR**

### 3.7 Análise estatística dos resultados

Para as análises estatísticas utilizadas neste trabalho, foi utilizado o programa “SPSS for Windows” versão 11.5. Foram realizadas análises estatísticas para o ensaio de compactação, onde foi utilizado um modelo de regressão linear simples e um teste estatístico para se avaliar as diferenças entre os dois procedimentos (com e sem reuso de material), entre as duas energias de compactação (Proctor normal e Proctor modificado) e entre as duas amostras utilizadas (não tratada e tratada 1). Nesta análise de regressão, foram utilizados modelos de regressão linear simples (reta) com o peso específico aparente seco em função da umidade, pois não se encontrou nenhum estudo parecido sobre resultados de ensaios de compactação e, também, nenhum modelo típico para esses resultados. Em seguida, utilizou-se um método para testar a hipótese de igualdade dos dois modelos lineares, empregando o teste t. Neste método, foram consideradas as análises de duas hipóteses: a hipótese de que os dois modelos têm os *coeficientes angulares de regressão iguais*; e a hipótese de que os dois modelos têm os *coeficientes lineares iguais*. Se as duas hipóteses não forem rejeitadas pelo teste t, isso quer dizer que não foram encontradas evidências estatísticas para afirmar que os dois modelos são

diferentes. A metodologia detalhada utilizada nesta análise de modelos de regressão linear simples pode ser encontrada em Montgomery e Peck (1992).

Além disso, foram realizadas análises estatísticas nos resultados de CBR, utilizando a análise de variância, ANOVA, e o teste F para se verificar os efeitos da energia de compactação e das diferentes amostras utilizadas. E, para a análise da expansão do método PTM-130/78, foram utilizados testes de médias, utilizando o teste t, para se estudar os efeitos da temperatura, da energia de compactação e das diferentes amostras na expansão da escória de aciaria utilizada; além de se verificar a correlação da umidade de compactação com a expansão utilizando a correlação de Pearson. A metodologia detalhada desses testes estatísticos pode ser encontrada em Montgomery (2001). Com o objetivo do melhor entendimento dos resultados da análise estatística realizada nesta pesquisa, foram feitos, a seguir, apontamentos sobre testes de hipótese, nível de significância e poder do teste.

A hipótese estatística é uma afirmação ou suposição, que pode ser ou não verdadeira, relativa a uma ou mais populações ou aos parâmetros de um modelo. A hipótese reflete alguma suposição sobre a situação problema. A veracidade ou falsidade de uma hipótese estatística *nunca* é conhecida com certeza, a menos que se examine toda a população (MORETTIN, 1981; MIRSHAWKA, 1986; MONTGOMERY, 2001). No lugar disso, tomar-se-á uma amostra aleatória da população de interesse e será utilizada a informação contida nessa amostra para decidir se a hipótese é provavelmente verdadeira ou falsa. Evidências serão tiradas da amostra que possibilitarão concluir que a hipótese formulada deve ser rejeitada ou não rejeitada. É importante ressaltar que a não rejeição de uma hipótese estatística é o resultado de insuficiente evidência para rejeitá-la e não implica necessariamente que ela é verdadeira. Portanto, neste estudo, não será utilizado o termo aceitar, e sim *não rejeitar*, pois é importante entender que a rejeição de uma hipótese é concluir que ela é falsa, e que a não rejeição de uma hipótese implica meramente que não temos nenhuma evidência para acreditar em outra coisa (MIRSHAWKA, 1986; GOMES, 1987; MONTGOMERY, 2001).

Se deseja-se decidir se um processo ou tratamento é melhor que outro, formula-se a hipótese de que não há diferença entre os tratamentos, essa hipótese é denominada *hipótese nula* e é representada por  $H_0$ . Uma hipótese que difira de uma hipótese nula prefixada é denominada *hipótese alternativa* e é representada por  $H_1$  (SPIEGEL, 1974; MONTGOMERY, 2001; STEVENSON, 2001).

Baseando-se em uma amostra aleatória da população, pode-se estabelecer uma regra de decisão que pode rejeitar ou não rejeitar a hipótese nula ( $H_0$ ), ou determinar se a amostra

observada difere de modo significativo dos resultados esperados, essa regra de decisão pode ser chamada de *teste de hipótese* ou teste de significância. Parte desse procedimento consiste em especificar o conjunto de valores do teste de hipótese que levará a rejeição da hipótese nula. Esse conjunto de valores é denominado região crítica ou região de rejeição do teste (SPIEGEL, 1974; MORETTIN, 1981; MONTGOMERY, 2001; STEVENSON, 2001).

Dois tipos de erros podem ser cometidos quando testamos uma hipótese. Se a hipótese nula é rejeitada quando ela é verdadeira, ocorre um erro tipo I. Se a hipótese nula não é rejeitada quando ela é falsa, ocorre um erro tipo II. As probabilidades de ocorrer esses dois erros são designadas pelas letras gregas  $\alpha$  (alfa) e  $\beta$  (beta), respectivamente (MONTGOMERY, 2001).

Onde:

$\alpha$  é a probabilidade de ocorrer o erro tipo I, ou seja, a probabilidade de rejeitar  $H_0$  quando ela é verdadeira; e

$\beta$  é a probabilidade de ocorrer o erro tipo II, ou seja, a probabilidade de não rejeitar  $H_0$  quando ela é falsa.

Às vezes é mais conveniente trabalhar com o *poder do teste* que é igual a  $(1 - \beta)$ , ou seja, a probabilidade de rejeitar  $H_0$  quando ela é falsa (MONTGOMERY, 2001).

O procedimento geral utilizado em testes de hipóteses é especificar um valor crítico de probabilidade do erro tipo I ( $\alpha$ ), também chamado de *nível de significância* do teste, e então planejar o procedimento do teste para que a probabilidade do erro tipo II ( $\beta$ ) tenha um valor suficientemente pequeno (SPIEGEL, 1974; MORETTIN, 1981; MONTGOMERY, 2001; STEVENSON, 2001).

Na prática, é usual a adoção de um nível de significância de 0,05 ou 5%, embora possam ser usados outros valores. Com isso, no planejamento de um teste de hipótese, existe cerca de 5 probabilidades em 100, de a hipótese ser rejeitada, quando deveria ser aceita, isto é, há uma confiança de cerca de 95% que se tome uma decisão acertada. Nesses casos, diz-se que a hipótese é rejeitada ao nível de significância 5%, o que significa que a probabilidade de erro seria de 5% (SPIEGEL, 1974; MONTGOMERY, 2001; STEVENSON, 2001).

Uma vez apresentados os resultados de um teste de hipótese, é feita a afirmação que a hipótese nula foi ou não rejeitada a um especificado nível de significância. Porém, muitas vezes essa afirmação é insuficiente, pois não fornece nenhuma idéia se o valor calculado do teste está próximo da região de rejeição ou se o valor está muito afastado dessa região. Além

disso, apresentando os resultados somente dessa maneira, impõe-se um nível de significância predefinido aos outros usuários da informação que pode ser não satisfatório, pois algum usuário poderá não ficar confortável com os riscos envolvidos pelo nível de significância de 5% (MONTGOMERY, 2001).

Para evitar essas dificuldades, o *p-valor* tem sido extensamente adotado na prática. O *p-valor* é a probabilidade do valor observado do teste estatístico quando a hipótese nula é verdadeira. Assim, o *p-valor* contém muita informação sobre o peso da evidência contra a hipótese nula, e o usuário da informação pode chegar a uma conclusão para outro nível de significância especificado. Uma vez que o *p-valor* é conhecido, o usuário da informação pode determinar o quão significante os dados são, sem ter que analisar novamente todos os dados para outro nível de significância. Na prática, o *p-valor* pode ser comparado com o nível de significância do teste ( $\alpha$ ), se o *p-valor* do teste for menor ou igual a  $\alpha$ , a hipótese nula será rejeitada, e se o *p-valor* for maior que  $\alpha$ , a hipótese nula não será rejeitada (MONTGOMERY, 2001).

#### 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo tem por objetivo apresentar e analisar os resultados de pluviometria e temperatura e dos ensaios de caracterização, de compactação, de expansão e adicionais realizados nas amostras de escória de aciaria LD não tratada, tratada 1 e tratada 2.

No Quadro 4.1, é apresentado um resumo dos ensaios realizados e o quantitativo desses ensaios para as amostras de escória de aciaria LD estudadas. Além disso, é apresentado o quantitativo total por ensaio na última coluna.

| Ensaio                         |   | Quantitativo                       |                     |                   |                   |                  |
|--------------------------------|---|------------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| Nome                           | Tipo                                    | Unidade                            | Amostra não tratada | Amostra tratada 1 | Amostra tratada 2 | Total por ensaio |
| Análise química                | -                                       | Nº de ensaios                      | 1                   | -                 | 1                 | 2                |
| Granulometria por peneiramento | -                                       | Nº de determinações                | 2                   | 2                 | 2                 | 6                |
| Massa específica               | Material que passa na peneira de 4,8 mm | Nº de determinações                | 10                  | 10                | 10                | 45               |
|                                | Material retido na peneira de 4,8 mm    | Nº de determinações                | 5                   | 5                 | 5                 |                  |
| Massa unitária no estado solto | -                                       | Nº de determinações                | 4                   | 4                 | 4                 | 12               |
| Absorção                       | -                                       | Nº de determinações                | 1                   | 1                 | 1                 | 3                |
| Abrasão Los Angeles            | -                                       | Nº de determinações                | 1                   | 1                 | 1                 | 3                |
| Compactação                    | Proctor normal com reuso                | Nº de ensaios (nº corpos-de-prova) | -                   | 3 (42)            | -                 | 16 (151)         |
|                                | Proctor normal sem reuso                | Nº de ensaios (nº corpos-de-prova) | 3 (27)              | 7 (55)            | -                 |                  |
|                                | Proctor modificado sem reuso            | Nº de ensaios (nº corpos-de-prova) | 3 (27)              | -                 | -                 |                  |
| Permeabilidade                 | Proctor normal                          | Nº de corpos-de-prova              | 2                   | -                 | 2                 | 8                |
|                                | Proctor modificado                      | Nº de corpos-de-prova              | 2                   | -                 | 2                 |                  |
| CBR                            | Proctor normal                          | Nº de corpos-de-prova              | 5                   | -                 | 5                 | 20               |
|                                | Proctor modificado                      | Nº de corpos-de-prova              | 5                   | -                 | 5                 |                  |
| Expansão PTM-130/78            | Proctor normal                          | Nº de corpos-de-prova              | 15                  | 28                | 15                | 79               |
|                                | Proctor modificado                      | Nº de corpos-de-prova              | 21                  | -                 | -                 |                  |
| Expansão JIS A 5015/92         | -                                       | Nº de corpos-de-prova              | 5                   | -                 | 5                 | 10               |
| Expansão ASTM D 4792/00        | -                                       | Nº de corpos-de-prova              | 5                   | -                 | 5                 | 10               |

**Quadro 4.1 - Resumo dos ensaios realizados e o quantitativo desses ensaios para as amostras de escória de aciaria LD do estudo**

Pode-se observar no Quadro 4.1 que a primeira coluna especifica o nome do ensaio, a segunda coluna especifica o tipo de ensaio quando esse possui mais de uma variação, a terceira coluna especifica a unidade de medida do quantitativo de cada ensaio realizado, da terceira à sexta coluna são apresentados os quantitativos de cada ensaio para cada uma das três amostras

estudadas e na última coluna são apresentados os quantitativos para cada ensaio, representando a soma das três amostras estudadas e dos diferentes tipos de ensaio. Deve-se esclarecer ainda que para os ensaios de compactação são apresentados dois valores: um representa o número de ensaios de compactação realizados para cada tipo e para cada amostra; e o valor entre parênteses representa a soma do número de corpos-de-prova relativo ao número de ensaios de compactação.

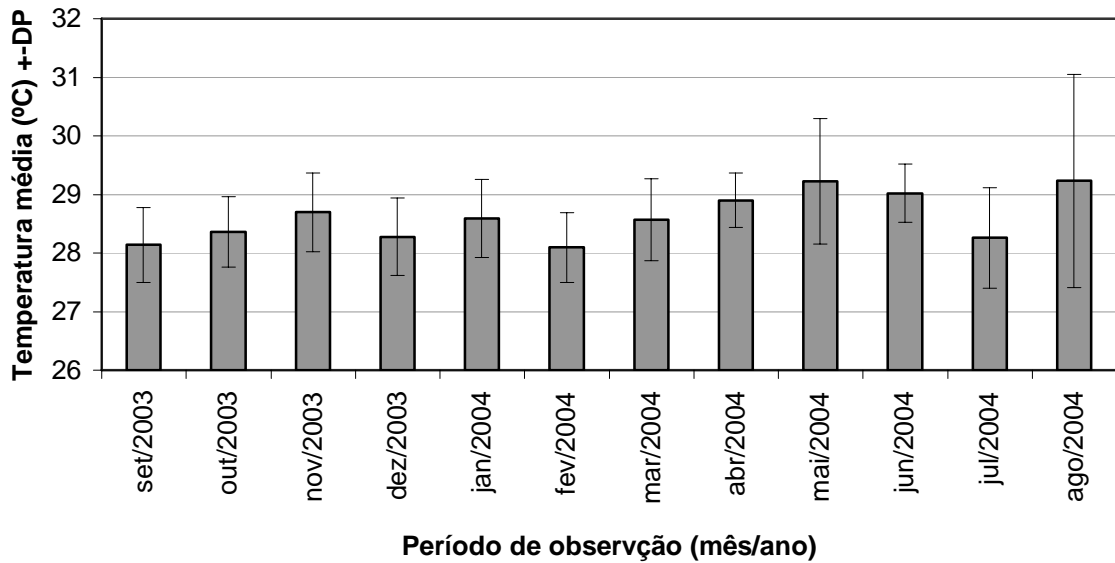
#### 4.1 Pluviometria e temperatura

Os resultados de pluviometria e temperatura apresentados foram obtidos da estação meteorológica de Carapina, Serra, Espírito Santo, do Instituto Estadual de Meio Ambiente (IEMA) que fica próxima à siderurgia do estudo. A periodicidade das leituras é horária, sendo que os dados apresentados são do período de setembro de 2003 a agosto de 2004, totalizando 12 meses de observação. Esse foi o período de exposição ao tempo da escória de aciaria LD, ou seja, entre a data de início da geração (31/08/2003) e a última amostragem (31/08/2004).

Os dados observados de temperatura no período de setembro de 2003 a agosto de 2004 são apresentados na Tabela 4.1, onde a temperatura média do período foi de 28,6°C, com máxima de 35,8°C e mínima de 20,1°C. Para uma melhor visualização dos resultados, apresentam-se na Figura 4.1 as médias e desvios padrão (DP) dos dados de temperatura do período de exposição da escória de aciaria LD ao tempo.

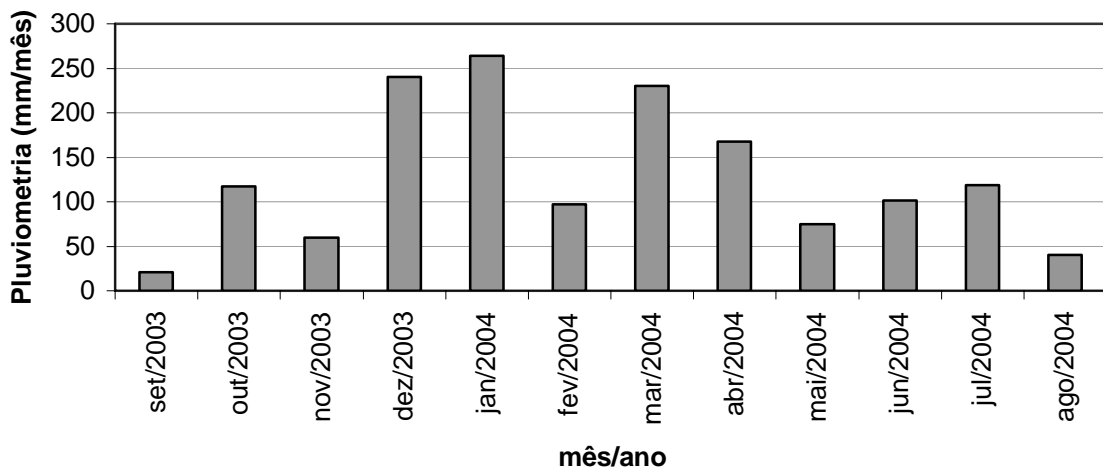
**Tabela 4.1 - Dados de temperatura no período de setembro de 2003 a agosto de 2004: mínima, máxima, média e desvio padrão**

| Período<br>(mês/ano) | Temperatura (°C) |        |       |               |
|----------------------|------------------|--------|-------|---------------|
|                      | Mínima           | Máxima | Média | Desvio Padrão |
| set/2003             | 26,4             | 30,1   | 28,1  | 0,60          |
| out/2003             | 25,6             | 30     | 28,4  | 0,67          |
| nov/2003             | 26,2             | 30,1   | 28,7  | 0,66          |
| dez/2003             | 24,5             | 31,8   | 28,3  | 0,67          |
| jan/2004             | 22,9             | 29,7   | 28,6  | 0,59          |
| fev/2004             | 27,1             | 32,5   | 28,1  | 0,70          |
| mar/2004             | 26,6             | 30,7   | 28,6  | 0,46          |
| abr/2004             | 20,1             | 35,8   | 28,9  | 1,07          |
| mai/2004             | 23,2             | 30     | 29,2  | 0,50          |
| jun/2004             | 25,6             | 30,6   | 29,0  | 0,86          |
| jul/2004             | 22,6             | 31     | 28,3  | 1,82          |
| ago/2004             | 24,3             | 31     | 29,2  | 1,21          |



**Figura 4.1 - Resumo dos dados de temperatura no período de setembro de 2003 a agosto de 2004**

Os dados observados de pluviometria no período de setembro de 2003 a agosto de 2004 são apresentados na Figura 4.2, onde a pluviometria média do período foi de 120 mm/mês, com máxima de 264 mm/mês e mínima de 22 mm/mês. Para uma melhor visualização dos dados de temperatura e pluviometria em relação às três amostras de escória de aciaria LD do estudo, apresenta-se no Quadro 4.2 o período de tratamento das amostras de escória de aciaria LD, o período total de exposição ao tempo, a temperatura média e a quantidade de chuva para cada uma das amostras estudadas. Pode-se observar que as três amostras ficaram submetidas a uma temperatura média em torno de 28°C e que a amostra tratada 2 recebeu uma quantidade de chuva (1533,4 mm) bem superior às outras duas amostras, não tratada (52,4 mm) e tratada 1 (793,4 mm).



**Figura 4.2 - Pluviometria no período de setembro de 2003 a agosto de 2004**



| Amostra     | Período acumulado de tratamento | Período de exposição ao tempo (estocagem ao ar + tratamento) | Temperatura média do período de exposição ao tempo | Quantidade de chuva acumulada no período de exposição ao tempo |
|-------------|---------------------------------|--|--|--|
| Não tratada | -                               | 2 meses  | 28,2 °C  | 52,4 mm  |
| Tratada 1   | 1 mês                           | 5,5 meses  | 28,4 °C  | 793,4 mm   |
| Tratada 2   | 3 meses                         | 12 meses   | 28,6 °C  | 1533,4 mm  |

**Quadro 4.2 - Resumo dos dados de temperatura e pluviometria no período de exposição das três amostras de escória de aciaria LD do estudo**

## 4.2 Caracterização química, física e ambiental

Apesar de serem apresentadas as características da escória de aciaria utilizada neste estudo, deve-se salientar que a heterogeneidade da escória de aciaria, devido ao processo de geração, justifica que não sejam feitas generalizações a respeito de seu uso, necessitando que sempre sejam realizados estudos de caracterização da escória de aciaria antes da utilização desse material. Por esta razão, este estudo refere-se apenas à escória de aciaria aqui estudada (MURPHY et al., 1997; SBRIGHI; BATTAGIM, 2002; PENA, 2004).

### 4.2.1 Análise química

Os resultados da análise química das amostras não tratada e tratada 2 são apresentados no Quadro 4.3 (SILVA et al., 2005). Numa comparação entre as análises dessas duas amostras, pode-se observar que, aparentemente, existiram transformações nos óxidos de cálcio, óxido de magnésio e óxido de cálcio livre que reduziram as quantidades percentuais destes compostos. Uma justificativa para o aparecimento de ferro metálico na amostra tratada 2 (2,82%) deve-se ao reduzido tamanho do corpo-de-prova da análise química.

| Composto              |                                | Resultados em massa (%) |           |
|-----------------------|--------------------------------|-------------------------|-----------|
|                       |                                | Não Tratada             | Tratada 2 |
| Dióxido de silício    | SiO <sub>2</sub>               | 10,99                   | 10,90     |
| Óxido de alumínio     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,78                    | 3,23      |
| Óxido de ferro        | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 27,85                   | 25,82     |
| Óxido de cálcio       | CaO                            | 43,00                   | 39,17     |
| Óxido de magnésio     | MgO                            | 9,11                    | 7,43      |
| Enxofre               | S                              | 0,10                    | 0,03      |
| Óxido de sódio        | Na <sub>2</sub> O              | 0,01                    | 0,03      |
| Óxido de potássio     | K <sub>2</sub> O               | não detectado           | 0,01      |
| Anidrido Fosfórico    | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 1,32                    | 1,51      |
| Ferro Metálico        | Fe <sup>0</sup>                | não detectado           | 2,82      |
| Óxido de cálcio livre | CaO I                          | 6,3                     | 3,99      |

**Quadro 4.3 - Resultados de análise química das amostras não tratada e tratada 2 da escória de aciaria LD do estudo (SILVA et al., 2005)**

### 4.2.2 Angulosidade - análise visual

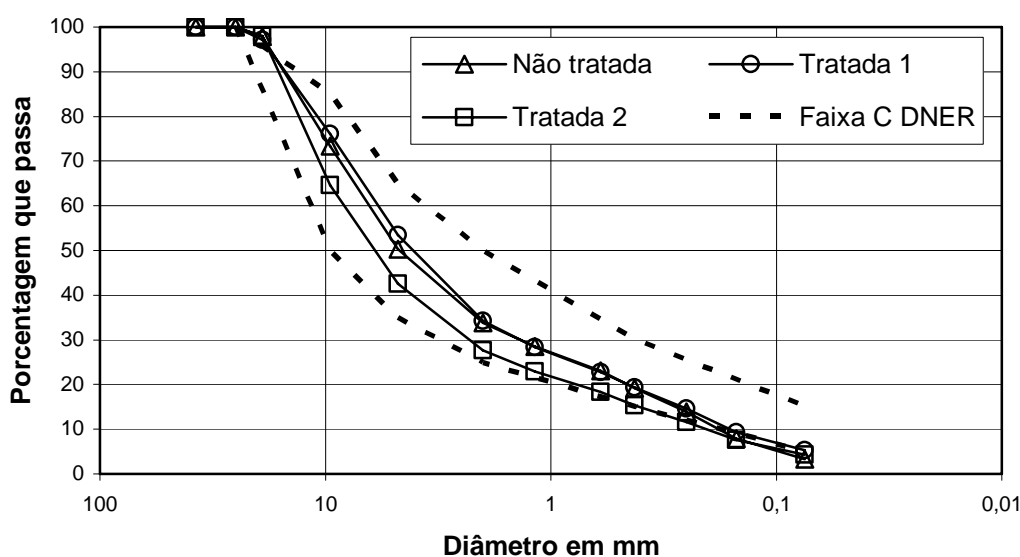
As três amostras de escória de aciaria LD do estudo foram classificadas como angulosas como pode ser observado no exemplo da Figura 4.3. Essas escórias de aciaria angulosas, comparadas com materiais mais arredondados, tendem a ter um ângulo de atrito maior e um maior intertravamento das partículas, possibilitando uma maior capacidade de suporte do pavimento. Assim, a angulosidade pode ser um indicativo da maior ou menor resistência das camadas granulares dos pavimentos em geral.



**Figura 4.3 - Exemplo da avaliação da angulosidade da escória de aciaria LD estudada, escala em milímetros**

### 4.2.3 Granulometria por peneiramento

Na Figura 4.4, são apresentadas as curvas granulométricas das amostras de escória de aciaria ensaiadas, que representam a média de duas determinações obtidas por peneiramento, juntamente com essas curvas, apresenta-se a faixa C do DNIT para bases granulares de pavimentos (DNIT-ES 303/97). Observa-se na Figura 4.4 que as curvas das amostras não tratada e tratada 1 praticamente se sobrepõe e que a curva granulométrica da amostra tratada 2 tem granulometria um pouco mais grossa que as outras duas amostras, provavelmente devido a heterogeneidade da escória de aciaria.



**Figura 4.4 - Curvas granulométricas das escórias de aciaria LD do estudo**

No Quadro 4.4, observam-se algumas características granulométricas das amostras de escória de aciaria não tratada, tratada 1 e tratada 2, retiradas do ensaio de granulometria por peneiramento. De acordo com as características do Quadro 4.4, as amostras de escória de aciaria não tratada e tratada 1 apresentam características granulométricas similares e foram classificadas segundo o Sistema Unificado de Classificação - SUC (ASTM D 2487/93) como areia bem graduada (SW) com pedregulhos (49%) e poucos finos (cerca de 5%), cor cinza, e pelo Sistema *Highway and Transportation Research Board* - HTRB, como A-1a, pedregulho e areia, que é um excelente material para base e sub-base de pavimentos. Já a amostra tratada 2, foi classificada segundo o SUC (ASTM D 2487/93) como pedregulho mal graduado (GP) com areia (38%) e poucos finos (cerca de 4%), cor cinza, e pelo Sistema HTRB, como A-1b, pedregulho e areia.

|                   | Não tratada | Tratada 1 | Tratada 2 |
|-------------------|-------------|-----------|-----------|
| D <sub>10</sub>   | 0,18        | 0,15      | 0,20      |
| D <sub>30</sub>   | 1,3         | 1,3       | 2,4       |
| D <sub>60</sub>   | 6,3         | 6,0       | 8,5       |
| C <sub>u</sub>    | 35,0        | 40,0      | 42,5      |
| C <sub>c</sub>    | 1,49        | 1,88      | 3,39      |
| Pedregulho        | 49,3%       | 46,6%     | 57,40%    |
| Areia grossa      | 16,9%       | 19,2%     | 14,91%    |
| Areia média       | 14,9%       | 15,0%     | 12,27%    |
| Areia fina        | 16,2%       | 14,0%     | 11,10%    |
| Finos (< 0,075mm) | 2,9%        | 5,3%      | 4,29%     |

**Quadro 4.4 - Características granulométricas das amostras de escória de aciaria do estudo segundo a NBR 6502 da ABNT**

Nota:  $D_{10}$ ,  $D_{30}$  e  $D_{60}$  = são os diâmetros no eixo das abscissas da curva granulométrica correspondente a 10, 30 e 60% da massa total do eixo das ordenadas da curva granulométrica;

$C_u$  = coeficiente de uniformidade, na realidade indica a desuniformidade, pois seu valor diminui ao ser mais uniforme o material;

$C_c$  = coeficiente de curvatura, mede a variação proporcional de partículas intermediárias entre os diâmetros  $D_{10}$  e  $D_{60}$ .

Pode-se observar pelas curvas granulométricas da Figura 4.4, que as amostras de escória de aciaria LD do estudo geralmente se apresentam bem graduadas, o que foi confirmado pela classificação do SUC nas amostras não tratada e tratada 1. Essa característica pode assegurar uma maior estabilidade aos pavimentos, devido ao maior atrito interno obtido por entrosamento das partículas (PIZA, 1970).

Foi verificado, também, se a granulometria das escórias estudadas se enquadram nas faixas de granulometria para bases estabilizadas do DNIT (DNIT ES 303/97). Fazendo-se uma comparação da granulometria das escórias de aciaria LD estudadas com as faixas de granulometria já apresentadas na revisão bibliográfica, observou-se que somente a amostra tratada 1 se enquadra na faixa C do DNIT, porém, deve-se esclarecer que as amostras não tratada e tratada 2 somente não se enquadram na faixa C por terem uma quantidade de finos inferior a 5%.

Se as granulometrias das escórias de aciaria LD do estudo forem comparadas com os valores exigidos pela especificação de escórias de aciaria para pavimentos rodoviários DNIT-EM 262/94, verifica-se que as três amostras de escória de aciaria não mantêm a proporção de 40% na faixa até 12,7 mm e de 60% na faixa de 12,7 a 50,8 mm de abertura nominal. Porém, não foram encontradas evidências na bibliografia que mostrassem o motivo da fixação dessa proporção para o uso em pavimentação.

#### **4.2.4 Limites de consistência**

Observou-se que as amostras de escória de aciaria LD do estudo apresentaram características não plásticas (NP), ou seja, trata-se de material não coesivo.

#### **4.2.5 Massa específica dos grãos**

Os resultados dos ensaios de massa específica dos grãos passados ( $\delta$ ) e retidos ( $D_i$ ) na peneira de 4,8 mm das amostras de escória de aciaria do estudo são apresentados no Quadro 4.5, onde também são apresentados os percentuais de material menor ( $M_1$ ) e maior ( $M_2$ ) que 4,8 mm e a massa específica dos grãos contendo frações passadas e retidas na peneira de 4,8mm ( $\rho_s$ ).

|                               | Não tratada | Tratada 1 | Tratada 2 |
|-------------------------------|-------------|-----------|-----------|
| $\delta$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 3350        | 3320      | 3350      |
| $D_i$ (kg/m <sup>3</sup> )    | 3480        | 3480      | 3380      |
| $M_1$ (%)                     | 50,75       | 53,44     | 42,58     |
| $M_2$ (%)                     | 49,25       | 46,56     | 57,42     |
| $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 3410        | 3400      | 3370      |

**Quadro 4.5 - Dados para o cálculo da massa específica das amostras de escória de aciaria LD analisadas**

Nota:  $\delta$  = massa específica dos grãos de material que passam na peneira de 4,8 mm, determinada de acordo com a NBR 6508, média de dez determinações;

$D_i$  = massa específica dos grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm, média de cinco determinações;

$M_1$  = % em massa, da fração da amostra que passa na peneira de 4,8 mm;

$M_2$  = % em massa, da fração da amostra retida na peneira de 4,8 mm;

$\rho_s$  = massa específica dos grãos de material total contendo frações passada e retida na peneira de 4,8 mm.

Observa-se no Quadro 4.5, que a massa específica dos grãos retidos na peneira de 4,8mm ( $D_i$ ) é superior à massa específica dos grãos que passam na peneira de 4,8mm ( $\delta$ ), para as três amostras de escória de aciaria estudadas. Isso pode ser explicado pela maior concentração de metais nas faixas de maior granulometria.

Considerando-se os resultados dos ensaios utilizados para determinação da massa específica dos grãos ( $\rho_s$ ), pode-se verificar que a diferença entre os resultados das amostras é muito pequena e que os resultados são praticamente iguais. Se a massa específica das amostras de escória de aciaria do estudo ( $\rho_s$ ) for comparada com os valores exigidos pela especificação de escórias de aciaria para pavimentos rodoviários DNIT-EM 262/94, verifica-se que a massa específica dos grãos atende a faixa de 3000 a 3500 kg/m<sup>3</sup>.

A elevada massa específica dos grãos das amostras de escória de aciaria deste estudo, em torno de 3400 kg/m<sup>3</sup>, em relação aos materiais convencionais, em torno de 2700 kg/m<sup>3</sup>, influencia negativamente no transporte, devido ao aumento do peso da carga transportada para um mesmo volume. Porém, é uma vantagem quando se quer algum tipo de estabilização por ação da gravidade, como confinamento e resistência à erosão por ação de água.

#### **4.2.6 Massa unitária no estado solto**

No Quadro 4.6, são apresentados os resultados de massa unitária no estado solto das amostras de escória de aciaria LD do estudo de acordo com o método da NBR 7251/82. Os resultados apresentados representam uma média de quatro determinações, onde se obteve um desvio padrão máximo de 10 kg/m<sup>3</sup> (SILVA et al., 2005).

| <b>Amostras</b> | <b>Massa unitária no estado solto (kg/m<sup>3</sup>)</b> |
|-----------------|--|
| Não tratada     | 2010   |
| Tratada 1       | 1980   |
| Tratada 2       | 2000   |

**Quadro 4.6 - Massa unitária das amostras analisadas de escória de aciaria LD do estudo (SILVA et al., 2005)**

Observa-se que os valores de massa unitária apresentam-se fora do limite estabelecido pela especificação de escória de aciaria para pavimentos rodoviários DNIT-EM 262/94, entre 1500 e 1700 kg/m<sup>3</sup>, porém a única desvantagem associada a essa elevada massa unitária é o aumento do custo do transporte à obra em relação a materiais mais leves (JUKES; THOMAS, s.d.; IBS, 1999). Além disso, a maior massa unitária pode ser uma vantagem quando se quer algum tipo de estabilização por ação da gravidade, como confinamento e resistência à erosão por ação de água (MOTZ; GEISELER, 2001; JUCKES, 2003)

#### **4.2.7 Absorção**

No Quadro 4.7, são apresentados os resultados de absorção das amostras de escória de aciaria LD do estudo de acordo com o método prescrito pela NBR 9937/87 para a fração retida na peneira de 4,8 mm de abertura (SILVA et al., 2005). Observa-se que os valores de absorção se apresentam fora do limite estabelecido pela especificação de escória de aciaria para pavimentos rodoviários DNIT-EM 262/94, entre 1% e 2%, porém não se encontrou evidências na literatura que a absorção, no caso de camadas granulares, influencia na expansão ou outras características indesejáveis.

| <b>Amostras</b> | <b>Absorção (%)</b> |
|-----------------|---------------------|
| Não tratada     | 2,6                 |
| Tratada 1       | 2,5                 |
| Tratada 2       | 2,5                 |

**Quadro 4.7 - Absorção das amostras analisadas de escória de aciaria LD do estudo (SILVA et al., 2005)**

#### **4.2.8 Abrasão Los Angeles**

No Quadro 4.8, são apresentados os resultados do ensaio de abrasão *Los Angeles* das amostras de escória de aciaria LD do estudo para a graduação B (SILVA et al., 2005). Observa-se que os valores de abrasão Los Angeles se apresentam abaixo do limite máximo de 25%, estabelecido pela especificação de escória de aciaria para pavimentos rodoviários DNIT-EM 262/94. Além disso, esses valores de abrasão estão de acordo com os valores encontrados na literatura (BALTAZAR, 2001; PENA, 2004).

| Amostras    | Abrasão <i>Los Angeles</i> (%) |
|-------------|--------------------------------|
| Não tratada | 14,1                           |
| Tratada 1   | 14                             |
| Tratada 2   | 11,2                           |

**Quadro 4.8 - Abrasão *Los Angeles* das amostras analisadas de escória de aciaria LD do estudo (SILVA et al., 2005)**

#### 4.2.9 Caracterização ambiental

Nesse item são apresentados e discutidos os resultados de caracterização ambiental das amostras de escória de aciaria não tratada, tratada 1 e tratada 2 referentes aos ensaios de lixiviação e solubilização quanto à toxicidade, segundo a norma NBR 10004/2004 – Classificação de Resíduos Sólidos, da ABNT (SILVA et al., 2005).

Os resultados dos metais analisados no extrato lixiviado da escória de aciaria em estudo são apresentados no Quadro 4.9, onde os elementos analisados (mercúrio, arsênio, cádmio, chumbo, cromo, selênio, prata, bário e fluoreto) são confrontados com os limites máximos permitidos pela norma NBR 10004/2004 (SILVA et al., 2005).

Quanto à toxicidade analisada pelo ensaio de lixiviação (Quadro 4.9), todas as três amostras de escória de aciaria do estudo (não-tratada, tratada 1 e tratada 2) apresentaram os valores inferiores aos limites estabelecidos pela NBR 10004/2004 para todos os elementos analisados (SILVA et al., 2005).

| Elemento químico | Amostras de escória de aciaria LD |                  |                  | Limite máximo permitido NBR 10004/2004 (mg/L) |
|------------------|-----------------------------------|------------------|------------------|---|
|                  | Não tratada (mg/L)                | Tratada 1 (mg/L) | Tratada 2 (mg/L) |   |
| Mercúrio         | 0,00041                           | 0,00244          | 0,00175          | 0,10  |
| Arsênio          | 0,00296                           | 0,00139          | 0,00257          | 1,0   |
| Cádmio           | 0,00105                           | 0,00077          | 0,00129          | 0,50  |
| Chumbo           | 0,00019                           | 0,00268          | 0,00219          | 1,0   |
| Cromo            | 0,00998                           | 0,01041          | 0,00997          | 5,0   |
| Selênio          | 0,00048                           | 0,00060          | 0,00047          | 1,0   |
| Prata            | 0,00440                           | 0,00196          | 0,00059          | 5,0   |
| Bário            | 0,7538                            | 0,2513           | 0,3948           | 70,0  |
| Fluoreto         | 0,64                              | 0,55             | 0,59             | 150,0   |

**Quadro 4.9 - Análise química no extrato lixiviado das amostras de escória de aciaria: não-tratada, tratada 1 e tratada 2 (SILVA et al., 2005)**

Os resultados de metais e não-metais analisados no extrato solubilizado da escória de aciaria em estudo são apresentados no Quadro 4.10, onde os elementos analisados (mercúrio, arsênio, cádmio, chumbo, cromo, selênio, prata, bário, zinco, cobre, ferro, manganês, sódio, fluoreto, cloreto e sulfato) são confrontados com os limites máximos permitidos pela norma NBR 10004/2004 (SILVA et al., 2005).

Quanto a toxicidade analisada pelo ensaio de solubilização (Quadro 4.10), a amostra de escória de aciaria tratada 1 para o elemento bário e a amostra tratada 2 para os elementos bário e mercúrio apresentaram valores superiores aos limites da NBR 10004/2004, (SILVA et al., 2005).

| Elemento químico | Amostras de escória de aciaria LD |                  |                  | Limite máximo permitido NBR 10004/2004 (mg/L) |
|------------------|-----------------------------------|------------------|------------------|---|
|                  | Não tratada (mg/L)                | Tratada 1 (mg/L) | Tratada 2 (mg/L) |   |
| Mercúrio         | 0,00039                           | 0,00090          | <b>0,00138</b>   | 0,0010  |
| Arsênio          | Não detectado                     | Não detectado    | 0,00325          | 0,010   |
| Cádmio           | 0,00005                           | 0,00017          | 0,00014          | 0,0050  |
| Chumbo           | 0,00304                           | 0,00024          | 0,00052          | 0,010   |
| Cromo            | 0,0020                            | 0,0059           | 0,0063           | 0,050   |
| Selênio          | 0,000368                          | 0,00035          | 0,000462         | 0,010   |
| Prata            | 0,00012                           | 0,000040         | 0,000068         | 0,050   |
| Bário            | 0,242                             | <b>1,057</b>     | <b>0,866</b>     | 0,70  |
| Alumínio         | 0,087                             | 0,080            | 0,052            | 0,20  |
| Zinco            | 0,038                             | 0,038            | 0,036            | 5,0   |
| Cobre            | 0,0020                            | 0,0043           | 0,0049           | 2,0   |
| Ferro            | 0,078                             | 0,127            | 0,146            | 0,30  |
| Manganês         | 0,014                             | 0,016            | 0,014            | 0,10  |
| Sódio            | 5,202                             | 1,233            | 1,766            | 200,0   |
| Fluoreto         | 0,31                              | 0,19             | 0,18             | 1,50  |
| Cloreto          | 54,61                             | 13,36            | 12,86            | 250,0   |
| Sulfato          | 3,87                              | 2,06             | 2,82             | 250,0   |

Quadro 4.10 - Análise química no extrato solubilizado das amostras de escória de aciaria: não-tratada, tratada 1 e tratada 2 (SILVA et al., 2005)

### 4.3 Ensaios de compactação

Os ensaios de compactação, utilizando os procedimentos com reuso e sem reuso de material, foram realizados na amostra de escória de aciaria LD tratada 1, enquanto que a amostra de escória de aciaria LD não tratada foi submetida apenas ao ensaio de compactação utilizando o procedimento sem reuso de material. Não foram realizados ensaios de compactação com a amostra de escória de aciaria LD tratada 2.

Os resultados são apresentados de acordo com o método de compactação utilizado, com reuso e sem reuso de material, para depois serem analisados os efeitos do procedimento de compactação (com reuso e sem reuso), da energia de compactação (Proctor normal e Proctor modificado), das amostras utilizadas (não tratada e tratada 1) e, também, a determinação da umidade ótima de compactação para as amostras de escória de aciaria LD não tratada e tratada 1.



### 4.3.1 Ensaios de compactação com reuso de material

No Quadro 4.11, apresenta-se a variação da umidade ao longo da altura dos corpos-de-prova (topo, meio e base) que sofreram drenagem durante o ensaio de compactação com energia do Proctor Normal da amostra tratada 1 utilizando o procedimento com reuso de material. O material para determinação dessa umidade foi retirado imediatamente após a compactação do corpo-de-prova. Além da umidade referente à posição do corpo-de-prova ao longo da altura que é de 114 mm, apresenta-se também (Quadro 4.11) uma média dessas três determinações de umidade, que foi o valor de umidade utilizado nos resultados de compactação com reuso de material (Figura 4.5), juntamente com o número do ensaio de compactação e a numeração do corpo-de-prova drenado.

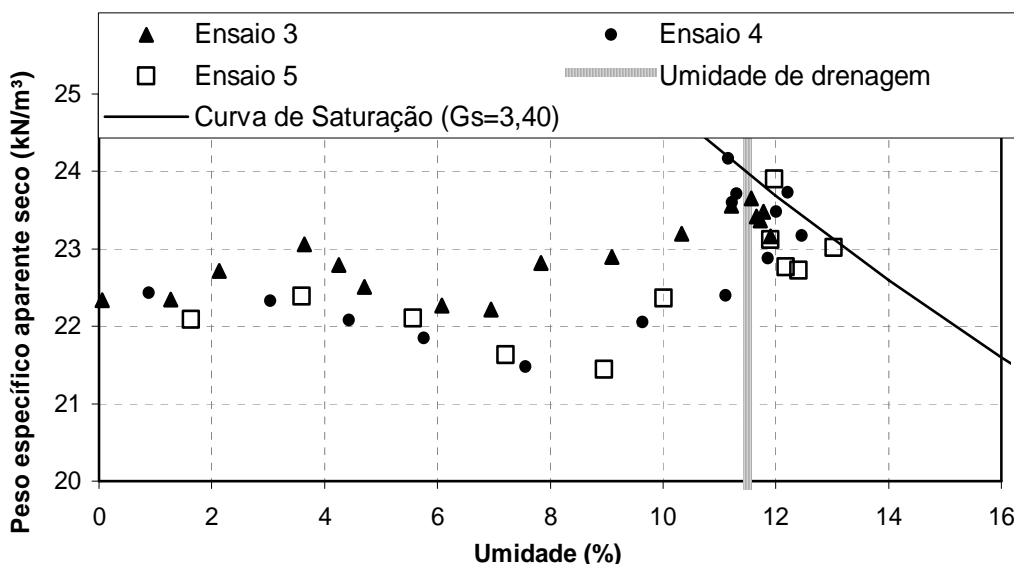
| Ensaio de compactação | Corpo-de-prova drenado (CPD) | Umidade ao longo do corpo-de-prova (%) |       |       |       |
|-----------------------|------------------------------|--|-------|-------|-------|
|                       |                              | Topo                                   | Meio  | Base  | Média |
| 3                     | 1                            | 12,02                                  | 11,78 | 9,86  | 11,22 |
|                       | 2                            | 13,34                                  | 11,42 | 10,97 | 11,91 |
|                       | 3                            | 13,06                                  | 11,30 | 10,60 | 11,65 |
|                       | 4                            | 13,33                                  | 11,88 | 9,95  | 11,72 |
|                       | 5                            | 12,82                                  | 12,04 | 10,49 | 11,78 |
| 4                     | 6                            | 12,14                                  | 11,22 | 10,54 | 11,30 |
|                       | 7                            | 14,71                                  | 12,09 | 10,59 | 12,46 |
|                       | 8                            | 12,64                                  | 11,12 | 9,92  | 11,23 |
| 5                     | 9                            | 13,22                                  | 12,60 | 11,40 | 12,41 |
|                       | 10                           | 13,78                                  | 13,52 | 11,78 | 13,03 |

**Quadro 4.11 - Variação da umidade ao longo da altura dos corpos-de-prova que sofreram drenagem durante o ensaio de compactação, procedimento com reuso de material, amostra tratada 1, energia do Proctor normal**

Pode-se observar no Quadro 4.11 que a umidade na maioria dos corpos-de-prova, que tiveram drenagem durante a compactação, decresce do topo para a base. Possivelmente, este comportamento se deve ao espaço existente entre o disco espaçador e o molde cilíndrico que faz com que a água do material das camadas inferiores drene e das camadas superiores não tenha tempo suficiente para drenar.

A tomada de três pontos para o ensaio de umidade possivelmente não foi suficiente para a determinação da umidade representativa do corpo-de-prova nos resultados de compactação, já que foram obtidos pontos acima e muito próximos da curva de saturação (Figura 4.5). A forma garantida de se ter a umidade do todo, seria usar todo o corpo-de-prova, o que não é prático. Também, isso só poderia ser realizado no ensaio de compactação sem reuso de material e sem seu aproveitamento para outros ensaios como Índice de Suporte Califórnia (CBR) e expansão.

Foram realizados três ensaios de compactação, em datas diferentes, utilizando o procedimento com reuso de material com a mesma amostra de escória de aciaria LD tratada 1, e os resultados desses ensaios são apresentados na Figura 4.5, juntamente com a curva de saturação calculada com densidade relativa dos sólidos<sup>16</sup> ( $G_s$ ) igual a 3,40.



**Figura 4.5 - Resultados dos ensaios de compactação com reuso de material, amostra tratada 1, energia do Proctor normal**

Analisando-se a Figura 4.5, observa-se que os resultados dos ensaios de compactação da amostra de escória de aciaria LD tratada 1 com reuso de material não apresentam os parâmetros de compactação bem definidos, tendo um comportamento semelhante ao de uma areia limpa.

Pode-se justificar esse resultado pela pequena quantidade de finos existente (<6%) e pelas características não plásticas das amostras de escória de aciaria LD estudadas. Sanchez-Leal (2002) observou, em sua pesquisa com solos arenosos, que para solos com teores de finos menores que 15% as curvas de compactação apresentaram vários picos e os parâmetros de compactação não ficaram bem definidos. Lee e Suedkamp (1972) apresentam um estudo de compactação relacionado com o limite de liquidez, onde os materiais com limite de liquidez entre 30% e 70% apresentam curvas de compactação definidas (um pico bem definido) e materiais com limite de liquidez superior a 70% e inferior a 30% tendem a ter curvas de compactação irregulares. Além disso, Machado (2000) já havia identificado em sua pesquisa

<sup>16</sup> A densidade relativa dos sólidos foi calculada dividindo-se a massa específica dos grãos ( $\rho_s$ ) de escória de aciaria pela massa específica da água à temperatura de 4°C.

com escória de aciaria LD nacional que a curva de compactação da escória de aciaria estudada teve um comportamento semelhante ao de um solo arenoso.

Observa-se, também, na Figura 4.5, uma pequena redução do peso específico aparente seco no intervalo de 4 a 10% de umidade. Possivelmente, essa redução deve-se ao efeito da capilaridade no material, nesse intervalo de umidade. Antes e após esse intervalo, o peso específico aparente seco aumenta para 22,5 e 23,0 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Como se pode observar na Figura 4.5, foi identificado um valor determinado de umidade, no caso destes resultados, igual a 11,5%, a partir do qual os corpos-de-prova apresentam drenagem de água quando compactados. Essa umidade foi definida como *umidade de drenagem*. A partir dessa umidade de drenagem, é difícil fazer um controle mais preciso da umidade que os corpos-de-prova têm quando submetidos aos ensaios de compactação. As umidades de drenagem são encontradas em todos os resultados de ensaios de compactação deste estudo. Pode-se notar também que, na grande maioria dos resultados de ensaios de compactação mostrados neste estudo, os pontos dos ensaios de compactação apresentam maior dispersão quando as umidades são superiores ao valor da umidade de drenagem.

Possivelmente, na Figura 4.5, os pesos específicos superiores a 23,0 kN/m<sup>3</sup> e com umidades superiores a 11,5%, são devido à heterogeneidade do material para os ensaios de umidade, pois esses corpos-de-prova tiveram drenagem de água durante a compactação. Um outro ponto que sugere falha na determinação da umidade representativa do corpo-de-prova é que dois desses pontos da Figura 4.5 estão acima da curva de saturação e um ponto encontra-se sobre a curva de saturação, que é o limite possível do ensaio de compactação.

#### **4.3.2 Ensaio de compactação sem reuso de material**

A variação da umidade ao longo da altura dos corpos-de-prova (topo, meio e base) que sofreram drenagem durante o ensaio de compactação com energia do Proctor Normal da amostra tratada 1 utilizando o procedimento sem reuso de material, é apresentada no Quadro 4.12, deve-se atentar que o material para determinação dessa umidade foi retirado imediatamente após a compactação do corpo-de-prova. Além da umidade referente à posição dos corpos-de-prova ao longo da altura, apresenta-se também (Quadro 4.12) uma média dessas três determinações, que foi o valor de umidade utilizado nos resultados de compactação sem reuso de material da amostra tratada 1 (Figura 4.6), juntamente com o número do ensaio de compactação e a numeração do corpo-de-prova drenado. Pode-se observar que os resultados do Quadro 4.12 foram semelhantes aos resultados do ensaio de

compactação com reuso de material (Quadro 4.11), com a umidade decrescendo do topo para a base na maioria dos casos.

| Ensaio de compactação | Corpo-de-prova drenado (CPD) | Umidade ao longo do corpo-de-prova (%) |       |       |       |
|-----------------------|------------------------------|--|-------|-------|-------|
|                       |                              | Topo                                   | Meio  | Base  | Média |
| 6                     | 11                           | 13,21                                  | 12,47 | 12,02 | 12,56 |
|                       | 12                           | 15,62                                  | 15,18 | 13,35 | 14,72 |
|                       | 13                           | 14,36                                  | 13,31 | 12,98 | 13,55 |
| 7                     | 14                           | 12,91                                  | 12,07 | 12,38 | 12,45 |
|                       | 15                           | 13,07                                  | 12,28 | 11,64 | 12,33 |
|                       | 16                           | 12,77                                  | 12,02 | 12,63 | 12,47 |
|                       | 17                           | 13,18                                  | 12,22 | 12,14 | 12,51 |

**Quadro 4.12 - Variação da umidade ao longo da altura dos corpos-de-prova que sofreram drenagem durante o ensaio de compactação, procedimento sem reuso de material, amostra tratada 1, energia do Proctor normal**

A variação da umidade ao longo da altura dos corpos-de-prova (topo, meio e base) da amostra não tratada, que sofreram drenagem nos ensaios de compactação com energia do Proctor normal, é apresentada no Quadro 4.13, onde se observa uma diminuição da umidade do topo para a base em três corpos-de-prova (CPD 18, 20 e 21), enquanto que no outro (CPD 19) a umidade cresce do topo para a base.

O mesmo tipo de amostra não tratada quando submetida ao ensaio de compactação com energia do Proctor modificado apresentou a variação da umidade ao longo da altura dos corpos-de-prova semelhante à do ensaio sem reuso de material feito com a amostra tratada 1, esta variação da umidade pode ser observada no Quadro 4.14. Os diferentes comportamentos da variação da umidade ao longo da altura dos corpos-de-prova (CPD 16 no Quadro 4.12, CPD 20 no Quadro 4.13, CPD 25 no Quadro 4.14) podem ser explicados pela heterogeneidade do material e pelo tempo para retirada do material para o ensaio de umidade.

| Ensaio de compactação | Corpo-de-prova drenado (CPD) | Umidade ao longo do corpo-de-prova (%) |       |       |       |
|-----------------------|------------------------------|--|-------|-------|-------|
|                       |                              | Topo                                   | Meio  | Base  | Média |
| 11                    | 18                           | 14,19                                  | 13,29 | 7,44  | 11,64 |
| 12                    | 19                           | 10,12                                  | 11,62 | 13,19 | 11,64 |
|                       | 20                           | 13,98                                  | 13,06 | 12,70 | 13,25 |
| 13                    | 21                           | 12,85                                  | 12,18 | 11,86 | 12,30 |

**Quadro 4.13 - Variação da umidade ao longo da altura dos corpos-de-prova que sofreram drenagem durante o ensaio de compactação, procedimento sem reuso de material, amostra não tratada, energia do Proctor normal**

| Ensaio de compactação | Corpo-de-prova drenado (CPD) | Umidade ao longo do corpo-de-prova (%) |       |      |       |
|-----------------------|------------------------------|--|-------|------|-------|
|                       |                              | Topo                                   | Meio  | Base | Média |
| 14                    | 22                           | 11,97                                  | 11,49 | 9,66 | 11,04 |
|                       | 23                           | 12,82                                  | 11,51 | 8,81 | 11,05 |
| 15                    | 24                           | 13,12                                  | 11,55 | 7,79 | 10,82 |
|                       | 25                           | 10,35                                  | 8,91  | 9,35 | 9,54  |
| 16                    | 26                           | 12,71                                  | 10,05 | 8,74 | 10,50 |
|                       | 27                           | 11,06                                  | 9,57  | 9,15 | 9,93  |

Quadro 4.14 - Variação da umidade ao longo da altura dos corpos-de-prova que sofreram drenagem durante o ensaio de compactação, procedimento sem reuso de material, amostra não tratada, energia do Proctor modificado

Os resultados dos ensaios de compactação com energia do Proctor normal utilizando procedimento sem reuso de material para a amostra tratada 1 são apresentados na Figura 4.6.

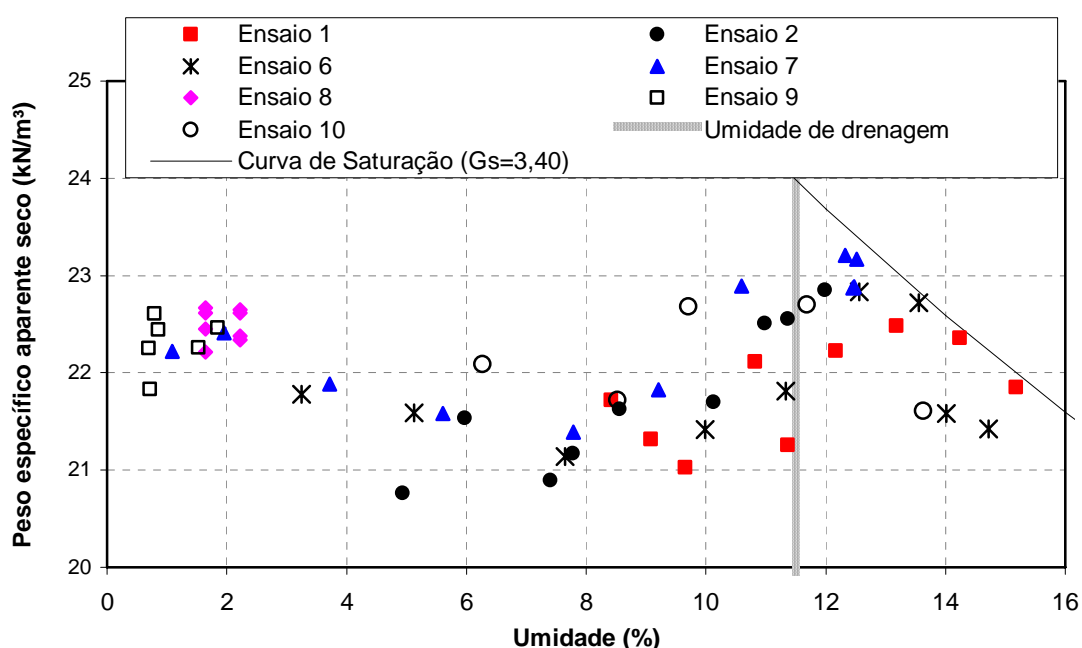
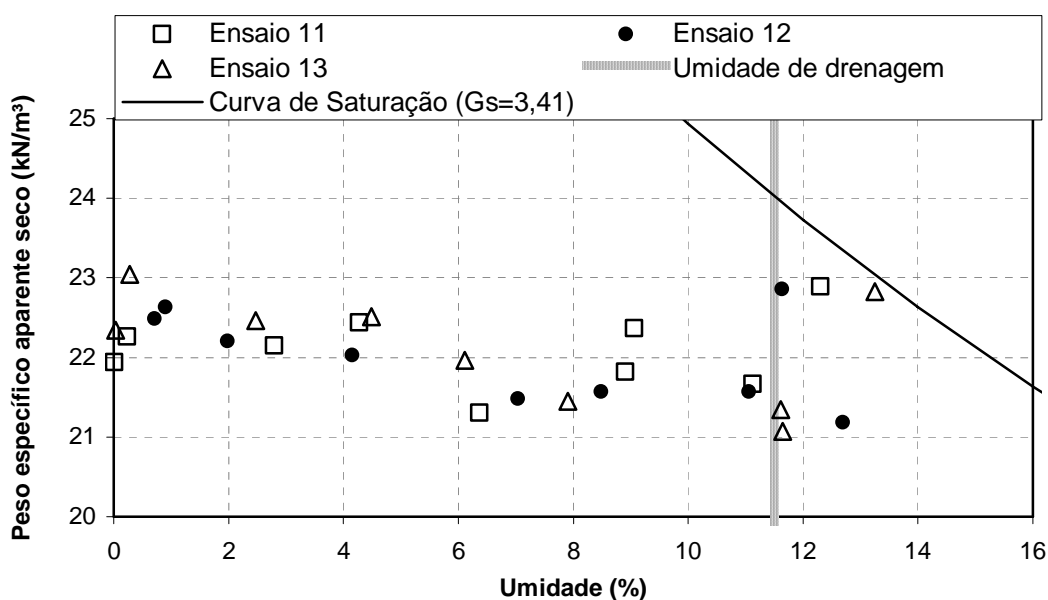


Figura 4.6 - Resultados dos ensaios de compactação sem reuso de material, amostra tratada 1, energia do Proctor normal

Analisando a Figura 4.6, pode-se considerar que os resultados foram semelhantes aos resultados dos ensaios com reuso de material (Figura 4.5). Assim como nos resultados com reuso de material, se tem um intervalo de umidade onde a capilaridade influencia a compactação (2 a 10%) e, também, os dois máximos de peso específico aparente seco, em torno de  $22,5 \text{ kN/m}^3$ , encontram-se antes e após esse intervalo de umidade. Além disso, a umidade de drenagem dos corpos-de-prova também é de 11,5%. Apesar da semelhança com os resultados com reuso de material, os pontos obtidos para o procedimento sem reuso de material tiveram pesos específicos ligeiramente inferiores e não há pontos acima da curva de saturação, apesar de alguns pontos estarem muito próximos dessa curva.

Ainda na Figura 4.6, pode-se observar que os resultados do ensaio 7, realizado com o material que ficou em processo de cura durante 24 horas após adição de água, teve um comportamento parecido com os demais resultados dos ensaios de compactação sem reuso de material, que foram compactados logo após a adição de água. Esse comportamento do ensaio 7 demonstra que a adição de água 24 horas antes da realização do ensaio de compactação não influenciou nos resultados desse ensaio.

Na Figura 4.7, são apresentados os resultados dos ensaios de compactação com energia do Proctor normal sem reuso de material para a amostra não tratada. Foram realizados três ensaios e os procedimentos foram os mesmos para realização dos ensaios de compactação da amostra tratada 1.

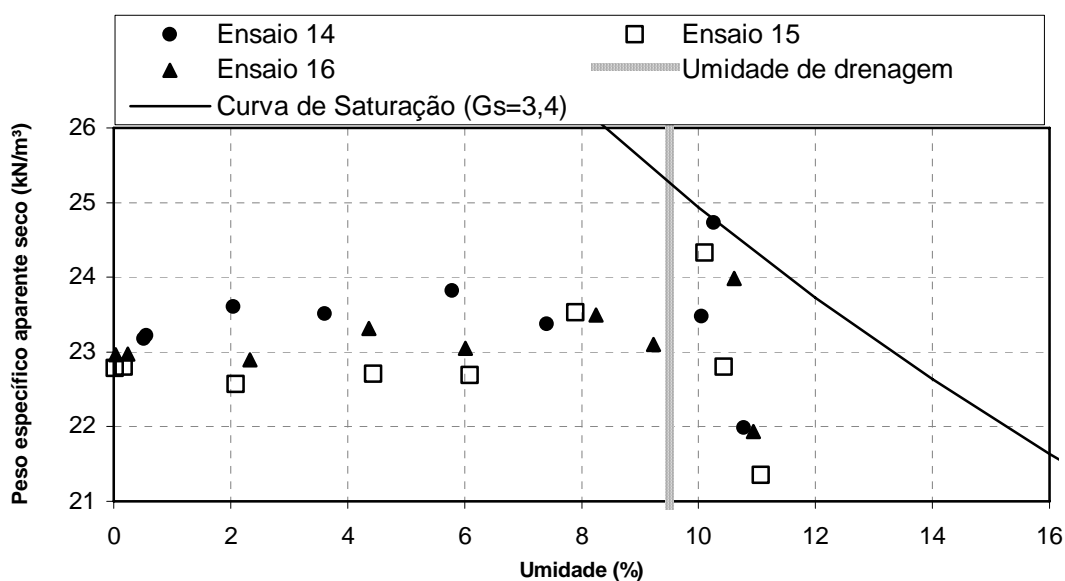


**Figura 4.7 - Resultados dos ensaios de compactação sem reuso de material, amostra não tratada, energia do Proctor normal**

Conforme apresentado na Figura 4.7, verifica-se que os resultados dos ensaios de compactação realizados na amostra não tratada foram semelhantes aos resultados dos ensaios realizados na amostra tratada 1 (Figura 4.5 e Figura 4.6). Verifica-se novamente a não definição de um valor de umidade ótima, bem como a definição de um trecho de umidade onde a capilaridade influencia a compactação, entre 2 e 9%, porém o máximo peso específico aparente seco se encontra antes desse intervalo, em torno de 22,5 kN/m<sup>3</sup>. Assim como os resultados dos ensaios de compactação sem reuso de material da amostra tratada 1 (Figura 4.6), os valores de pesos específicos obtidos para a amostra não tratada (Figura 4.7) foram inferiores aos valores dos ensaios com reuso de material da amostra tratada 1 (Figura 4.5).

Também se observa na Figura 4.7 que alguns pontos ficaram muito próximos da curva de saturação, mas sempre abaixo dessa curva.

Procederam-se na amostra não tratada, além dos ensaios de compactação com energia do Proctor normal, ensaios de compactação com energia do Proctor modificado e procedimento sem reuso de material, que são apresentados na Figura 4.8. Foram realizados três ensaios de compactação usando a mesma metodologia utilizada para as outras amostras de escória de aciaria LD deste estudo.

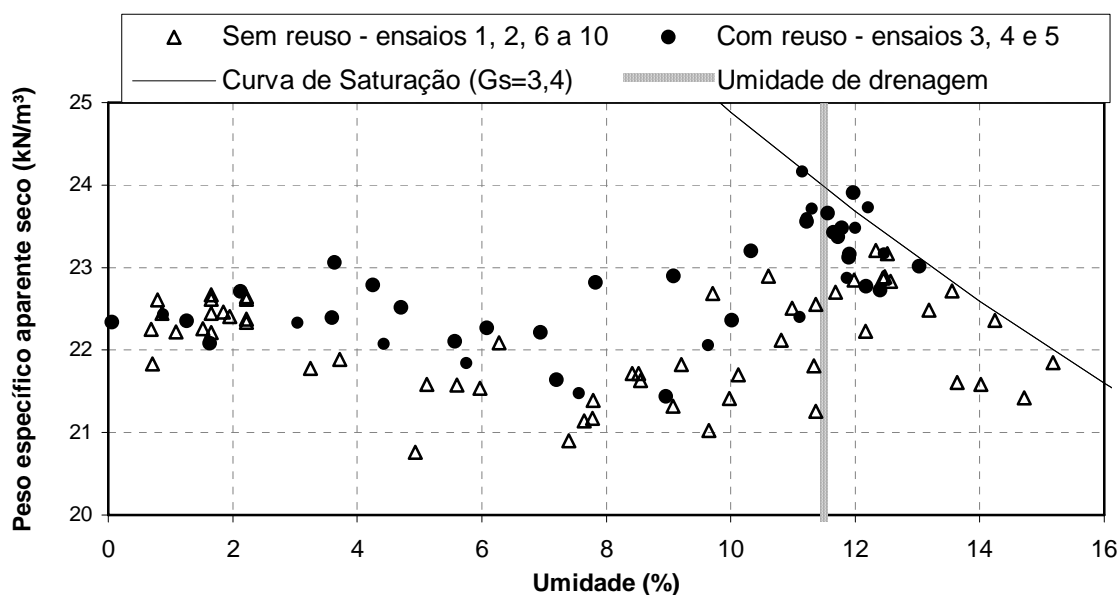


**Figura 4.8 - Resultados dos ensaios de compactação sem reuso de material, amostra não tratada, energia do Proctor modificado**

Como se pode observar na Figura 4.8, obtiveram-se, para os resultados dos ensaios de compactação com energia do Proctor modificado da amostra não tratada, pesos específicos superiores aos resultados dos ensaios de compactação com energia do Proctor normal para a mesma amostra (Figura 4.7), mas não muito (cerca de 6% superiores). Assim como nos resultados dos ensaios de compactação com energia do Proctor normal, também não se verifica (Figura 4.8) a definição de um valor de umidade ótima, existindo uma grande dispersão dos pesos específicos para os pontos que se encontram após a umidade de drenagem, que foi de 9,5%. Diferentemente dos resultados dos ensaios de compactação com energia do Proctor normal, não se observa na Figura 4.8 uma influência significativa da capilaridade nos resultados do ensaio de compactação, apesar da dispersão dos pesos específicos um pouco maior no trecho de 2 a 6% de umidade.

### 4.3.3 Efeito do procedimento de compactação

Para uma melhor comparação dos resultados dos dois procedimentos de compactação utilizados, são apresentados, na Figura 4.9, os resultados dos ensaios de compactação dos procedimentos com e sem reuso de material da amostra tratada 1 compactada com energia do Proctor normal. Apresenta-se também a umidade em que ocorre drenagem de água durante a compactação, que foi igual a 11,5% para os dois procedimentos utilizados.



**Figura 4.9 - Resultados dos ensaios de compactação utilizando os procedimentos com e sem reuso de material, amostra tratada 1, energia do Proctor normal**

Analisando a Figura 4.9, pode-se observar um comportamento semelhante nos resultados dos dois procedimentos. Pode-se observar, também, que os resultados dos ensaios com reuso de material tiveram uma ligeira tendência a ter peso específico aparente seco superior aos ensaios sem reuso. Isto poderia ser explicado por uma maior fragmentação de grãos nos ensaios com reuso de material, no entanto, análises granulométricas não comprovaram tal tendência.

Para se verificar as diferenças estatísticas entre os procedimentos com reuso e sem reuso de material, foi feita uma análise de regressão com os resultados dos ensaios de compactação da Figura 4.9, pois neste caso o uso de uma análise estatística utilizando teste de médias não é indicado (REGAZZI, 1999), devido à existência de uma análise de pares de dados relacionados (peso específico aparente seco e umidade) e não valores médios de peso específico aparente seco e umidade.

Deve-se atentar que o objetivo dessa análise estatística é comparar os dois procedimentos de compactação utilizados segundo o modelo considerado (reta), e não encontrar uma equação linear simples que represente os resultados dos ensaios de compactação realizados. Logo, a



partir dos resultados dos ensaios de compactação da Figura 4.9 utilizando os pontos que tiveram umidade inferior a 11%<sup>17</sup>, foi feita uma regressão linear simples se obtendo os dois modelos de regressão apresentados na Figura 4.10. Seguindo a metodologia descrita no item 3.7, foi testada a hipótese de que os dois modelos de regressão têm os coeficientes angulares iguais, encontrando-se um p-valor do teste t igual a 0,205 (p-valor > 0,05), e, também, foi testada a hipótese de que os dois modelos de regressão têm os coeficientes lineares iguais, encontrando-se um p-valor do teste t igual a 0,741 (p-valor > 0,05). Portanto, nenhuma das duas hipóteses testadas foi rejeitada pelo teste t a um nível de significância de 5%, e isso quer dizer que não foram encontradas evidências estatísticas para afirmar que os resultados dos ensaios dos dois procedimentos de compactação são diferentes.

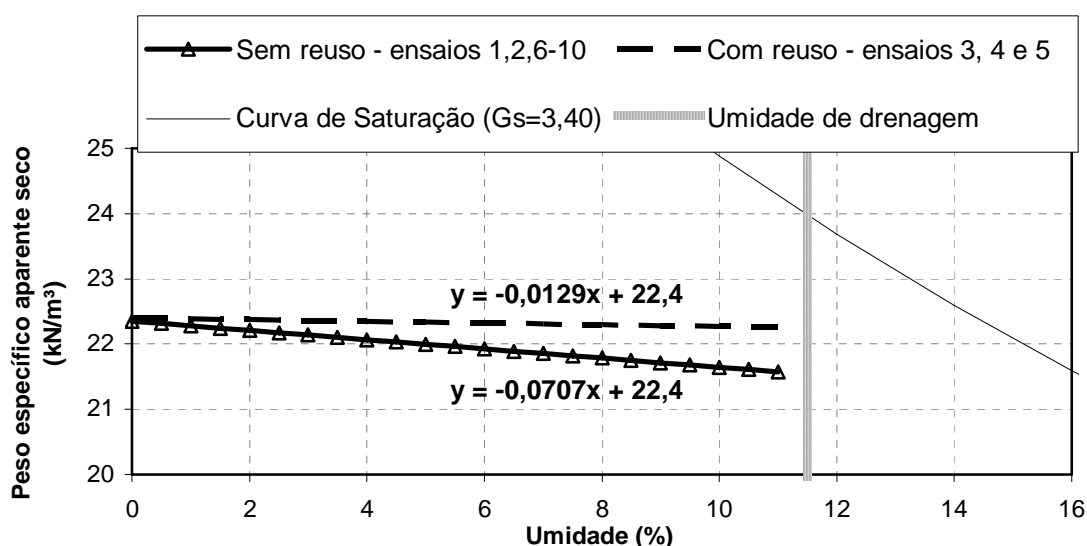
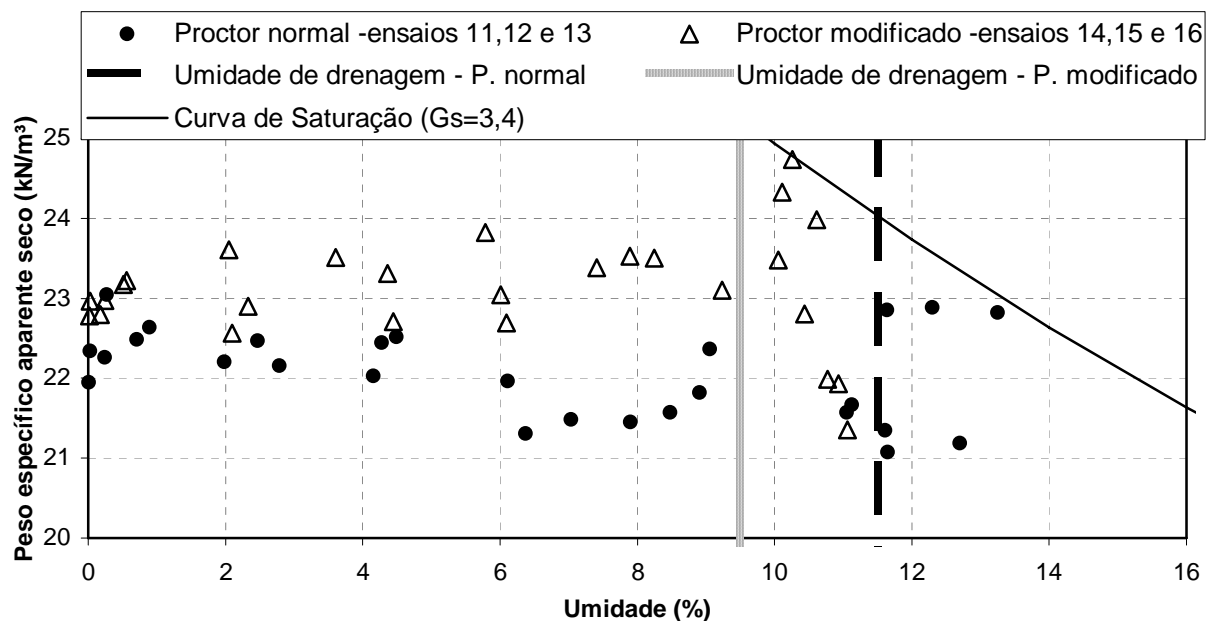


Figura 4.10 - Resultados da regressão linear simples a partir dos resultados dos ensaios de compactação utilizando os procedimentos com e sem reuso de material, amostra tratada 1, energia do Proctor normal

#### 4.3.4 Efeito da energia de compactação

Com o objetivo de verificar o efeito de uma maior energia no ensaio de compactação sem reuso de material, apresentam-se na Figura 4.11 os resultados dos ensaios de compactação da amostra não tratada usando as energias do Proctor normal e do Proctor modificado.

<sup>17</sup> Só foram utilizados os pontos com umidade abaixo de 11% devido a não definição da umidade representativa do corpo-de-prova próximo e acima da umidade de drenagem que foi de 11,5%.

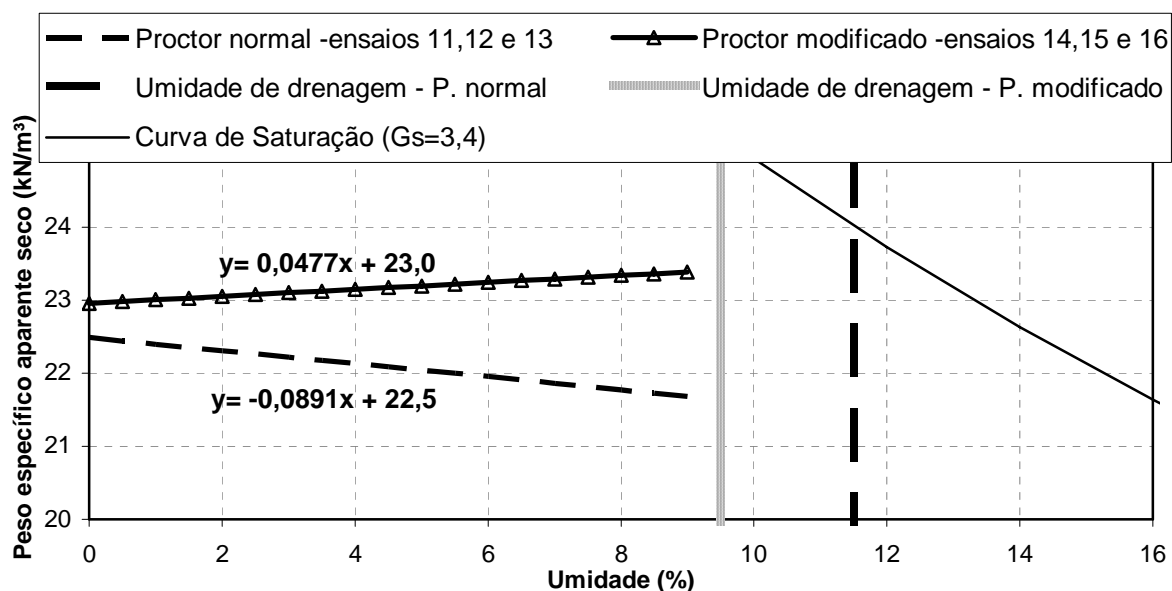


**Figura 4.11 - Resultados dos ensaios de compactação utilizando as energias do Proctor normal e do Proctor modificado, sem reuso de material, amostra não tratada**

Analisando a Figura 4.11, pode-se notar que os valores de peso específico aparente seco dos ensaios com energia do Proctor modificado são superiores aos valores dos ensaios com energia do Proctor normal. Entretanto, essa diferença não é muito significativa, em comparação com a variação obtida para solos argilosos. Nota-se também, que a umidade de drenagem para o ensaio realizado com energia do Proctor modificado (9,5%) possui um valor menor que a mesma umidade para o ensaio realizado com energia do Proctor normal (11,5%). Essa diferença entre os dois valores de umidade de drenagem era esperada, já que os corpos-de-prova compactados com a energia do Proctor modificado recebem mais golpes por camada, cerca de 4 vezes mais, que os corpos-de-prova compactados com energia do Proctor normal, expulsando mais água durante a compactação.

Para se verificar as diferenças estatísticas entre os resultados dos ensaios de compactação utilizando as energias de compactação do Proctor normal e do Proctor modificado, foi feita uma análise de regressão com os resultados dos ensaios de compactação da Figura 4.11, pois, assim como na análise do efeito do procedimento de compactação, o uso de uma análise estatística utilizando teste de médias não é indicado (REGAZZI, 1999). A metodologia utilizada nesta análise estatística é descrita no item 3.7, que foi a mesma metodologia da análise do efeito do procedimento de compactação (item 4.3.4) e a metodologia detalhada utilizada nesta análise de modelos de regressão linear simples pode ser encontrada em Montgomery e Peck (1992).

Logo, a partir dos resultados dos ensaios de compactação da Figura 4.11 utilizando os pontos que tiveram umidade inferior a 11%<sup>18</sup> para a energia do proctor normal e inferior a 9,5% de umidade para a energia do Proctor modificado, foi feita uma regressão linear simples se obtendo os dois modelos de regressão apresentados na Figura 4.12. Seguindo a metodologia utilizada, foi testada a hipótese de que os dois modelos de regressão têm os coeficientes angulares iguais, encontrando-se um p-valor do teste t igual a 0,089 (p-valor > 0,05), e, também, foi testada a hipótese de que os dois modelos de regressão têm os coeficientes lineares iguais, encontrando-se um p-valor do teste t igual a 0,144 (p-valor > 0,05). Portanto, nenhuma das duas hipóteses testadas foi rejeitada pelo teste t a um nível de significância de 5%, e isso quer dizer que não foram encontradas evidências estatísticas para afirmar que os resultados dos ensaios de compactação utilizando as duas energias são diferentes. Entretanto, apesar da não rejeição da hipótese de que os dois modelos de regressão têm os coeficientes angulares iguais, deve-se chamar a atenção para a aproximação do p-valor encontrado (0,089) do nível de significância de 0,05. Deve-se atentar que apesar de não se conseguir provar que esses resultados utilizando as duas energias são estatisticamente diferentes, isso não implica que, na prática, a energia de compactação modificada tem o mesmo efeito que a energia normal, pois deve-se fazer também uma análise em termos de resistência e deformação.



**Figura 4.12 - Resultados da regressão linear simples a partir dos resultados dos ensaios de compactação utilizando as energias do Proctor normal e do Proctor modificado, sem reuso de material, amostra não tratada**

<sup>18</sup> Só foram utilizados os pontos com umidade abaixo de 11% devido a não definição da umidade representativa do corpo-de-prova próximo e acima da umidade de drenagem que foi de 11,5%.

#### 4.3.5 Efeito das amostras

Para se comparar o comportamento das amostras tratada 1 e não tratada, são apresentados, na Figura 4.13, os resultados dos ensaios de compactação das duas amostras utilizando o procedimento sem reuso de material e a energia do Proctor normal.

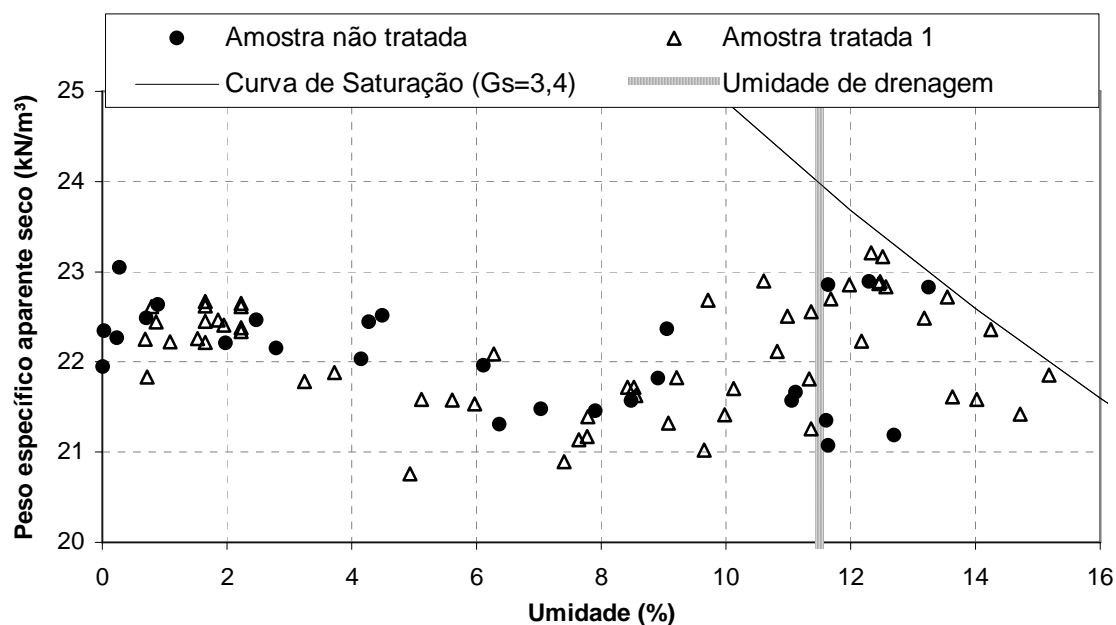


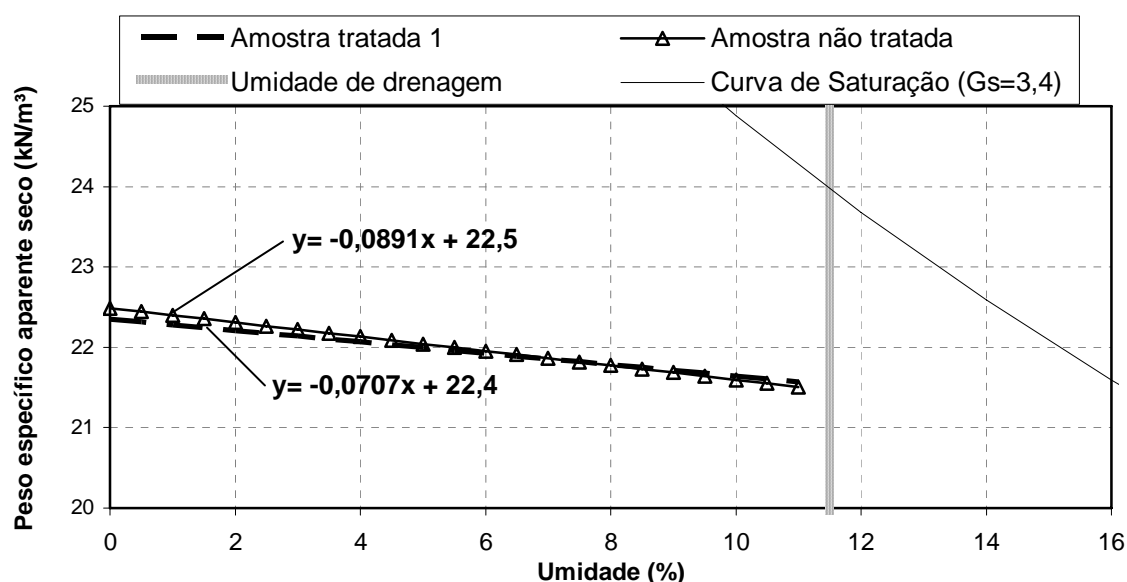
Figura 4.13 - Resultados dos ensaios de compactação para as amostras não tratada e tratada 1, procedimento sem reuso de material, energia do Proctor normal

Analisando a Figura 4.13, pode-se perceber que os resultados dos ensaios de compactação para as amostras tratada 1 e não tratada apresentaram valores semelhantes, não sendo possível verificar uma diferença visível entre o comportamento dos resultados das duas amostras. Nota-se também que as amostras tratada 1 e não tratada apresentaram uma mesma umidade de drenagem (11,5%), e apesar de possuírem valores de densidade relativa dos sólidos ( $G_s$ ) levemente diferentes, iguais a 3,40 e 3,41 respectivamente, essa pequena diferença teve um efeito praticamente desprezível no cálculo da saturação, fazendo com que as duas curvas de saturação fossem idênticas.

Para se verificar as diferenças estatísticas entre os resultados dos ensaios de compactação utilizando as amostras não tratada e tratada 1, foi feita uma análise de regressão com os resultados dos ensaios de compactação da Figura 4.13, pois, assim como na análise do efeito do procedimento de compactação, o uso de uma análise estatística utilizando teste de médias não é indicado (REGAZZI, 1999). A metodologia utilizada nesta análise estatística é descrita no item 3.7, que foi a mesma metodologia da análise do efeito do procedimento de

compactação (item 4.3.4) e a metodologia detalhada utilizada nesta análise de modelos de regressão linear simples pode ser encontrada em Montgomery e Peck (1992).

Logo, a partir dos resultados dos ensaios de compactação da Figura 4.13 utilizando os pontos que tiveram umidade inferior a 11%<sup>19</sup>, pôde-se fazer uma regressão linear simples se obtendo os dois modelos de regressão apresentados na Figura 4.14. Seguindo a metodologia utilizada, foi testada a hipótese de que os dois modelos de regressão têm os coeficientes angulares iguais, encontrando-se um p-valor do teste t igual a 0,539 (p-valor > 0,05), e, também, foi testada a hipótese de que os dois modelos de regressão têm os coeficientes lineares iguais, encontrando-se um p-valor do teste t igual a 0,204 (p-valor > 0,05). Portanto, nenhuma das duas hipóteses testadas foi rejeitada pelo teste t a um nível de significância de 5%, e isso quer dizer que não foram encontradas evidências estatísticas para afirmar que os resultados dos ensaios de compactação utilizando as duas amostras são diferentes.



**Figura 4.14 - Resultados da regressão linear simples a partir dos resultados dos ensaios de compactação para as amostras não tratada e tratada 1, procedimento sem reuso de material, energia do Proctor normal**

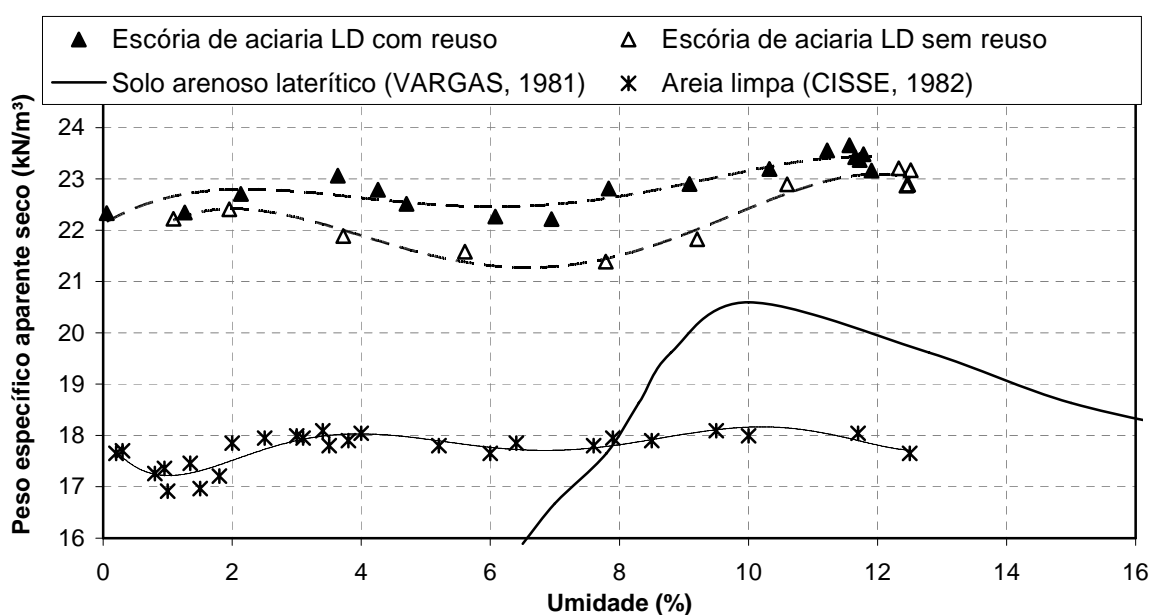
#### 4.3.6 Determinação da umidade ótima de compactação

Para melhor avaliar a existência ou não de umidade ótima na escória de aciaria em estudo, podem-se comparar os resultados de ensaios de compactação da escória de aciaria LD estudada com os resultados de ensaio de compactação de outros materiais. Na Figura 4.15, apresentam-se os resultados de compactação do ensaio 3 com reuso de material e do ensaio 7 sem reuso de material para a amostra tratada 1 compactada na energia do Proctor normal,

<sup>19</sup> Só foram utilizados os pontos com umidade abaixo de 11% devido a não definição da umidade representativa do corpo-de-prova próximo e acima da umidade de drenagem que foi de 11,5%.

comparados com a curva de compactação de um solo arenoso laterítico (VARGAS, 1981), também, compactado na energia do Proctor normal, e os resultados de ensaio de uma areia limpa (CISSE, 1982) compactada na energia do Proctor modificado.

Analisando a Figura 4.15, nota-se que o peso específico aparente seco do solo arenoso laterítico aumenta com o aumento da umidade até um valor máximo, cerca de  $20,5 \text{ kN/m}^3$ , a partir do qual começa a decrescer. A umidade que proporciona o peso específico máximo é a umidade ótima do solo arenoso laterítico, em torno de 10%. No caso da areia limpa, a curva de compactação não é bem definida. Em umidades baixas, a capilaridade, que geralmente não é alta, age de forma variável e o peso específico obtido não é constante para uma mesma umidade. E, em umidades mais altas, a areia tende para saturação, mas é tão permeável que o excesso de água drena rapidamente. Logo, a areia limpa não tem uma umidade ótima que leva ao máximo peso específico aparente seco. Comparando os resultados dos dois ensaios de compactação da escória de aciaria LD do estudo com a areia limpa e com o solo arenoso laterítico, observam-se as suas acentuadas semelhanças com a areia limpa, tendo uma influência da capilaridade e drenagem da água próximo à saturação.



**Figura 4.15 - Resultados do ensaio de compactação da escória de aciaria LD deste estudo, de uma areia limpa e a curva de compactação de um solo arenoso laterítico**

Portanto, com os resultados dos 16 ensaios de compactação realizados na escória de aciaria LD estudada e com as discussões apresentadas, conclui-se que as amostras da escória de aciaria LD estudadas não apresentam uma umidade ótima definida, tendo um comportamento característico de materiais granulares. Esses resultados estão de acordo com Rohde (2002) e Machado (2000) e, também, mostram incoerências das normas PTM-130/78, ASTM D

4792/00 e JIS A 5015/92, que estabelecem que os ensaios de expansão devam ser feitos em corpos-de-prova moldados na umidade ótima de compactação.

#### **4.4 Determinação da expansão**

As amostras estudadas foram submetidas a três métodos de ensaio de expansão que serão apresentados na seguinte ordem: PTM- 130/78, JIS A 5015/92 e ASTM D 4792/00.

##### **4.4.1 Expansão pelo método PTM-130/78**

Os resultados dos ensaios de expansão, realizados nas amostras não tratada, tratada 1 e tratada 2 usando o método PTM-130/78, serão apresentados de acordo com as amostras na ordem em que os ensaios foram realizados: amostra tratada 1, não tratada e tratada 2. Posteriormente, foram analisados: através da amostra tratada 1 *o efeito da temperatura nos resultados da expansão* obtida pelo método PTM-130/78; através da amostra não tratada *o efeito da energia de compactação nos resultados da expansão* obtida pelo método PTM-130/78; através das amostras não tratada e tratada 1 *a correlação da umidade de compactação com os resultados da expansão* obtida pelo método PTM-130/78; *o critério de aceitação das amostras estudadas* utilizando os resultados de expansão pelo método PTM-130/78, e; *a comparação dos resultados da expansão pelo método PTM-130/78 das três amostras utilizadas.*

##### **4.4.1.1 Expansão pelo método PTM-130/78 da amostra tratada 1**

Para se avaliar o efeito da umidade de compactação na expansão da amostra tratada 1, os corpos-de-prova que não apresentaram drenagem dos ensaios de compactação 1, 6, 7, 8 e 9 (Figura 4.6) foram utilizados para o ensaio de expansão pelo método PTM-130/78. Os corpos-de-prova dos ensaios de compactação 2 e 10 (Figura 4.6) foram utilizados somente no ensaio de compactação. Para se avaliar o efeito do aumento da temperatura na expansão da amostra tratada 1, foi realizado o ensaio de expansão com temperatura de 80°C, isso ocorreu nos 6 corpos-de-prova (CP) do ensaio 6, CP 4 ao CP 9, e em três corpos-de-prova do ensaio 7, CP 10, CP 11 e CP 12, como pode ser visto na Figura 4.16. As demais curvas de expansão acumulada dos corpos-de-prova ensaiados a temperatura de 71°C, que é a correta temperatura do ensaio, são apresentadas na Figura 4.17 à Figura 4.19.

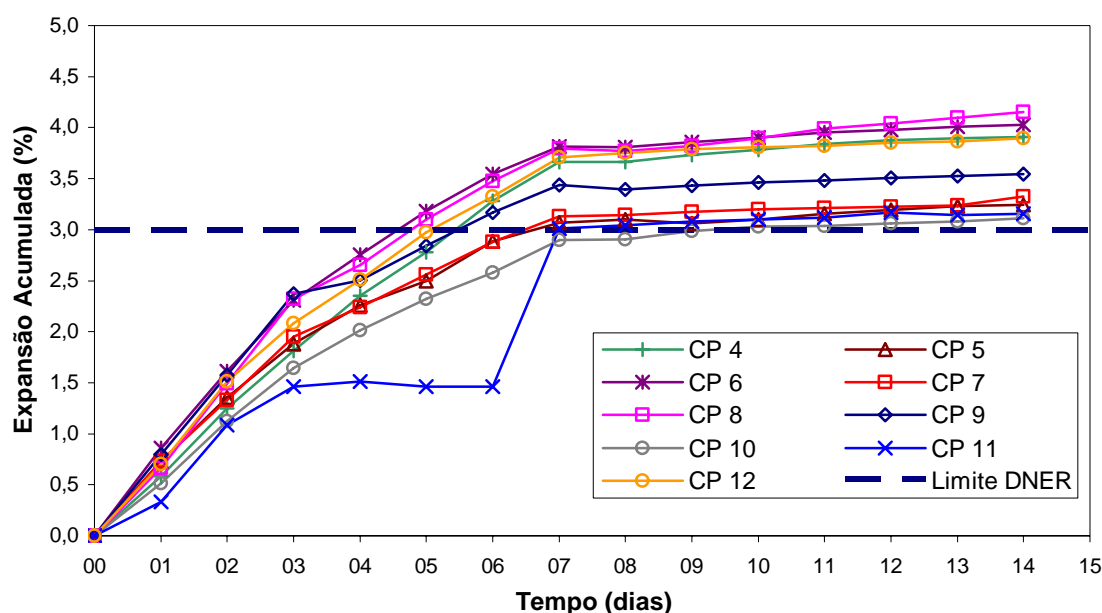


Figura 4.16 - Resultados da expansão acumulada dos corpos-de-prova do CP 4 ao CP 11 ensaiados com a temperatura de 80°C, amostra tratada 1, energia do Proctor normal, método PTM-130/78

Na Figura 4.16, a descontinuidade da curva de expansão acumulada do CP 11 nos dias 04 a 07, foi devida o extensômetro ficar travado durante os dias 04 a 06. Como isso foi detectado no momento da leitura do sétimo dia, a solução foi destravar e lubrificar o extensômetro. Por isso, o dia 07 teve uma expansão alta e a curva de expansão acumulada teve uma descontinuidade. Pode-se observar que após a correção do travamento do extensômetro, a curva de expansão acumulada do CP 11 teve um comportamento parecido com as demais curvas, não influenciando o resultado da expansão final para este corpo-de-prova.

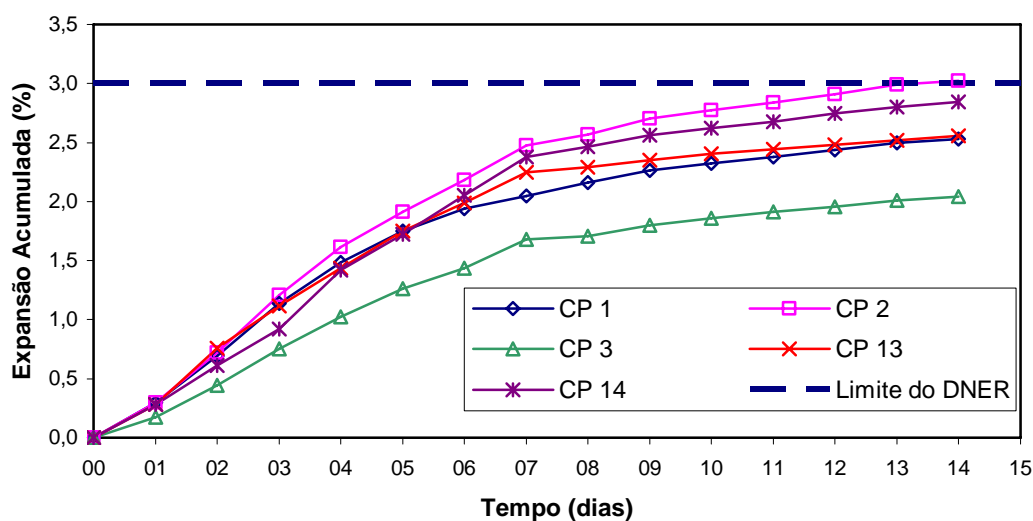


Figura 4.17 - Resultados da expansão acumulada do CP 1 ao CP 3 e dos CP 13 e CP 14, amostra tratada 1, energia do Proctor normal, método PTM-130/78



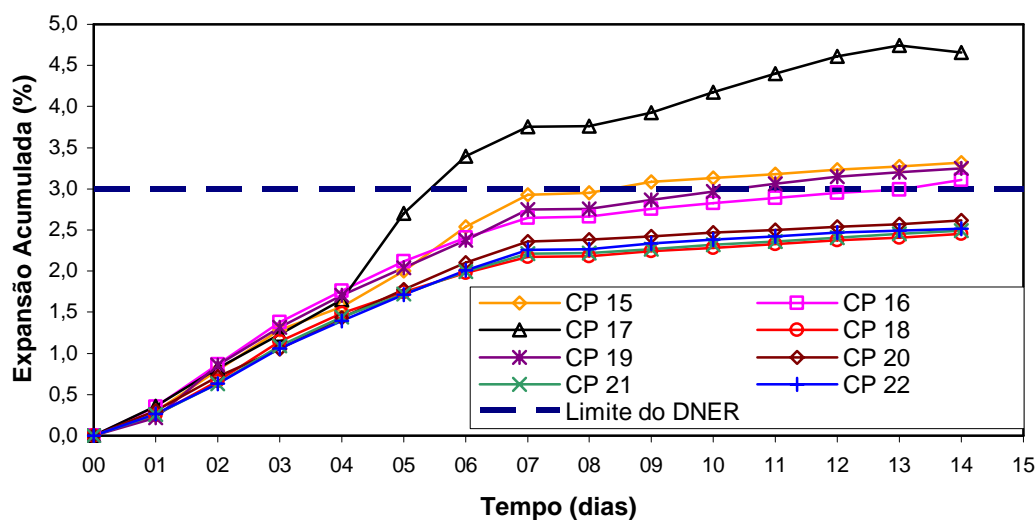


Figura 4.18 - Resultados da expansão acumulada do CP 15 ao CP 22, amostra tratada 1, energia do Proctor normal, método PTM-130/78

Na Figura 4.18, pode-se observar que o comportamento do CP 17 se destaca dos demais corpos-de-prova. Durante a realização do ensaio de expansão, percebeu-se que a haste perpendicular ao prato perfurado, que fica apoiado sobre o material, estava se inclinando e isso estava afetando a leitura do extensômetro, pois a expansão não estava sendo uniforme. Após o término do ensaio, foi feita uma inspeção nesse corpo-de-prova que comprovou a existência de uma expansão desuniforme, causando o desaparecimento da haste do prato perfurado (Figura 4.20). Após a retirada do prato perfurado, percebeu-se que no ponto mais elevado, existia uma trinca com um orifício (Figura 4.21). Esse ponto foi escavado e encontrou-se um material com coloração ferruginosa e que esfarelava ao ser tocado (Figura 4.22).

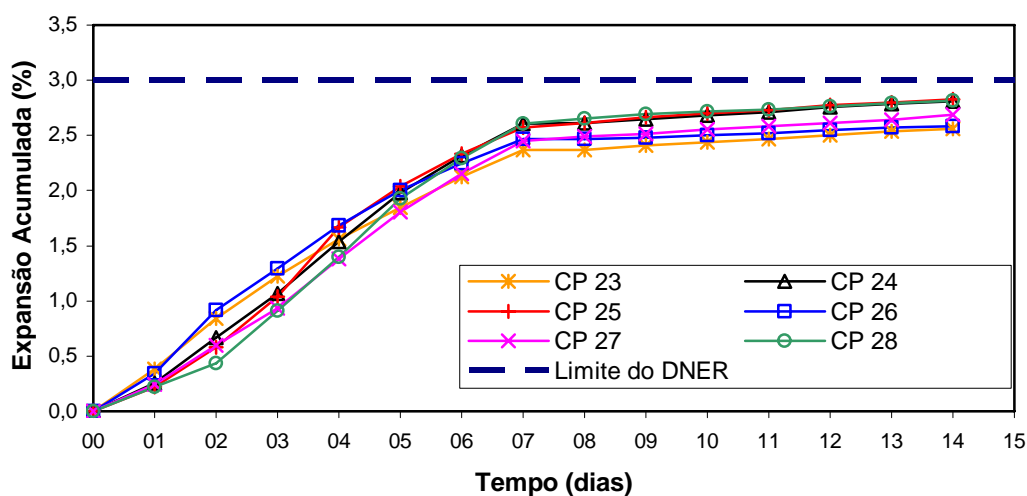
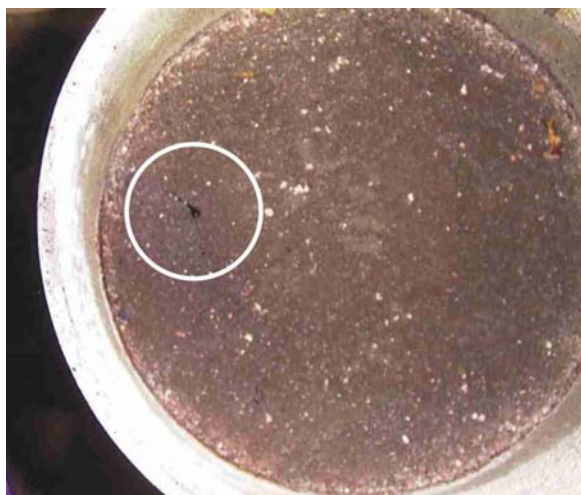


Figura 4.19 - Resultados da expansão acumulada do CP 23 ao CP 28, amostra tratada 1, energia do Proctor normal, método PTM-130/78



**Figura 4.20 - Inclinação da haste do prato perfurado no topo do corpo-de-prova 17 (CP 17) durante o ensaio de expansão da amostra tratada 1 pelo método PTM-130/78, energia do Proctor normal**



**Figura 4.21 - Ponto de ocorrência da expansão excessiva no topo do corpo-de-prova 17 (CP 17) durante o ensaio de expansão da amostra tratada 1 pelo método PTM-130/78, energia do Proctor normal**



**Figura 4.22 - Material que pode ter causado a expansão excessiva do corpo-de-prova 17 (CP 17) durante o ensaio de expansão da amostra tratada 1 pelo método PTM-130/78, energia do Proctor normal**

Analisando-se os resultados dos ensaios de expansão pelo método PTM-130 da escória de aciaria LD tratada 1 (Figura 4.16 a Figura 4.19), percebe-se que a taxa de expansão dos 7 primeiros dias (média de 0,35% ao dia), situação submersa, foi superior à taxa de expansão

dos 7 últimos dias (média de 0,05% ao dia), situação apenas saturada. Na situação submersa, a expansão acumulada geralmente decresce nos últimos dias, enquanto na situação apenas saturada, a taxa da expansão cai drasticamente, sendo no primeiro dia quase nula, permanecendo quase constante ao longo dos últimos 6 dias de ensaio.

No Quadro 4.15 apresenta-se um resumo da expansão acumulada ao final dos 14 dias do ensaio pelo método PTM-130/78 para a amostra tratada 1, assim como a umidade de compactação, o peso específico aparente seco dos corpos-de-prova, a temperatura da primeira parte do ensaio e o número do ensaio de compactação que originou os corpos-de-prova utilizados no ensaio de expansão da amostra tratada 1. Deve-se lembrar que a temperatura correta do ensaio de expansão pelo método PTM-130/78 é 71°C e os resultados com temperatura de 80°C foram apenas utilizados na investigação do efeito da temperatura na expansão desse método de ensaio.

| Ensaio de compactação | Corpo-de-prova (CP) | Temperatura (°C) | Umidade (%) | Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> ) | Expansão (%) |
|-----------------------|---------------------|------------------|-------------|--|--------------|
| 1                     | 1                   | 71               | 8,42        | 21,7   | 2,53         |
|                       | 2                   |                  | 11,37       | 21,2   | 3,03         |
|                       | 3                   |                  | 9,08        | 21,3   | 2,04         |
| 6                     | 4                   | 80*              | 14,02       | 21,3   | 3,91         |
|                       | 5                   |                  | 11,33       | 21,7   | 3,25         |
|                       | 6                   |                  | 9,98        | 21,3   | 4,02         |
|                       | 7                   |                  | 7,64        | 21,1   | 3,32         |
|                       | 8                   |                  | 5,12        | 21,6   | 4,16         |
|                       | 9                   |                  | 3,24        | 22,6   | 3,54         |
| 7                     | 10                  | 80*              | 1,09        | 22,4   | 3,11         |
|                       | 11                  |                  | 1,95        | 22,4   | 3,16         |
|                       | 12                  |                  | 5,61        | 21,4   | 3,89         |
|                       | 13                  |                  | 7,79        | 21,2   | 2,55         |
| 8                     | 14                  | 71               | 9,21        | 21,8   | 2,84         |
|                       | 15                  |                  | 2,22        | 22,2   | 3,32         |
|                       | 16                  |                  | 2,22        | 22,6   | 3,11         |
|                       | 17                  |                  | 2,22        | 22,6   | 4,65         |
|                       | 18                  |                  | 2,22        | 22,4   | 2,45         |
|                       | 19                  |                  | 1,65        | 22,7   | 3,25         |
|                       | 20                  |                  | 1,65        | 22,4   | 2,61         |
|                       | 21                  |                  | 1,65        | 22,1   | 2,49         |
|                       | 22                  |                  | 1,65        | 22,6   | 2,52         |
| 9                     | 23                  | 71               | 0,69        | 22,2   | 2,56         |
|                       | 24                  |                  | 0,71        | 21,8   | 2,81         |
|                       | 25                  |                  | 1,53        | 22,3   | 2,83         |
|                       | 26                  |                  | 1,85        | 22,5   | 2,59         |
|                       | 27                  |                  | 0,79        | 22,6   | 2,69         |
|                       | 28                  |                  | 0,86        | 22,4   | 2,81         |

\* a temperatura de 80°C não é a correta do método PTM-130/78 e foi utilizada para uma investigação adicional

**Quadro 4.15 - Resumo dos resultados de expansão pelo método PTM-130/78, amostra tratada 1, energia do Proctor normal**

#### 4.4.1.2 Expansão pelo método PTM-130/78 da amostra não tratada

Assim como nos resultados da expansão pelo método PTM-130/78 da amostra tratada 1, avaliou-se o efeito da umidade de compactação nos resultados da expansão pelo método PTM-130/78 da amostra não tratada utilizando-se os corpos-de-prova que não apresentaram drenagem nos ensaios de compactação. Ao todo, foram realizados seis ensaios de compactação com a amostra não tratada, sendo três destes com energia do Proctor normal, ensaios de compactação 11 a 13 (Figura 4.7), e três com energia do Proctor modificado, ensaios de compactação 14 a 16 (Figura 4.8).

Devido a um problema na estufa, que é utilizada nos últimos 7 dias de ensaio, somente os corpos-de-prova dos ensaios de compactação 11 e 12 (CP 29 ao CP 43), com energia do Proctor normal, puderam ser utilizados para o ensaio de expansão PTM-130. As curvas de expansão acumulada desses corpos-de-prova encontram-se na Figura 4.23 e na Figura 4.24. E, as curvas de expansão acumulada dos corpos-de-prova compactados com energia do Proctor modificado (ensaios de compactação 14 a 16), são apresentados na Figura 4.25 à Figura 4.27.

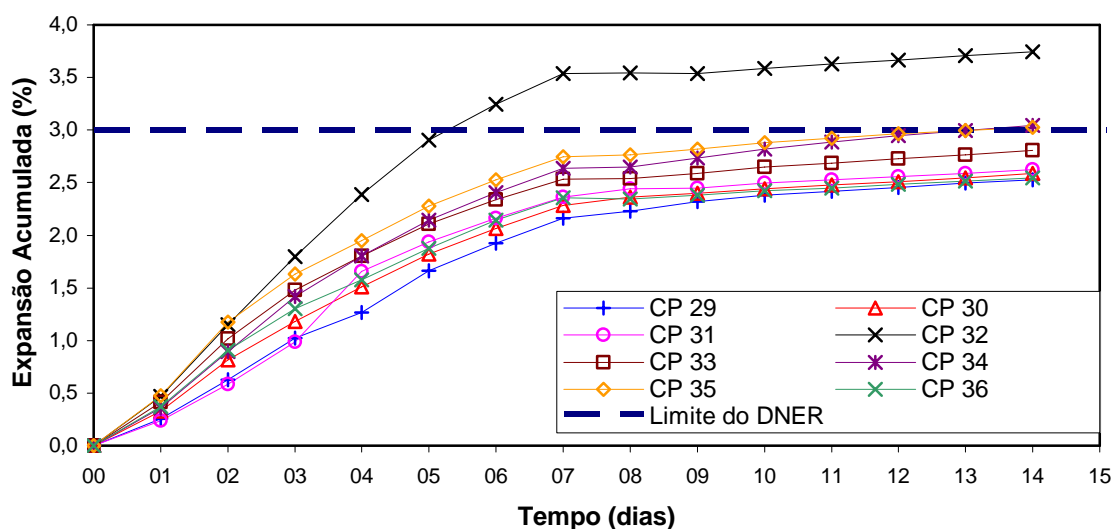
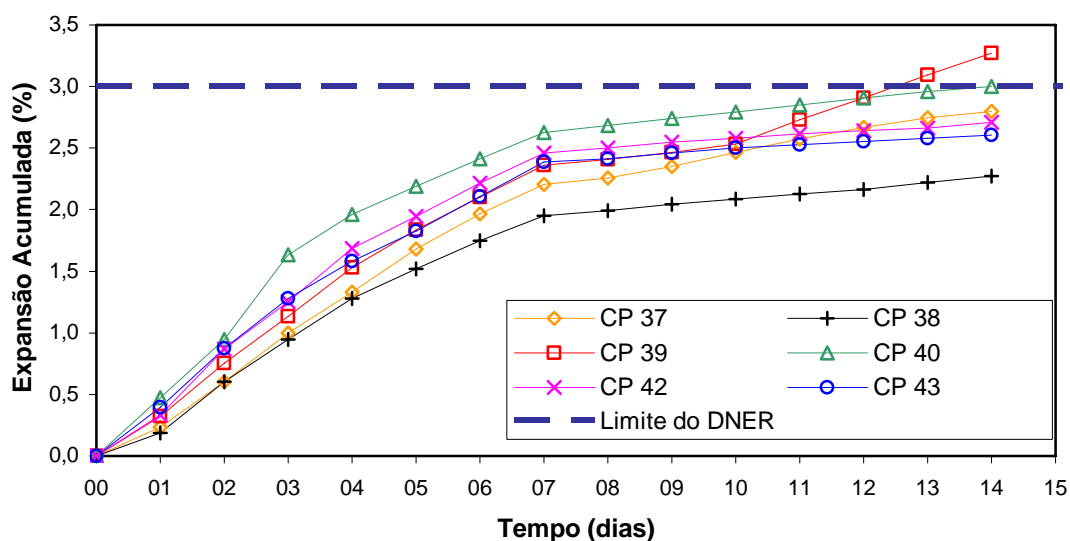
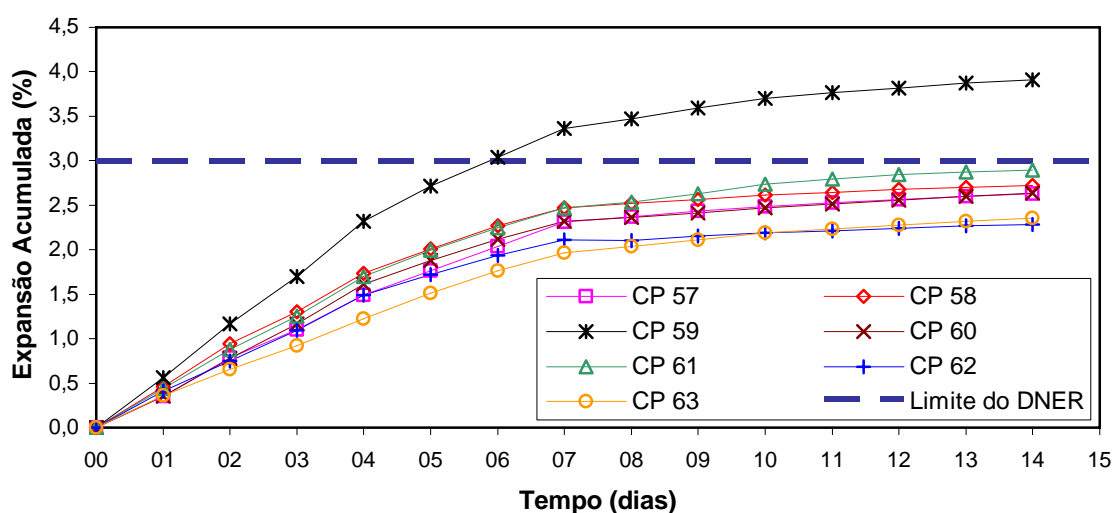


Figura 4.23 - Resultados da expansão acumulada do CP 29 ao CP 36 (ensaio de compactação 11), amostra não tratada, energia do Proctor normal, método PTM-130/78



**Figura 4.24 - Resultados da expansão acumulada do CP 37 ao CP 43 (ensaio de compactação 12), amostra não tratada, energia do Proctor normal, método PTM-130/78**

Analisando-se os resultados de expansão pelo método PTM-130/78 da amostra não tratada utilizando a energia do Proctor normal (Figura 4.23 e Figura 4.24), pode-se constatar que a taxa de expansão durante a fase em que os corpos-de-prova estiveram no banho térmico (média de 0,36% ao dia) foi superior à taxa de expansão durante a fase em que estiveram na estufa (média de 0,05% ao dia). Esse comportamento foi semelhante ao comportamento dos resultados de expansão da amostra tratada 1 pelo mesmo método PTM-130/78.



**Figura 4.25 - Resultados da expansão acumulada do CP 57 ao CP 62 (ensaio de compactação 14), amostra não tratada, energia do Proctor modificado, método PTM-130/78**

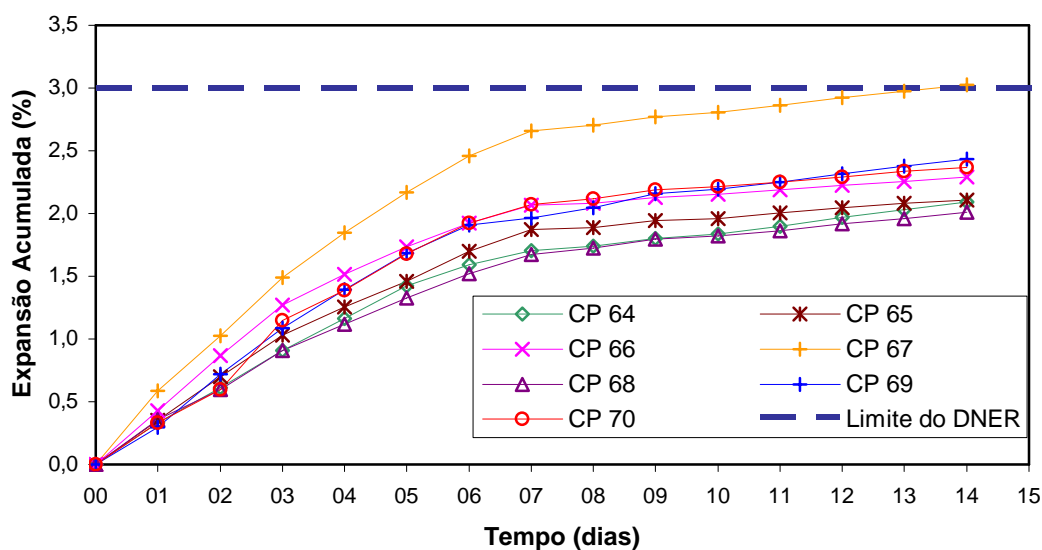


Figura 4.26 - Resultados da expansão acumulada do CP 64 ao CP 70 (ensaio de compactação 16), amostra não tratada, energia do Proctor modificado, método PTM-130/78

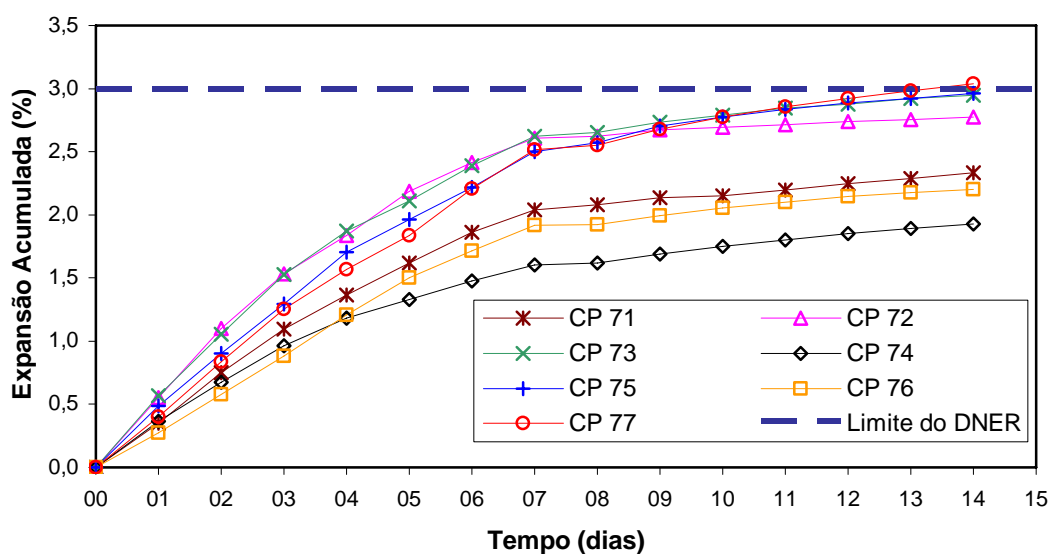


Figura 4.27 - Resultados da expansão acumulada do CP 71 ao CP 77 (ensaio de compactação 15), amostra não tratada, energia do Proctor modificado, método PTM-130/78

Analisando-se os resultados de expansão pelo método PTM-130/78 da amostra não tratada utilizando a energia do Proctor modificado (Figura 4.25 à Figura 4.27), pode-se observar, novamente, uma taxa de expansão superior nos 7 primeiros dias (média de 0,29% ao dia), fase de imersão, em relação aos últimos 7 dias (média de 0,07% ao dia), fase da estufa.

No Quadro 4.16, apresenta-se um resumo dos valores de expansão ao final dos 14 dias de ensaio pelo método PTM-130/78 para a amostra não tratada, assim como a energia de compactação utilizada, a umidade de compactação, o peso específico aparente seco do corpo-de-prova e o número do ensaio de compactação que originou os corpos-de-prova utilizados no

ensaio de expansão da amostra não tratada. Deve-se lembrar que a energia correta do ensaio de expansão pelo método PTM-130/78 é a energia do Proctor normal e os resultados com energia do Proctor modificado foram apenas utilizados na investigação do efeito da energia de compactação na expansão desse método de ensaio.

| Ensaio de compactação | Corpo-de-prova (CP) | Energia de compactação do Proctor | Umidade (%) | Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> ) | Expansão (%) |
|-----------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------|--|--------------|
| 11                    | 29                  | Proctor normal                    | 0,71        | 22,5   | 2,53         |
|                       | 30                  |                                   | 0,90        | 22,6   | 2,59         |
|                       | 31                  |                                   | 1,98        | 22,2   | 2,62         |
|                       | 32                  |                                   | 4,16        | 22,0   | 3,74         |
|                       | 33                  |                                   | 7,04        | 21,5   | 2,80         |
|                       | 34                  |                                   | 8,48        | 21,6   | 3,04         |
|                       | 35                  |                                   | 11,05       | 21,6   | 3,03         |
|                       | 36                  |                                   | 12,70       | 21,2   | 2,55         |
| 12                    | 37                  |                                   | 0,03        | 22,3   | 2,80         |
|                       | 38                  |                                   | 0,27        | 23,0   | 2,27         |
|                       | 39                  |                                   | 2,47        | 22,5   | 3,27         |
|                       | 40                  |                                   | 4,49        | 22,5   | 3,00         |
|                       | 41                  |                                   | 6,11        | 22,0   | 3,35         |
|                       | 42                  |                                   | 7,90        | 21,4   | 2,71         |
|                       | 43                  |                                   | 11,61       | 21,3   | 2,61         |
| 14                    | 57                  |                                   | 0,03        | 23,0   | 2,62         |
|                       | 58                  | 0,00                              | 23,0        | 2,72   |              |
|                       | 59                  | 2,33                              | 22,9        | 3,91   |              |
|                       | 60                  | 4,36                              | 23,3        | 2,63   |              |
|                       | 61                  | 6,01                              | 23,0        | 2,89   |              |
|                       | 62                  | 8,24                              | 23,5        | 2,28   |              |
|                       | 63                  | 9,23                              | 23,1        | 2,35   |              |
| 16                    | 64                  | 0,51                              | 23,2        | 2,09   |              |
|                       | 65                  | 0,56                              | 23,2        | 2,11   |              |
|                       | 66                  | 2,05                              | 23,6        | 2,29   |              |
|                       | 67                  | 3,61                              | 23,5        | 3,03   |              |
|                       | 68                  | 5,78                              | 23,8        | 2,01   |              |
|                       | 69                  | 7,41                              | 23,4        | 2,43   |              |
|                       | 70                  | 10,05                             | 23,5        | 2,37   |              |
| 15                    | 71                  | 0,02                              | 22,8        | 2,33   |              |
|                       | 72                  | 0,18                              | 22,8        | 2,77   |              |
|                       | 73                  | 2,09                              | 22,6        | 2,95   |              |
|                       | 74                  | 10,43                             | 22,8        | 1,93   |              |
|                       | 75                  | 4,44                              | 22,7        | 2,96   |              |
|                       | 76                  | 7,89                              | 23,5        | 2,20   |              |
|                       | 77                  | 6,09                              | 22,7        | 3,04   |              |

\* a energia modificada não é a correta do método PTM-130/78 e foi utilizada para uma investigação adicional

**Quadro 4.16 - Resumo dos resultados de expansão pelo método PTM-130/78, amostra não tratada, realizados à temperatura de 71°C**

#### 4.4.1.3 Expansão pelo método PTM-130/78 da amostra tratada 2

Na amostra tratada 2, não foi investigado o efeito da umidade de compactação na expansão, por isso os corpos-de-prova foram compactados com a amostra seca ao ar, sem se adicionar água durante a compactação, já que não foi encontrada uma umidade ótima. Ao todo foram

ensaiados 15 corpos-de-prova da amostra tratada 2, todos compactados com a energia do ensaio Proctor normal, que é a especificada no ensaio. Na Figura 4.28 e na Figura 4.29, são apresentadas as curvas de expansão acumulada referentes a esses corpos-de-prova.

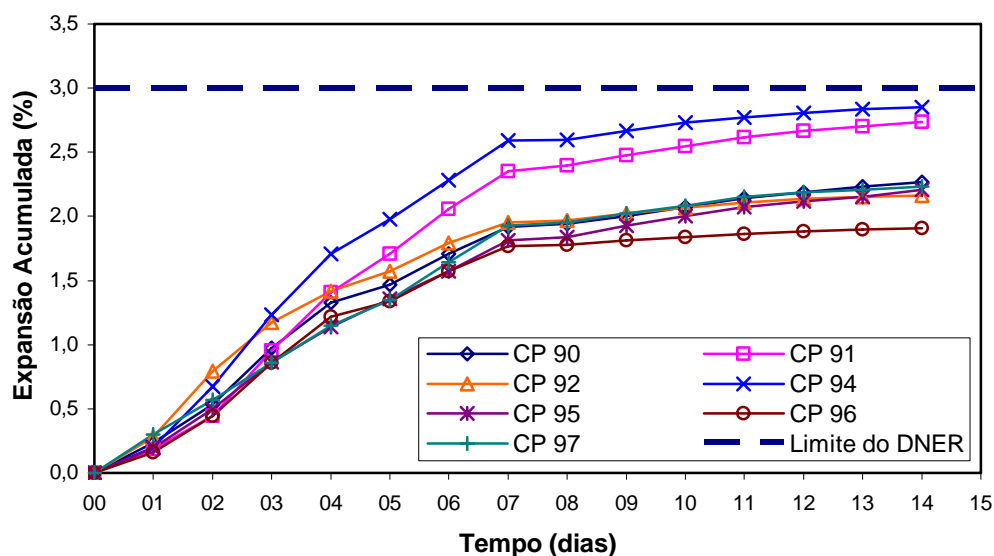


Figura 4.28 - Resultados da expansão acumulada do CP 90 ao CP 97, amostra tratada 2, energia do Proctor normal, método PTM-130/78

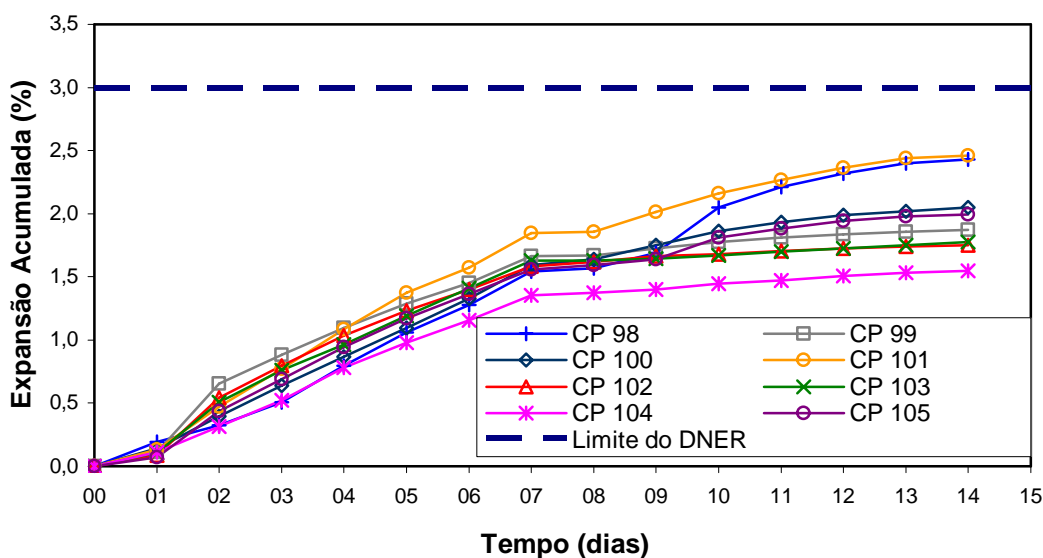


Figura 4.29 - Resultados da expansão acumulada do CP 98 ao CP 105, amostra tratada 2, energia do Proctor normal, método PTM-130/78

No Quadro 4.17, apresenta-se um resumo dos valores de expansão ao final dos 14 dias de ensaio pelo método PTM-130/78 para a amostra tratada 2, assim como a umidade de compactação e o peso específico aparente seco do corpo-de-prova. Nos ensaios de expansão pelo método PTM-130/78 da amostra tratada 2, somente foram utilizadas a temperatura (71°C) e a energia de compactação (Proctor normal) especificadas por esse método de ensaio,



não sendo realizada nenhuma investigação adicional, como foi realizado nas amostras tratada 1 e não tratada.

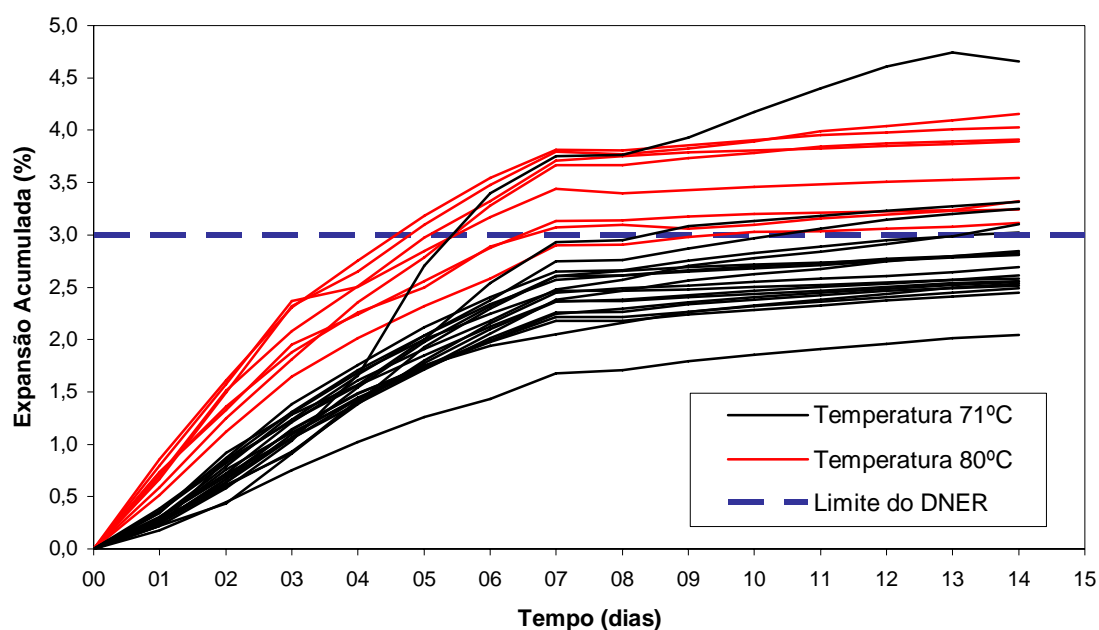
| Corpo-de-prova (CP) | Umidade (%) | Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> ) | Expansão (%) |
|---------------------|-------------|--|--------------|
| 90                  | 2,11        | 21,77  | 2,27         |
| 91                  | 2,18        | 22,07  | 2,74         |
| 92                  | 2,00        | 22,56  | 2,16         |
| 94                  | 2,23        | 22,07  | 2,85         |
| 95                  | 2,23        | 22,07  | 2,20         |
| 96                  | 2,03        | 22,26  | 1,91         |
| 97                  | 2,29        | 25,01  | 2,23         |
| 98                  | 2,03        | 21,87  | 2,43         |
| 99                  | 1,78        | 21,97  | 1,87         |
| 100                 | 1,98        | 21,77  | 2,05         |
| 101                 | 1,96        | 21,58  | 2,46         |
| 102                 | 2,13        | 21,38  | 1,75         |
| 103                 | 2,01        | 21,48  | 1,78         |
| 104                 | 1,79        | 21,58  | 1,55         |
| 105                 | 1,97        | 22,26  | 1,99         |

**Quadro 4.17 - Resumo dos resultados do ensaio de expansão pelo método PTM-130/78, amostra tratada 2, energia do Proctor normal e temperatura de 71°C**

#### 4.4.1.4 Efeito da temperatura na expansão obtida pelo método PTM-130/78

Analisando-se os resultados de expansão da amostra tratada 1 no Quadro 4.15, pode-se observar que em todos os 9 corpos-de-prova com temperatura de 80°C, na primeira fase do ensaio, a expansão ultrapassou o limite de 3% estabelecido pelas normas específicas de escória de aciaria DNIT-PRO 263/94 e DNIT-EM 262/94. Porém, dos corpos-de-prova que foram ensaiados à temperatura de 71°C, apenas 04 de um total de 19 corpos-de-prova tiveram expansão acumulada superior ao estabelecido pelas referidas normas.

Essa diferença nos resultados da expansão da amostra tratada 1 em relação à temperatura do ensaio pode ser melhor observada na Figura 4.30, onde são apresentadas as curvas de expansão acumulada dos 28 corpos-de-prova ensaiados pelo método PTM-130, às temperaturas de 71°C e 80°C. Deve-se lembrar que a temperatura correta do ensaio de expansão pelo método PTM-130/78 é 71°C e os resultados com temperatura de 80°C foram apenas utilizados nesta investigação do efeito da temperatura na expansão desse método de ensaio. Além dessa diferença observada na Figura 4.30, foi feita uma análise estatística dos resultados de expansão pelo método PTM-130/78 com os dados do Quadro 4.15, separando-se a análise em temperaturas de 71°C e 80°C para a amostra tratada 1.



**Figura 4.30 - Resultados da expansão acumulada pelo método PTM-130/78 utilizando as temperaturas de 71°C e 80°C para a amostra de escória de aciaria LD tratada 1**

Numa primeira análise foram calculadas as médias para as temperaturas de 71°C e 80°C para a variável expansão (%) a partir dos resultados dos ensaios realizados, como é apresentado na Tabela 4.2. Apresenta-se, também nessa tabela, o número de corpos-de-prova para cada temperatura e o mínimo, o máximo e o desvio padrão da variável expansão.

Analisando-se a estatística descritiva para os resultados de expansão da Tabela 4.2, pode-se verificar que a expansão mínima e média dos corpos-de-prova ensaiados à temperatura de 80°C foi superior ao limite de 3%. E que os corpos-de-prova ensaiados à temperatura de 71°C tiveram quatro corpos-de-prova acima do limite de 3% e uma expansão média de 2,83% se forem incluídos todos os corpos-de-prova.

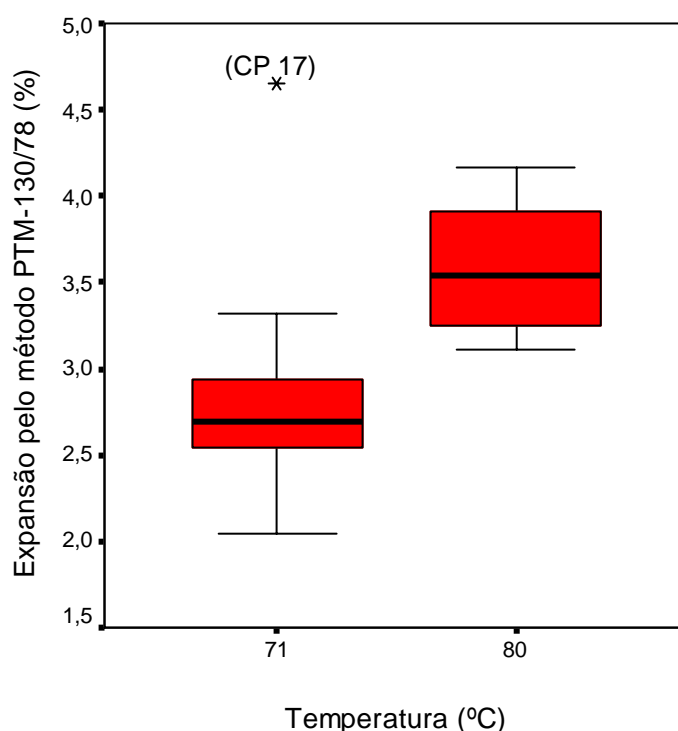
**Tabela 4.2 - Estatística descritiva da variável expansão por temperatura na amostra tratada 1, método PTM-130/78**

| Temperatura (°C) | Número de corpos-de-prova | Expansão (%) |        |       |               |
|------------------|---------------------------|--------------|--------|-------|---------------|
|                  |                           | Mínimo       | Máximo | Média | Desvio Padrão |
| 71               | 19                        | 2,04         | 4,65   | 2,83  | 0,54          |
| 80               | 9                         | 3,11         | 4,16   | 3,60  | 0,40          |

Posteriormente à estatística descritiva dos resultados de expansão, foi realizado o teste t de igualdade de médias, com objetivo de verificar se o fator temperatura interfere na expansão, encontrando-se uma diferença altamente significativa ( $p\text{-valor} < 0,01$ ) quando a expansão é analisada considerando a variação de temperatura. Com esse resultado, pode-se concluir que a

temperatura tem um papel muito importante na expansão e que deve ser um fator bastante controlado durante o ensaio, tanto através de equipamentos que mantenham a temperatura correta, quanto pelo controle da temperatura com termômetros ao longo de todo ensaio de expansão pelo método PTM-130/78.

Pode-se observar na análise da expansão do gráfico tipo Box Plot da Figura 4.31, que o máximo da expansão à temperatura de 71°C foi causado pelo corpo-de-prova 17 (CP 17) que teve o resultado da expansão afetado pela expansão diferencial dentro do mesmo corpo-de-prova (Figura 4.20 à Figura 4.22).

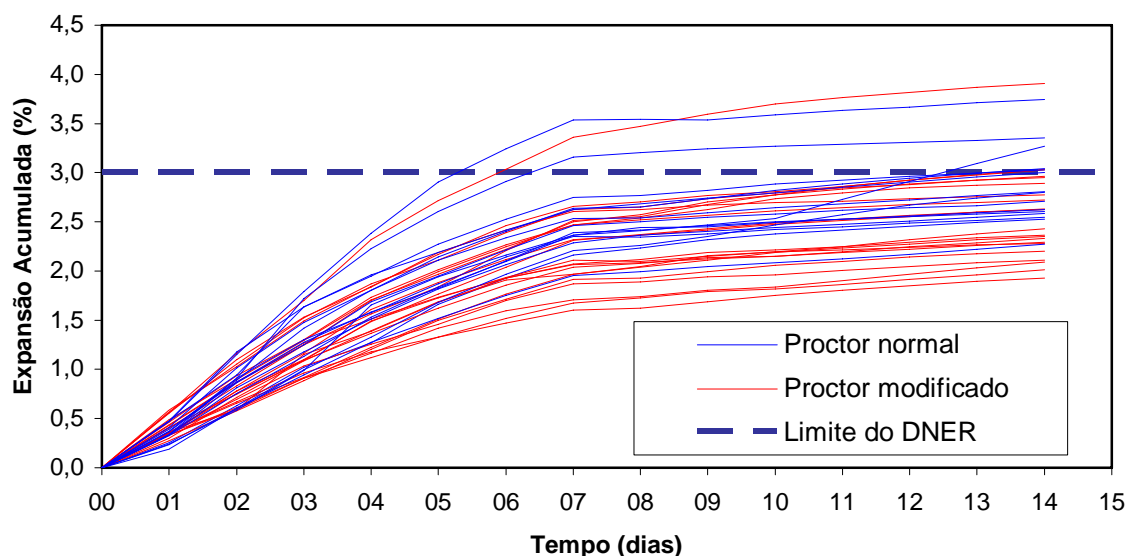


**Figura 4.31 - Gráfico de erros tipo Box Plot para expansão obtida pelo método PTM-130/78 utilizando as temperaturas de 71°C e 80°C para a amostra de escória de aciaria LD tratada 1**

#### **4.4.1.5 Efeito da energia de compactação na expansão pelo método PTM-130/78**

Para se verificar a influência da energia de compactação na expansão obtida pelo método PTM-130/78 da escória de aciaria LD estudada, os corpos-de-prova da amostra não tratada foram ensaiados com as energias de compactação do Proctor modificado e do Proctor normal. Para uma melhor análise desse possível efeito, apresentam-se na Figura 4.32 os resultados da expansão acumulada para os ensaios feitos com ambas as energias, onde se pode observar uma tendência de maiores valores de expansão para os corpos-de-prova compactados com energia do Proctor normal. Além dessa verificação, foi feita uma análise estatística dos

resultados de expansão com os dados do Quadro 4.16, separando-se a análise em energia do Proctor normal e do Proctor modificado.



**Figura 4.32 - Resultados da expansão acumulada pelo método PTM-130/78 utilizando as energias do Proctor normal e do Proctor modificado para a amostra de escória de aciaria LD não tratada**

Numa primeira análise, foram calculadas as médias da expansão para as energias do Proctor normal e modificado, a partir dos resultados dos ensaios de expansão pelo método PTM-130/78 (Quadro 4.16), como está apresentado na Tabela 4.3. Juntamente com as médias, apresenta-se o número de corpos-de-prova para cada temperatura e o mínimo, o máximo e o desvio padrão da variável expansão. Na análise da expansão da Tabela 4.3 pode-se observar que a média da expansão com a energia do Proctor normal foi superior à energia do Proctor modificado.

**Tabela 4.3 - Estatística descritiva da variável expansão por energia de compactação na amostra não tratada, método PTM-130/78**

| Energia de compactação | Número de corpos-de-prova | Expansão (%) |        |       |               |
|------------------------|---------------------------|--------------|--------|-------|---------------|
|                        |                           | Mínimo       | Máximo | Média | Desvio Padrão |
| P. normal              | 15                        | 2,27         | 3,74   | 2,86  | 0,38          |
| P. modificado          | 21                        | 1,93         | 3,91   | 2,57  | 0,47          |

Posteriormente à estatística descritiva dos resultados de expansão, foi realizado o teste t de igualdade de médias, com objetivo de verificar se a energia de compactação interfere na expansão obtida pelo método PTM-130/78.

Verificou-se que o p-valor do teste t foi igual a 0,048 ( $p\text{-valor} < 0,05$ ), então rejeita-se a hipótese que a média dos dois grupos são iguais a um nível de significância de 5%, em outras

palavras, a expansão dos corpos-de-prova analisados se comporta de maneira diferente em relação a energia de compactação. Sendo que a energia do Proctor modificado provoca menores valores de expansão em relação à energia do Proctor normal, o que contraria a experiência de expansão de solos argilosos e, portanto é uma conclusão que demanda um estudo mais aprofundado. Apesar do efeito da energia de compactação na expansão, a média da expansão da amostra estudada na energia modificada não sofreu uma grande redução, sendo, apenas, 0,34% inferior à energia normal.

#### 4.4.1.6 Correlação da umidade de compactação com a expansão obtida pelo método PTM-130/78

Para se avaliar a correlação da umidade de compactação com a expansão obtida pelo método PTM-130/78 das amostras tratada 1 e não tratada, foi realizado um estudo do coeficiente de correlação de Pearson separado por amostra. Para isso, foram analisados os dados do Quadro 4.15 e do Quadro 4.16 utilizando-se somente os corpos-de-prova compactados com energia do Proctor normal e à temperatura de 71°C, que são as especificações do método PTM-130/78.

Os resultados dos coeficientes de correlação de Pearson são apresentados na Tabela 4.4, juntamente com o p-valor do teste t e o número de corpos-de-prova (n) para as amostras não tratada e tratada 1.

**Tabela 4.4 - Correlação de Pearson da umidade de compactação com a expansão pelo método PTM-130/78 para as amostras de escória de aciaria não tratada e tratada 1**

| Amostra     | Coeficiente de correlação umidade x expansão | n  | p-valor |
|-------------|--|----|---------|
| Não Tratada | 0,09   | 15 | 0,749   |
| Tratada 1   | -0,17  | 19 | 0,487   |

Verificou-se que o p-valor do teste t sobre a correlação de Pearson foi igual a 0,749 (p-valor > 0,05) para a amostra não tratada e 0,487 (p-valor > 0,05) para a amostra tratada 1, então, não se rejeita a hipótese que a correlação entre a umidade e a expansão é significativa, considerando um nível de significância de 5%. Em outras palavras, não se pode afirmar que existe correlação entre a umidade de compactação e a expansão do método PTM-130/78 para as amostras estudadas.

Apesar de ter sido constatado que o resultado da expansão, provavelmente, não tem correlação com a umidade de compactação, decidiu-se estabelecer uma mesma condição de umidade para os corpos-de-prova ensaiados pelo método PTM-130/78. E, de acordo com os resultados dos ensaios de compactação e expansão realizados na escória de aciaria estudada, estabeleceu-se que os ensaios de expansão podem ser realizados em corpos-de-prova

compactados com a escória de aciaria LD seca ao ar. Essa umidade relativamente baixa, em torno de 2%, pode ser justificada pela não existência da umidade ótima e pela umidade da escória seca ao ar não ter a influência negativa da capilaridade e nem problemas de drenagem de água pela base durante a compactação.

#### **4.4.1.7 Critério de aceitação das amostras estudadas segundo os resultados de expansão pelo método PTM-130/78**

De modo a favorecer uma possível ampliação do mercado de escórias de aciaria utilizadas em bases e sub-bases de pavimentos e contribuir para uma redução da discriminação e da desconfiança da sociedade quanto à utilização das escórias de aciaria, devem-se estabelecer critérios técnicos para detectar sua estabilização segundo a expansão.

Como as normas rodoviárias específicas de escória de aciaria DNIT-PRO 263/94 e DNIT-EM 262/94 não estabelecem um critério claro de aceitação ou rejeição da escória de aciaria para a variável expansão obtida pelo método PTM-130/78, propõe-se um critério específico para essa aceitação ou rejeição do lote de escória de aciaria LD a partir dos resultados de ensaios de expansão obtidos por esse método. Esse critério foi proposto considerando:

- uma amostragem criteriosa do lote de escória de aciaria avaliado, considerando as normas da ABNT de amostragem de resíduos (NBR 10007/2004) e de amostragem de agregados (NBR NM 26/2001), assim como os procedimentos de amostragem utilizados neste estudo;
- o máximo de 3% de expansão determinada pelo método PTM-130/78, adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DNIT-EM 262/94; DNIT-PRO 263/94);
- que deve haver um rigoroso controle do lote de escória de aciaria avaliado, quando da sua aceitação, relativamente à expansão (DNIT-PRO 263/94); e
- uma metodologia estatisticamente significativa para o cálculo do número de corpos-de-prova a serem ensaiados pelo método de ensaio de expansão PTM-130/78, devido à heterogeneidade das escórias de aciaria em geral.

Logo, considerando-se uma amostragem criteriosa e fixando-se o limite de 3% de expansão, propõe-se que o controle mais rigoroso da expansão seja através da aceitação do lote de escória de aciaria somente quando a expansão de todos os corpos-de-prova, ensaiados para cada amostra, for inferior ao limite de 3% pelo método PTM-130/78. Pois, se for utilizada a média dos resultados de expansão, isso pode significar que a expansão de algum corpo-de-

prova ultrapassou o limite de 3% de expansão, podendo acarretar danos aos pavimentos construídos com tal escória de aciaria.

A metodologia proposta para se calcular o número de corpos-de-prova, necessários para o critério de aceitação proposto, é análoga à metodologia utilizada para o cálculo do número de corpos-de-prova do método PTM-130/78 usando a equação (3.1) da página 84 deste estudo. Porém, o número de corpos-de-prova para a realização do ensaio de expansão deverá ser estudado para cada caso, pois depende da variabilidade das características expansivas da escória de aciaria LD analisada em cada caso. Propõe-se que, através de um ensaio de expansão preliminar utilizando o método PTM-130/78 e um número mínimo de 10 corpos-de-prova, seja determinado o desvio padrão (s) da expansão para a escória de aciaria LD analisada. Para, então, de posse desse desvio padrão (s) determinar-se o número mínimo de corpos-de-prova (n) para o ensaio de expansão através da equação (3.1), com precisão (d) de 0,2% e um nível de confiança de 95% ( $z = 1,96$ ) (COCHRAN, 1977). De acordo com essa equação, se o desvio padrão (s) da expansão da escória de aciaria analisada for 0,3%, o número de corpos-de-prova necessário será  $n = [(1,96 \times 0,3\%) \div 0,2\%]^2 = 8,64 \cong 9$ .

Analisando-se os resultados do ensaio de expansão obtidos pelo método PTM-130/78 das três amostras analisadas neste estudo (Quadro 4.15 ao Quadro 4.17) a partir do critério de aceitação proposto anteriormente, considerando apenas os corpos-de-prova ensaiados com a energia do Proctor normal e à temperatura de 71°C, verificou-se que as amostras tratada 1 e não tratada não atenderam o limite de 3% de expansão estabelecido pelas normas específicas de escória de aciaria DNIT-PRO 263/94 e DNIT-EM 262/94, pois existem, respectivamente, quatro e cinco corpos-de-prova que ultrapassaram esse limite. E, a partir do critério de aceitação proposto neste estudo, apenas a amostra tratada 2 atendeu ao limite de 3% de expansão estabelecido pelas referidas normas.

Na Tabela 4.5, são apresentados o número utilizado de corpos-de-prova ensaiados pelo método PTM-130 das três amostras estudadas e o número recalculado de corpos-de-prova, calculado a partir dos desvios da expansão encontrados para cada amostra e utilizando a equação (3.1) da página 84. Pode-se perceber na Tabela 4.5 que o número utilizado de corpos-de-prova para a amostra não tratada (15 CP's) e para a amostra tratada 2 (15 CP's) foi superior ao recalculado para as mesmas amostras (14 e 12 CP's), pois tiveram desvios da expansão inferiores ao adotado inicialmente (0,4%), sendo que esse número de corpos-de-prova utilizado foi suficiente. Para a amostra tratada 1 o número utilizado de corpos-de-prova foi inferior ao recalculado, pois teve um desvio padrão da expansão (0,54%) superior ao

adotado inicialmente (0,4%), devido, principalmente, ao elevado valor da expansão do corpo-de-prova 17 (CP 17). Apesar disso, pode-se fixar o número de corpos-de-prova (n) em 19 e o desvio padrão (s) em 0,54% para se calcular, utilizando a mesma equação (3.1), a precisão (d) utilizada para a amostra tratada 1, que foi de 0,24%, não tão superior à precisão utilizada para as outras duas amostras (0,2%).

A justificativa para o número utilizado de 19 corpos-de-prova para a amostra tratada 1, no ensaio de expansão pelo método PTM-130/78, é que não houve quantidade suficiente de material para se executarem mais corpos-de-prova dessa amostra, não sendo possível, também, avaliar a permeabilidade, o CBR e a expansão pelos métodos JIS A 5015/92 e ASTM D 4792/00 da mesma amostra tratada 1.

**Tabela 4.5 - Número utilizado e recalculado de corpos-de-prova para o ensaio de expansão pelo método PTM-130/78**

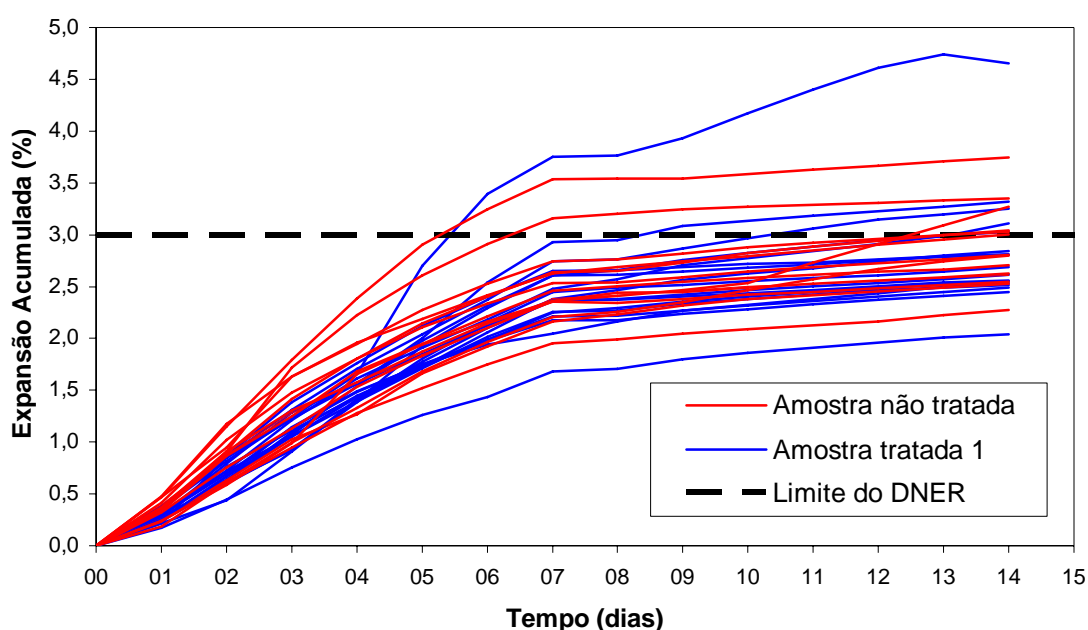
| Amostra     | Número utilizado de corpos-de-prova | Desvio Padrão da expansão (%) | Número recalculado de corpos-de-prova |
|-------------|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| Não Tratada | 15                                  | 0,38                          | 14                                    |
| Tratada 1   | 19                                  | 0,54                          | 28                                    |
| Tratada 2   | 15                                  | 0,36                          | 12                                    |

#### **4.4.1.8 Comparação entre os resultados de expansão das amostras estudadas pelo método PTM-130/78**

Para a comparação dos resultados de expansão pelo método PTM-130/78 das amostras de escória de aciaria LD do estudo, inicialmente, foram comparadas as amostras não tratada e tratada 1, para depois se comparar as amostras não tratada e tratada 2. Após essas análises, foi realizada uma comparação entre os resultados de expansão das três amostras estudadas utilizando um teste estatístico.

A Figura 4.33 mostra o comportamento da expansão de acordo com as amostras tratada 1 e não tratada utilizando o método PTM-130/78, onde se observa que não houve uma diferença visível entre as curvas de expansão das duas amostras estudadas. Após essa verificação, foi feita uma análise estatística dos resultados de expansão com os dados do Quadro 4.15 e do Quadro 4.16 para a energia do Proctor normal e temperatura de 71°C, separando-se a análise em amostra tratada 1 e não tratada.





**Figura 4.33 - Resultados da expansão acumulada para as amostras tratada 1 e não tratada compactadas com energia do Proctor normal, método PTM-130/78**

A partir dos resultados dos ensaios de expansão realizados foram calculadas as médias da variável expansão (%) para as amostras não tratada e tratada 1, como está apresentado na Tabela 4.6. Apresenta-se, também, nessa tabela o número de corpos-de-prova ensaiados para cada amostra e o mínimo, o máximo e o desvio padrão da variável expansão.

**Tabela 4.6 - Estatística descritiva da expansão pelo método PTM-130/78 das amostras não tratada e tratada 2**

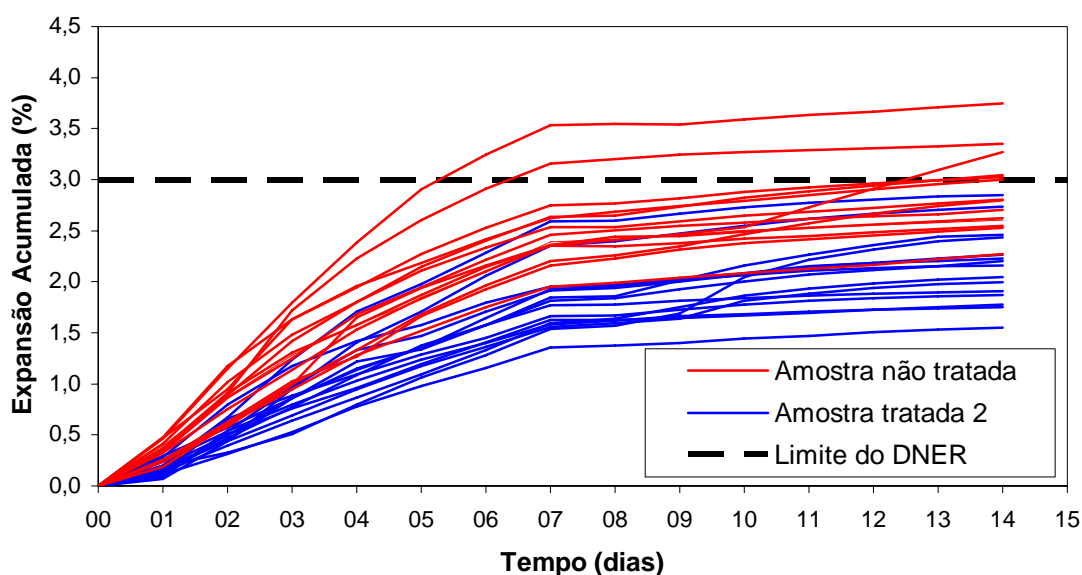
| Amostra     | Número de corpos-de-prova | Expansão (%) |        |       |               |
|-------------|---------------------------|--------------|--------|-------|---------------|
|             |                           | Mínimo       | Máximo | Média | Desvio Padrão |
| Não Tratada | 15                        | 2,27         | 3,74   | 2,86  | 0,38          |
| Tratada 1   | 19                        | 2,04         | 4,65   | 2,83  | 0,54          |

Após observar, na Tabela 4.6, que os corpos-de-prova das amostras não tratada e tratada 1 apresentaram as médias da expansão próximas, 2,86% e 2,83% respectivamente, foi realizado o teste t de igualdade de médias aos 14 dias, com objetivo de verificar as diferenças estatisticamente significantes entre as amostras tratada 1 e não tratada em relação a variável expansão.

Verificou-se que o p-valor do teste t foi de 0,83 ( $p\text{-valor} > 0,05$ ), então não se rejeita a hipótese que a média das duas amostras são iguais a um nível de 5% de significância, em outras palavras, não se pode encontrar uma diferença estatisticamente significativa entre as médias de expansão das amostras tratada 1 e não tratada utilizando o método PTM-130/78.

Pode-se tentar explicar esses resultados pelo tempo entre a amostragem e o início do ensaio de expansão no laboratório<sup>20</sup>, já que a amostra tratada 1 foi ensaiada dois meses após a amostragem e a amostra não tratada foi ensaiada seis meses após a amostragem, porém não se tem dados de uma mesma amostra para se analisar esse efeito. Já na amostra tratada 2, o tempo entre o ensaio de expansão pelo método PTM-130/78 e a amostragem na siderúrgica foi de um mês.

Na Figura 4.34, é apresentada a comparação dos resultados de expansão acumulada pelo método PTM-130/78 das amostras tratada 2 e não tratada, ambas ensaiadas com a energia do Proctor normal e temperatura de 71°C, onde se observa que a maioria das curvas de expansão acumulada da amostra tratada 2 ficou abaixo das curvas da amostra não tratada.



**Figura 4.34 - Resultados da expansão acumulada para as amostras tratada 2 e não tratada compactadas com energia do Proctor normal, método PTM-130/78**

Com objetivo de comparar estatisticamente os resultados de expansão das amostras tratada 2 e não tratada foi realizada uma análise estatística utilizando o teste t de igualdade de médias. O resultado desse teste t indicou um p-valor de 0,001 ( $p\text{-valor} < 0,05$ ), portanto se rejeita a hipótese que as médias de expansão das duas amostras são iguais a um nível de significância de 5%. Em outras palavras, verificou-se que as médias dos resultados de expansão obtidos pelo método PTM-130/78 das amostras não tratada (2,86%) e tratada 2 (2,15%) são diferentes, sendo que a amostra tratada 2 apresentou uma média de expansão inferior à média da amostra não tratada.

<sup>20</sup> Durante esse tempo de estocagem as amostras ficaram protegidas do tempo.

Para se testar a homogeneidade entre os resultados de expansão das três amostras estudadas, foram realizados os testes estatísticos de Duncan e de Tukey para verificar a formação de subgrupos nos resultados de expansão. O resultado para os dois testes mostrou a formação de dois subgrupos estatisticamente diferentes ( $p$ -valor  $< 0,05$ ), sendo que a amostra tratada 2 ficou num subgrupo e as amostras não tratada e tratada 1 ficaram em outro subgrupo. Para uma melhor observação desses subgrupos, pode-se observar na Tabela 4.7 a estatística descritiva das amostras analisadas para a variável expansão (%).

**Tabela 4.7 - Estatística descritiva da expansão pelo método PTM-130/78 para as amostras de escória de aciaria LD analisadas neste estudo**

| Amostra     | Número de corpos-de-prova | Expansão (%) |        |       |               |
|-------------|---------------------------|--------------|--------|-------|---------------|
|             |                           | Mínimo       | Máximo | Média | Desvio Padrão |
| Não Tratada | 15                        | 2,27         | 3,74   | 2,86  | 0,38          |
| Tratada 1   | 19                        | 2,04         | 4,65   | 2,83  | 0,54          |
| Tratada 2   | 15                        | 1,55         | 2,85   | 2,15  | 0,36          |

#### 4.4.2 Expansão pelo método JIS A 5015/92

Apenas as amostras não tratada e tratada 2 foram submetidas ao ensaio de expansão utilizando o método JIS A 5015/92, e os resultados desses ensaios são apresentados a seguir, separados por amostra.

##### 4.4.2.1 Expansão pelo método JIS A 5015/92 da amostra não tratada

Os resultados de expansão acumulada obtida pelo método JIS A 5015/92 para a amostra não tratada são apresentados na Figura 4.35, assim como o limite máximo de 2% estabelecido pela referida norma. Analisando-se esses resultados da Figura 4.35, percebe-se que a taxa da expansão dos 4 primeiros dias (média de 0,48%), foi superior a taxa de expansão dos últimos 6 dias (média de 0,22%). Após os 4 primeiros dias de ensaio, a taxa de expansão teve uma redução, permanecendo quase constante. Quanto ao limite de expansão estabelecido pela norma JIS A 5015/92, os resultados de expansão dos cinco corpos-de-prova ficaram acima desse limite de 2% de expansão, com uma média de 3,24%.

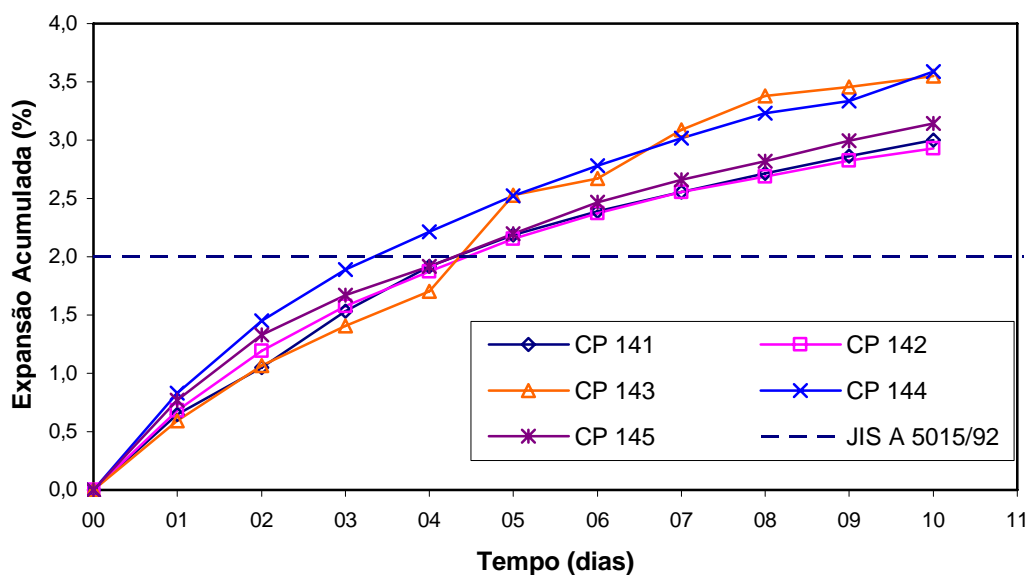


Figura 4.35 - Resultados da expansão acumulada do CP 141 ao CP 145, amostra não tratada, método JIS A 5015/92

#### 4.4.2.2 Expansão pelo método JIS A 5015/92 da amostra tratada 2

Os resultados de expansão acumulada para o método JIS A 5015/92 da amostra tratada 2 são apresentados na Figura 4.36, assim como o limite máximo de 2% da mesma norma.

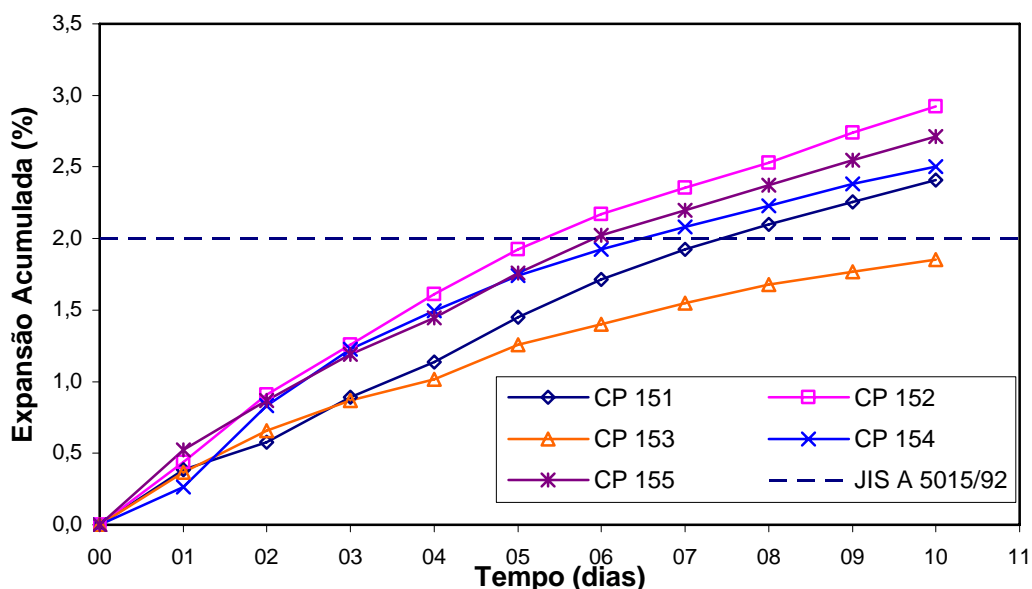


Figura 4.36 - Resultados da expansão acumulada do CP 151 ao CP 155, amostra tratada 2, método JIS A 5015/92

Analisando-se esses resultados da Figura 4.36, percebe-se, assim como os resultados da amostra não tratada, que a taxa da expansão dos 4 primeiros dias (média de 0,34%), foi superior a taxa de expansão dos últimos 6 dias (média de 0,19%). Após os 4 primeiros dias de ensaio, a taxa de expansão teve uma redução, porém essas observações são menos evidentes

que as observações feitas nos resultados da amostra não tratada (Figura 4.35), devido aos menores valores de expansão obtidos para a amostra tratada 2 (Figura 4.36). Dos resultados de expansão dos cinco corpos-de-prova avaliados pelo método JIS A 5015/92, o valor da expansão acumulada de apenas um corpo-de-prova da amostra tratada 2 (CP 153) ficou abaixo do limite de 2% de expansão estabelecido por essa norma, com o valor de 1,85%.

No Quadro 4.18, apresenta-se um resumo dos valores de expansão ao final dos 10 dias do ensaio JIS A 5015/92 para as amostras não tratada e tratada 2, assim como a umidade de compactação e o peso específico aparente seco de cada corpo-de-prova ensaiado por esse método.

| Amostra     | Corpo-de-prova (CP) | Umidade (%) | Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> ) | Expansão (%) |
|-------------|---------------------|-------------|--|--------------|
| Não Tratada | 141                 | 1,87        | 22,0   | 3,00         |
|             | 142                 | 2,00        | 22,6   | 2,93         |
|             | 143                 | 1,96        | 22,7   | 3,55         |
|             | 144                 | 1,73        | 22,7   | 3,59         |
|             | 145                 | 1,75        | 22,8   | 3,14         |
| Tratada 2   | 151                 | 1,73        | 22,8   | 2,41         |
|             | 152                 | 1,89        | 22,6   | 2,92         |
|             | 153                 | 1,80        | 22,9   | 1,85         |
|             | 154                 | 1,77        | 22,7   | 2,50         |
|             | 155                 | 1,67        | 22,7   | 2,71         |

**Quadro 4.18 - Resumo dos resultados do ensaio de expansão pelo método JIS A 5015/92, amostras não tratada e tratada 2**

Com o resumo dos resultados do método JIS A 5015/92 (Quadro 4.18), foram calculadas as médias da expansão para os resultados das amostras não tratada e tratada 2, como pode ser observado na Tabela 4.8. Apresenta-se também nessa tabela o número de corpos-de-prova para cada amostra e o mínimo, o máximo e o desvio padrão da variável expansão. Pode-se observar na Tabela 4.8, que, analogamente aos resultados obtidos pelo método PTM-130/78, a média da expansão da amostra não tratada (3,24%) foi superior à média da amostra tratada 2 (2,48%), sendo que esses valores estão acima do limite máximo de 2% de expansão especificado pela norma JIS A 5015/92. Devido ao reduzido número de corpos-de-prova (5) o teste estatístico realizado para verificar a diferença entre as médias dos resultados de expansão das duas amostras ensaiadas pelo método JIS A 5015/92 foi o teste não-paramétrico de Mann-Whitney. Verificou-se que o p-valor do teste Mann-Whitney foi igual a 0,009 (p-valor < 0,05), então rejeita-se a hipótese que a média dos dois grupos são iguais a um nível de significância de 5%, em outras palavras, a expansão determinada pelo método JIS A 5015/92 se comporta de maneira diferente em relação às amostras não tratada e tratada 2.

**Tabela 4.8 - Estatística descritiva da expansão obtida pelo método JIS A 5015/92 para as amostras não tratada e tratada 2**

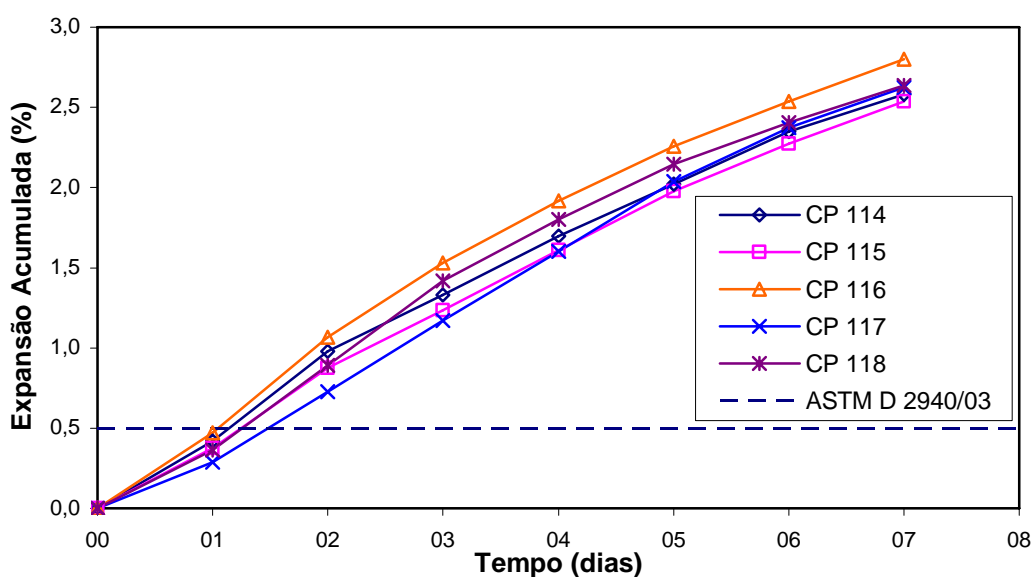
| Amostra     | Número de corpos-de-prova | Expansão (%) |        |       |               |
|-------------|---------------------------|--------------|--------|-------|---------------|
|             |                           | Mínimo       | Máximo | Média | Desvio Padrão |
| Não Tratada | 5                         | 2,93         | 3,59   | 3,24  | 0,31          |
| Tratada 2   | 5                         | 1,85         | 2,92   | 2,48  | 0,40          |

#### 4.4.3 Expansão pelo método ASTM D 4792/00

Foram submetidas ao ensaio de expansão pelo método ASTM D 4792/00 apenas as amostras não tratada e tratada 2, e os resultados desses ensaios são apresentados a seguir separados por amostra. Posteriormente, é apresentada uma análise dos resultados da expansão pelo método ASTM D 4792/00 a partir dos resultados da expansão obtidos nos 7 primeiros dias do método PTM-130/78 para as três amostras de escória de aciaria LD analisadas nesta pesquisa.

##### 4.4.3.1 Expansão pelo método ASTM D 4792/00 da amostra não tratada

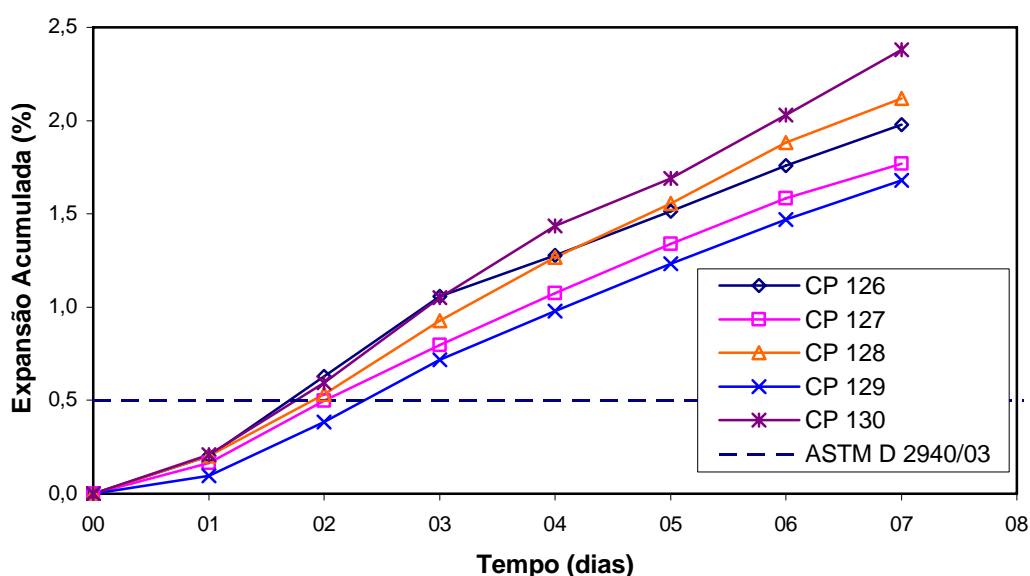
Os resultados de expansão acumulada para o método ASTM D 4792/00 da amostra não tratada são apresentados na Figura 4.37, assim como o limite máximo de 0,5% estabelecido pela norma ASTM D 2940/03. Analisando-se as curvas de expansão da Figura 4.37, percebe-se que a taxa da expansão inicial permanece praticamente constante ao longo dos sete dias de ensaio (média de 0,38%). Quanto ao limite estabelecido pela norma ASTM D 2940/03, os valores de expansão dos 5 corpos-de-prova ensaiados pelo método ASTM D 4792/00 para a amostra não tratada ficaram acima do limite de 0,5% de expansão, com uma média de 2,64%.



**Figura 4.37 - Resultados da expansão acumulada do CP 114 ao CP 118, amostra não tratada, método ASTM D 4792/00**

#### 4.4.3.2 Expansão pelo método ASTM D 4792/00 - amostra tratada 2

Os resultados de expansão acumulada para o método ASTM D 4792/00 da amostra tratada 2 são apresentados na Figura 4.38, assim como o limite máximo de 0,5% estabelecido pela norma ASTM D 2940/03. Analisando-se as curvas de expansão da Figura 4.38, percebe-se, analogamente a amostra não tratada, que a taxa da expansão inicial permanece praticamente constante ao longo dos sete dias de ensaio (média de 0,28%). E, comparando-se os valores de expansão dos cinco corpos-de-prova da amostra tratada 2 ensaiados pelo método ASTM D 4792/00 com o limite estabelecido pela norma ASTM D 2940/03, percebe-se que os cinco corpos-de-prova ficaram acima do limite de 0,5% de expansão, com uma média de 1,99 % de expansão.



**Figura 4.38 - Resultados da expansão acumulada do CP 126 ao CP 130, amostra tratada 2, método ASTM D 4792/00**

No Quadro 4.19, apresenta-se um resumo dos valores de expansão ao final dos 7 dias do ensaio ASTM D 4792/00 para as amostras não tratada e tratada 2, assim como a umidade de compactação e o peso específico aparente seco de cada corpo-de-prova ensaiado por esse método.

As médias da expansão para os resultados das amostras não tratada e tratada 2, calculadas a partir do Quadro 4.19, são apresentadas na Tabela 4.9. Apresenta-se também nessa tabela o número de corpos-de-prova para cada amostra e o mínimo, o máximo e o desvio padrão da variável expansão. Pode-se observar na Tabela 4.9, que, analogamente aos resultados dos métodos PTM-130/78 e JIS A 5015/92, a média da expansão da amostra não tratada (2,64%) foi superior à média da amostra tratada 2 (1,99%), sendo que os valores estão bastante acima

do especificado pela norma ASTM D 2940/03 que é de 0,5%. Devido ao reduzido número de corpos-de-prova (5) o teste estatístico realizado para verificar a diferença entre as médias dos resultados de expansão das duas amostras ensaiadas pelo método ASTM D 4792/00 foi o teste não-paramétrico de Mann-Whitney. Verificou-se que o p-valor do teste Mann-Whitney foi igual a 0,009 (p-valor < 0,05), então rejeita-se a hipótese que a média dos dois grupos são iguais a um nível de significância de 5%, em outras palavras, a expansão determinada pelo método ASTM D 4792/00 se comporta de maneira diferente em relação às amostras não tratada e tratada 2.

| Corpo-de-prova (CP) | Amostra     | Umidade (%) | Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> ) | Expansão (%) |
|---------------------|-------------|-------------|--|--------------|
| 114                 | Não Tratada | 2,16        | 22,2   | 2,58         |
| 115                 | Não Tratada | 2,27        | 21,9   | 2,54         |
| 116                 | Não Tratada | 2,29        | 22,1   | 2,80         |
| 117                 | Não Tratada | 2,24        | 21,6   | 2,62         |
| 118                 | Não Tratada | 2,23        | 22,0   | 2,64         |
| 126                 | Tratada 2   | 2,24        | 21,9   | 1,98         |
| 127                 | Tratada 2   | 2,34        | 22,2   | 1,77         |
| 128                 | Tratada 2   | 2,04        | 22,1   | 2,12         |
| 129                 | Tratada 2   | 2,44        | 22,1   | 1,68         |
| 130                 | Tratada 2   | 1,87        | 22,0   | 2,38         |

**Quadro 4.19 - Resumo dos dados referentes aos resultados do ensaio de expansão pelo método ASTM D 4792/00, amostras não tratada e tratada 2**

**Tabela 4.9 - Estatística descritiva da expansão obtida pelo método ASTM D 4792/00 para as amostras não tratada e tratada 2**

| Amostra     | Número de corpos-de-prova | Mínimo (%) | Máximo (%) | Média (%) | Desvio Padrão (%) |
|-------------|---------------------------|------------|------------|-----------|-------------------|
| Não Tratada | 5                         | 2,54       | 2,80       | 2,64      | 0,10              |
| Tratada 2   | 5                         | 1,68       | 2,38       | 1,99      | 0,28              |

#### 4.4.3.3 Análise dos resultados da expansão pelo método ASTM D 4792/00 a partir dos resultados de expansão obtidos nos 7 primeiros dias do método PTM-130/78

Apesar da pequena diferença de temperatura entre os métodos de ensaio de expansão PTM-130/78 ( $71 \pm 3$  °C) e ASTM D 4792/00 ( $70 \pm 3$  °C), a metodologia de execução desses dois métodos de ensaio até os 7 dias é muito semelhante. Com isso, foram utilizados os resultados de expansão do método PTM-130/78 obtidos nos 7 primeiros dias para determinar a expansão do método ASTM D 4792/00 para as amostras não tratada, tratada 1 e tratada 2, como são apresentados no Quadro 4.20, no Quadro 4.21 e no Quadro 4.22, respectivamente.

Com os resultados do Quadro 4.20 ao Quadro 4.22, foi feita a mesma investigação estatística realizada no método de ensaio de expansão PTM-130/78 com relação: ao efeito da



temperatura na expansão; ao efeito da energia de compactação na expansão; à correlação da umidade de compactação com a expansão, e; a comparação da expansão das amostras não tratada, tratada 1 e tratada 2. Todos os resultados encontrados para essa investigação estatística foram semelhantes aos encontrados na análise do método de ensaio PTM-130/78, o que era de se esperar, devido o método ASTM D 4792/00 ter sido desenvolvido a partir do método PTM-130/78 e devido à taxa de expansão dos últimos 7 dias do método PTM-130/78 não ser tão grande quanto a taxa dos primeiros 7 dias. Logo, através da análise dos resultados de expansão pelo método ASTM D 4792 (Quadro 4.20 ao Quadro 4.22):

- foi verificada, através do teste t, uma diferença estatisticamente significativa (p-valor < 0,01) da expansão quando é analisada considerando a variação de temperatura na amostra tratada 1;
- não se pode afirmar, através da correlação de Pearson, que existe correlação entre a umidade de compactação e a expansão (p-valor > 0,05) para a amostra não tratada, com um p-valor do teste t igual a 0,75, e para a amostra tratada 1, com um p-valor do teste t igual a 0,11;
- foi verificada, através do teste t, uma diferença estatisticamente significativa (p-valor <0,05) da expansão quando é analisada considerando as diferentes energias de compactação na amostra não tratada, com um p-valor do teste t igual a 0,047;
- foi verificada, através dos testes estatísticos de Duncan e de Tukey, a formação de dois subgrupos estatisticamente diferentes (p-valor < 0,01), sendo que a amostra tratada 2 ficou num subgrupo e as amostras não tratada e tratada 1 em outro subgrupo.

| Corpo-de-prova (CP) | Energia de compactação | Umidade (%) | Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> ) | Expansão (%) |
|---------------------|------------------------|-------------|--|--------------|
| 29                  | Proctor normal         | 0,71        | 22,5   | 2,16         |
| 30                  |                        | 0,90        | 22,6   | 2,28         |
| 31                  |                        | 1,98        | 22,2   | 2,36         |
| 32                  |                        | 4,16        | 22,0   | 3,53         |
| 33                  |                        | 7,04        | 21,5   | 2,53         |
| 34                  |                        | 8,48        | 21,6   | 2,64         |
| 35                  |                        | 11,05       | 21,6   | 2,75         |
| 36                  |                        | 12,70       | 21,2   | 2,35         |
| 37                  |                        | 0,03        | 22,3   | 2,20         |
| 38                  |                        | 0,27        | 23,0   | 1,95         |
| 39                  |                        | 2,47        | 22,5   | 2,36         |
| 40                  |                        | 4,49        | 22,5   | 2,62         |
| 41                  |                        | 6,11        | 22,0   | 3,16         |
| 42                  |                        | 7,90        | 21,4   | 2,46         |
| 43                  |                        | 11,61       | 21,3   | 2,39         |
| 57                  | Proctor modificado*    | 0,03        | 23,0   | 2,31         |
| 58                  |                        | 0,00        | 23,0   | 2,47         |
| 59                  |                        | 2,33        | 22,9   | 3,33         |
| 60                  |                        | 4,36        | 23,3   | 2,32         |
| 61                  |                        | 6,01        | 23,0   | 2,47         |
| 62                  |                        | 8,24        | 23,5   | 2,11         |
| 63                  |                        | 9,23        | 23,1   | 1,97         |
| 64                  |                        | 0,51        | 23,2   | 1,88         |
| 65                  |                        | 0,56        | 23,2   | 1,86         |
| 66                  |                        | 2,05        | 23,6   | 2,06         |
| 67                  |                        | 3,61        | 23,5   | 2,66         |
| 68                  |                        | 5,78        | 23,8   | 1,67         |
| 69                  |                        | 7,41        | 23,4   | 1,96         |
| 70                  |                        | 10,05       | 23,5   | 2,07         |
| 71                  |                        | 0,02        | 22,8   | 2,04         |
| 72                  | 0,18                   | 22,8        | 2,61   |              |
| 73                  | 2,09                   | 22,6        | 2,62   |              |
| 74                  | 10,43                  | 22,8        | 1,60   |              |
| 75                  | 4,44                   | 22,7        | 2,50   |              |
| 76                  | 7,89                   | 23,5        | 1,92   |              |
| 77                  | 6,09                   | 22,7        | 2,52   |              |

\* a energia modificada não é a correta do método ASTM D 4792/00 e foi utilizada para uma investigação adicional

**Quadro 4.20 - Resumo dos resultados de expansão do método ASTM D 4792/00 realizado à temperatura de 71°C a partir dos resultados da expansão obtidos nos 7 primeiros dias do método PTM-130/78, amostra não tratada**

| Corpo-de-prova (CP) | Temperatura (°C) | Umidade (%) | Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> ) | Expansão (%) |
|---------------------|------------------|-------------|--|--------------|
| 1                   | 71               | 8,42        | 21,7   | 2,05         |
| 2                   |                  | 11,37       | 21,2   | 2,48         |
| 3                   |                  | 9,08        | 21,3   | 1,68         |
| 4                   | 80*              | 14,02       | 21,3   | 3,67         |
| 5                   |                  | 11,33       | 21,7   | 3,07         |
| 6                   |                  | 9,98        | 21,3   | 3,81         |
| 7                   |                  | 7,64        | 21,1   | 3,13         |
| 8                   |                  | 5,12        | 21,6   | 3,8          |
| 9                   |                  | 3,24        | 22,6   | 3,44         |
| 10                  |                  | 1,09        | 22,4   | 2,9          |
| 11                  |                  | 1,95        | 22,4   | 3,01         |
| 12                  |                  | 5,61        | 21,4   | 3,71         |
| 13                  | 71               | 7,79        | 21,2   | 2,25         |
| 14                  |                  | 9,21        | 21,8   | 2,38         |
| 15                  |                  | 2,22        | 22,2   | 2,93         |
| 16                  |                  | 2,22        | 22,6   | 2,65         |
| 17                  |                  | 2,22        | 22,6   | 3,75         |
| 18                  |                  | 2,22        | 22,4   | 2,18         |
| 19                  |                  | 1,65        | 22,7   | 2,75         |
| 20                  |                  | 1,65        | 22,4   | 2,36         |
| 21                  |                  | 1,65        | 22,1   | 2,21         |
| 22                  |                  | 1,65        | 22,6   | 2,26         |
| 23                  |                  | 0,69        | 22,2   | 2,37         |
| 24                  |                  | 0,71        | 21,8   | 2,61         |
| 25                  |                  | 1,53        | 22,3   | 2,57         |
| 26                  |                  | 1,85        | 22,5   | 2,47         |
| 27                  |                  | 0,79        | 22,6   | 2,45         |
| 28                  |                  | 0,86        | 22,4   | 2,61         |

\* a temperatura de 80°C não é a correta do método ASTM D 4792/00 e foi utilizada para uma investigação adicional

**Quadro 4.21 - Resumo dos resultados de expansão do método ASTM D 4792/00 a partir dos resultados da expansão obtidos nos 7 primeiros dias do método PTM-130/78, energia do Proctor normal, amostra tratada 1**

| Corpo-de-prova (CP) | Umidade (%) | Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> ) | Expansão (%) |
|---------------------|-------------|--|--------------|
| 90                  | 2,11        | 21,77  | 1,92         |
| 91                  | 2,18        | 22,07  | 2,35         |
| 92                  | 2,00        | 22,56  | 1,95         |
| 94                  | 2,23        | 22,07  | 2,59         |
| 95                  | 2,23        | 22,07  | 1,81         |
| 96                  | 2,03        | 22,26  | 1,77         |
| 97                  | 2,29        | 25,01  | 1,92         |
| 98                  | 2,03        | 21,87  | 1,54         |
| 99                  | 1,78        | 21,97  | 1,66         |
| 100                 | 1,98        | 21,77  | 1,59         |
| 101                 | 1,96        | 21,58  | 1,85         |
| 102                 | 2,13        | 21,38  | 1,58         |
| 103                 | 2,01        | 21,48  | 1,63         |
| 104                 | 1,79        | 21,58  | 1,36         |
| 105                 | 1,97        | 22,26  | 1,56         |

**Quadro 4.22 - Resumo dos dados de expansão do método ASTM D 4792/00 a partir dos resultados da expansão obtidos nos 7 primeiros dias do método PTM-130/78, energia do Proctor normal, amostra tratada 2 e realizado à temperatura de 71°C**

## 4.5 Ensaios adicionais

As amostras não tratada e tratada 2 da escória de aciaria LD estudada foram submetidas aos ensaios adicionais de permeabilidade a carga variável e CBR ou Índice de suporte Califórnia, onde os resultados são apresentados a seguir.

### 4.5.1 Permeabilidade a carga variável

Na Tabela 4.10, apresentam-se as médias dos resultados de coeficiente de permeabilidade de cada corpo-de-prova obtidas para as amostras de escória de aciaria LD não tratada e tratada 2. Apresenta-se também nessa tabela o peso específico aparente seco, o índice de vazios e o desvio padrão da permeabilidade de cada corpo-de-prova ensaiado.

| Corpo-de-prova (CP) | Amostras    | Energia de Compactação | Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> ) | Índice de vazios | Coeficiente de permeabilidade (m/s) |                       |
|---------------------|-------------|------------------------|--|------------------|-------------------------------------|-----------------------|
|                     |             |                        |  |                  | Média                               | Desvio padrão         |
| 1                   | Não tratada | Proctor normal         | 22,1   | 0,52             | 1,50x10 <sup>-5</sup>               | 0,02x10 <sup>-5</sup> |
| 2                   |             |                        | 22,2   | 0,51             | 1,90x10 <sup>-5</sup>               | 0,04x10 <sup>-5</sup> |
| 3                   |             | Proctor modificado     | 22,6   | 0,48             | 1,78x10 <sup>-6</sup>               | 0,07x10 <sup>-6</sup> |
| 4                   |             |                        | 22,9   | 0,46             | 2,59x10 <sup>-6</sup>               | 0,13x10 <sup>-6</sup> |
| 5                   | Tratada 2   | Proctor normal         | 21,9   | 0,53             | 4,04x10 <sup>-6</sup>               | 0,18x10 <sup>-6</sup> |
| 6                   |             |                        | 22,0   | 0,52             | 4,05x10 <sup>-6</sup>               | 0,19x10 <sup>-6</sup> |
| 7                   |             | Proctor modificado     | 23,0   | 0,45             | 2,93x10 <sup>-7</sup>               | 0,16x10 <sup>-7</sup> |
| 8                   |             |                        | 23,1   | 0,44             | 3,78x10 <sup>-7</sup>               | 0,12x10 <sup>-7</sup> |

**Tabela 4.10 - Resumo dos resultados do ensaio de permeabilidade do CP 1 ao CP 6 para amostras de escória de aciaria LD não tratada e tratada 2, compactadas com as energias do Proctor normal e proctor modificado**

Como se pode observar na Tabela 4.10, as médias de coeficiente de permeabilidade dos corpos-de-prova da amostra não tratada compactados na energia do Proctor modificado, CP 3 (1,78x10<sup>-6</sup> m/s) e CP 4 (2,59x10<sup>-6</sup> m/s), são inferiores às médias de coeficiente de permeabilidade dos corpos-de-prova da mesma amostra compactados com energia do Proctor normal, CP 1 (1,50x10<sup>-5</sup> m/s) e CP 2 (1,90x10<sup>-5</sup> m/s). O mesmo acontece com as médias de coeficiente de permeabilidade da amostra tratada 2. Esses resultados estão de acordo com os conceitos de mecânica dos solos, porém somente a redução do índice de vazios desses corpos-de-prova não justifica essa variação na permeabilidade que pode estar ligada a outros fatores não estudados. Devido a diferente granulometria, não se pode comparar diretamente os coeficientes de permeabilidade das amostras não tratada e tratada 2.

Além do efeito da energia de compactação, os resultados de ensaio de permeabilidade servem para melhor caracterizar a escória de aciaria LD deste estudo e os resultados de coeficiente de

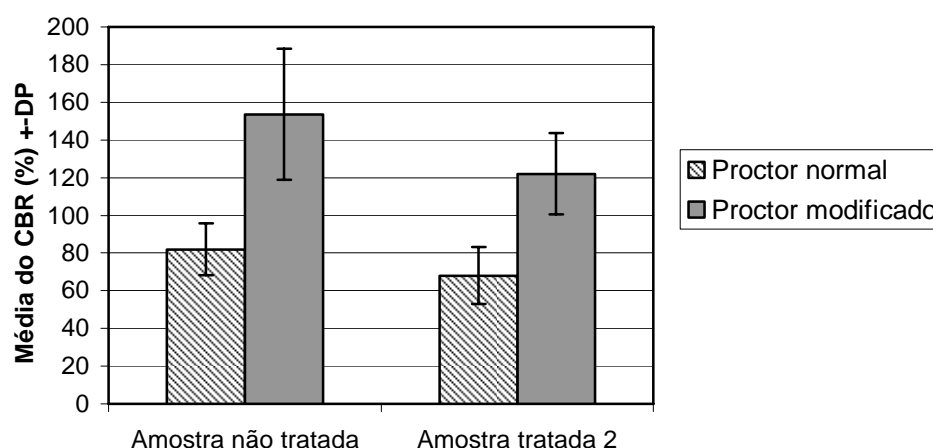
permeabilidade se encontram próximos dos valores encontrados por Nascimento (2003), entre  $9,0 \times 10^{-6}$  e  $3,0 \times 10^{-8}$  m/s para quatro diferentes fontes de escória de aciaria LD brasileiras.

#### 4.5.2 Índice de Suporte Califórnia - CBR

Os valores dos resultados de CBR dos corpos-de-prova das amostras não tratada e tratada 2 compactados com as energias do Proctor normal e do Proctor modificado são apresentados na Tabela 4.11. Apresenta-se também nessa tabela o peso específico aparente seco de cada corpo-de-prova ensaiado e as médias e desvios do CBR separados por amostra e por energia de compactação. Para uma melhor visualização dos resultados, apresentam-se na Figura 4.39 as médias e desvios padrão (DP) dos resultados de CBR das amostras não tratada e tratada 2. Podem-se observar com esses resultados (Tabela 4.11 e Figura 4.39) que as médias dos resultados de CBR para as amostras compactadas com energia do Proctor modificado foram superiores aos resultados das amostras compactadas com energia do proctor normal, tanto na amostra não tratada quanto na amostra tratada 2. Apesar desses resultados serem esperados, esse aumento do CBR com o aumento da energia de compactação não parece ser justificado somente pelo aumento do peso específico aparente seco, já que esse aumento foi pequeno para as duas amostras não tratada e tratada 2.

**Tabela 4.11 - Resultados dos ensaios de Índice Suporte Califórnia (CBR) para as amostras de escória de aciaria LD não tratada e tratada 2**

| Amostra     | Corpo-de-prova (CP) | Energia de compactação | Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> ) | CBR (%)          |              |                    |
|-------------|---------------------|------------------------|--|------------------|--------------|--------------------|
|             |                     |                        |  | Valor de cada CP | Média        | Desvio Padrão (DP) |
| Não tratada | 1                   | Proctor normal         | 22,72  | 82               | <b>82,0</b>  | 13,6               |
|             | 2                   |                        | 22,48  | 70               |              |                    |
|             | 3                   |                        | 22,46  | 97               |              |                    |
|             | 4                   |                        | 22,66  | 94               |              |                    |
|             | 5                   |                        | 22,35  | 67               |              |                    |
|             | 6                   | Proctor modificado     | 22,82  | 117              | <b>153,6</b> | 34,7               |
|             | 7                   |                        | 22,91  | 164              |              |                    |
|             | 8                   |                        | 23,20  | 138              |              |                    |
|             | 9                   |                        | 23,55  | 141              |              |                    |
|             | 10                  |                        | 23,24  | 208              |              |                    |
| Tratada 2   | 11                  | Proctor normal         | 22,07  | 59               | <b>68,0</b>  | 15,1               |
|             | 12                  |                        | 22,87  | 85               |              |                    |
|             | 13                  |                        | 22,48  | 84               |              |                    |
|             | 14                  |                        | 22,43  | 55               |              |                    |
|             | 15                  |                        | 22,27  | 57               |              |                    |
|             | 16                  | Proctor modificado     | 23,56  | 141              | <b>122,0</b> | 21,5               |
|             | 17                  |                        | 23,42  | 95               |              |                    |
|             | 18                  |                        | 23,23  | 146              |              |                    |
|             | 19                  |                        | 23,25  | 109              |              |                    |
|             | 20                  |                        | 23,25  | 119              |              |                    |



**Figura 4.39 - Resumo dos resultados de CBR do CP 1 ao CP 20 para as amostras de escória de aciaria LD não tratada e tratada 2 compactados com energia do Proctor normal e do Proctor modificado**

Para se avaliar as diferenças estatísticas nos valores de CBR na presença dos fatores energia de compactação e amostra, foi realizada a análise de variância (ANOVA) dos resultados de CBR (Tabela 4.11) utilizando o teste F a um nível de significância de 5%. Como resultado desse teste, encontrou-se uma diferença estatisticamente significativa ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) quando o CBR é analisado considerando as duas energias de compactação e as duas amostras analisadas, com um  $p$ -valor do teste F menor que 0,01 para o fator energia de compactação e um  $p$ -valor do teste F igual a 0,040 para o fator amostra. Com esses resultados, confirma-se que existe uma influência da energia de compactação nos valores de CBR dos corpos-de-prova ensaiados e que amostra não tratada apresentou uma média de valores do CBR superior à média da amostra tratada 2 para a mesma energia de compactação. Porém, não se deve concluir que essa variação do CBR com as amostras foi devida ao tratamento realizado na escória de aciaria LD deste estudo, pois existem outras variáveis envolvidas nessa comparação, como, por exemplo, a granulometria das duas amostras analisadas que é diferente.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A análise dos resultados desta pesquisa permite concluir que a escória de aciaria LD avaliada neste estudo deve sofrer algum tipo de tratamento, com o objetivo de reduzir os níveis de expansão, para essa escória de aciaria poder ser utilizada em bases e sub-bases de pavimentos, uma vez que, se for utilizada uma escória de aciaria com valores de expansão elevados, esse material pode danificar o pavimento.

Devido a grande heterogeneidade das escórias de aciaria em geral, deve ser realizada uma amostragem criteriosa do lote de escória de aciaria avaliado considerando as normas da ABNT de amostragem de resíduos (NBR 10007/2004) e de amostragem de agregados (NBR NM 26/2001), tal como os procedimentos de amostragem utilizados neste estudo.

Para favorecer uma possível ampliação do mercado de escórias de aciaria para uso em bases e sub-bases, os lotes de escória de aciaria LD devem ser corretamente avaliados, principalmente, segundo o requisito expansão, através de um critério técnico rigoroso utilizando o limite de expansão estabelecido pelas normas rodoviárias DNIT-EM 262/94 e DNIT-PRO 263/94, assim como o critério de aceitação proposto neste trabalho. No qual, o lote de escória de aciaria somente seria aceito quando a expansão de todos os corpos-de-prova, ensaiados para cada amostra, fosse inferior ao limite de 3% pelo método PTM-130/78, considerando-se uma metodologia estatisticamente significativa para o cálculo do número mínimo de corpos-de-prova a serem ensaiados por esse método de ensaio de expansão.

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

- apesar das amostras de escória de aciaria LD deste estudo não atenderem a proporção de granulometria exigida pela especificação DNIT-EM 262/94, a forma angulosa e a granulometria bem graduada das amostras de escória de aciaria deste estudo podem possibilitar a formação, após compactação, de uma forte estrutura intertravada que pode ter uma elevada resistência à deformação (JONES et al., 1996; IHOBE., 1999; TFHR, 2003);
- as amostras de escória de aciaria LD deste estudo apresentaram características não plásticas (NP), estando de acordo com a literatura Hadjadjji et al. (2002) e Nascimento (2003);

- a massa específica dos grãos das amostras de escória de aciaria LD deste estudo foi elevada, entre 3370 e 3410 kg/m<sup>3</sup>, porém estando dentro do limite estabelecido pela especificação DNIT-EM 262/94;
- a massa unitária no estado solto das amostras da escória de aciaria LD deste estudo foi elevada, entre 1980 e 2010 kg/m<sup>3</sup>, estando acima do limite máximo de 1700 kg/m<sup>3</sup> estabelecido pela especificação DNIT-EM 262/94, porém a maior massa unitária pode ser uma vantagem quando se quer algum tipo de estabilização por ação da gravidade, como confinamento e resistência à erosão por ação da água (MOTZ; GEISELER, 2001; JUCKES, 2003);
- a absorção das amostras de escória de aciaria LD deste estudo, entre 2,5 e 2,6%, se apresentou acima do limite estabelecido pela especificação DNIT-EM 262/94, porém não se encontraram evidências na literatura que a absorção afete negativamente a expansão quando utilizadas em camadas granulares;
- a abrasão *Los Angeles* das amostras de escória de aciaria LD deste estudo se apresentou abaixo do limite máximo de 25%, variando de 11% a 14%, estabelecido pela especificação DNIT-EM 262/94.

A análise dos ensaios de compactação obtidos por esta pesquisa permite concluir que:

- os resultados dos ensaios de compactação com reuso de material apresentaram valores de peso específico aparente seco um pouco superiores aos ensaios sem reuso na amostra de escória de aciaria LD tratada 1, porém, não foram encontradas evidências estatísticas para afirmar que os resultados dos ensaios de compactação dos dois procedimentos são diferentes,
- como era de se esperar, os valores do peso específico aparente seco dos ensaios de compactação das amostras de escória de aciaria LD deste estudo com energia do Proctor modificado foram superiores (cerca de 6%) aos valores dos ensaios com energia do Proctor normal. Entretanto, essa diferença de peso específico aparente seco não foi muito significativa em comparação com a variação obtida com solos argilosos e, também, não foram encontradas evidências estatísticas para afirmar que os resultados dos ensaios de compactação utilizando as duas energias são diferentes;
- os resultados dos ensaios de compactação das amostras de escória de aciaria LD tratada 1 e não tratada utilizando a energia do Proctor normal, apresentaram valores semelhantes, não sendo possível verificar uma diferença visível entre os resultados das



duas amostras. Além dessa semelhança, não foram encontradas evidências estatísticas para afirmar que os resultados dos ensaios de compactação utilizando as duas amostras são diferentes;

- os resultados dos ensaios de compactação das amostras da escória de aciaria LD deste estudo não apresentaram uma umidade ótima de compactação definida, tendo um comportamento típico de solos granulares. Esses resultados contradizem as normas PTM-130/78, ASTM D 4792/00 e JIS A 5015/92, que implicitamente admitem uma curva de compactação típica de solos coesivos, ao estabelecerem que o ensaio de expansão deva ser feito em corpos-de-prova moldados na umidade ótima obtida do ensaio de compactação.

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

- a temperatura teve um papel muito importante na expansão da amostra de escória de aciaria LD tratada 1 pelo método de ensaio PTM-130/78. Devido a influência altamente significativa da temperatura na expansão, a expansão deve ser um fator bastante controlado durante o ensaio, tanto através de equipamentos que mantenham a temperatura correta, quanto pelo controle da temperatura com termômetros ao longo de todo ensaio de expansão por esse método;
- através da análise estatística da correlação de Pearson, não houve correlação entre a umidade de compactação e a expansão do método PTM-130/78 para as amostras não tratada e tratada 1 da escória de aciaria LD estudada. Apesar disso, estabeleceu-se que os ensaios de expansão pelo método PTM-130/78 das amostras de escória de aciaria LD estudada devem ser realizados em corpos-de-prova compactados com a escória de aciaria seca ao ar. Essa umidade relativamente baixa, em torno de 2%, pode ser justificada para se fixar uma mesma condição de umidade para os corpos-de-prova, pela não existência da umidade ótima e pela umidade da escória seca ao ar não ter a influência negativa da capilaridade e nem problemas de drenagem de água pela base durante a compactação;
- a energia do Proctor modificado provocou menores valores de expansão pelo método PTM-130/78 em relação à energia do Proctor normal na amostra não tratada da escória de aciaria LD do estudo, o que foi confirmado pela análise estatística e que contraria a experiência de expansão de solos argilosos e, portanto, é uma conclusão que demanda um estudo mais aprofundado;

- para as três amostras da escória de aciaria LD deste estudo, apenas a amostra tratada 2 atendeu o limite de 3% de expansão estabelecido pelas normas específicas de escória de aciaria DNIT-PRO 263/94 e DNIT-EM 262/94, analisando-se pelo critério de aceitação proposto neste estudo;
- os resultados do ensaio de expansão pelo método PTM-130/78, das três amostras da escória de aciaria LD deste estudo, foram separados em dois subgrupos estatisticamente diferentes, de acordo com os testes estatísticos de Duncan e de Tukey, sendo que a amostra tratada 2 ficou num subgrupo e as amostras não tratada e tratada 1 em outro subgrupo;
- a média da expansão, das amostras não tratada e tratada 2 da escória de aciaria LD deste estudo, encontra-se acima do limite de 2% de expansão obtida pelo método JIS A 5015/92 (o ensaio do método JIS A 5015/92 não foi realizado na amostra tratada 1);
- os valores de expansão de todos os corpos-de-prova das amostras não tratada e tratada 2 da escória de aciaria LD estudada, obtidos pelo método ASTM D 4792/00, encontram-se acima do limite de 0,5% de expansão estabelecido pela norma ASTM D 2940/03 (o ensaio do método ASTM D 2940/03 não foi realizado na amostra tratada 1);
- todos os resultados encontrados na investigação estatística realizada no método de ensaio de expansão ASTM D 4792/00 a partir dos resultados de expansão obtidos nos 7 primeiros dias pelo método PTM-130/78 (efeito da temperatura na expansão, efeito da energia de compactação na expansão, correlação da umidade de compactação na expansão, comparação da expansão das amostras analisadas) foram semelhantes aos encontrados na análise dos resultados para o método PTM-130/78, o que era de se esperar, devido o método ASTM D 4792/00 ter sido desenvolvido a partir do PTM-130/78 e devido a taxa da expansão dos últimos 7 dias do método PTM-130/78 não ser tão grande quanto a taxa de expansão dos primeiros 7 dias.

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

- a média do coeficiente de permeabilidade das amostras não tratada e tratada 2 da escória de aciaria LD deste estudo variou de  $1,5 \times 10^{-5}$  a  $3,8 \times 10^{-7}$  m/s e se encontram próximos aos valores encontrados por Nascimento (2003);

- os valores de CBR, das amostras não tratada e tratada 2 da escória de aciaria LD deste estudo compactadas com energia do Proctor modificado, variaram de 95 a 208% estando acima dos valores exigidos pela especificação DNIT-ES 303/97. Além disso, foi confirmado que houve uma influência estatisticamente significativa da energia de compactação nos valores de CBR dos corpos-de-prova ensaiados, apesar da pequena variação do peso específico aparente seco com a energia de compactação.

Com o objetivo de contribuir para a maior utilização das escórias de aciaria em bases e sub-bases de pavimentos e para dar continuidade a este trabalho, podem-se sugerir alguns temas para futuras pesquisas:

- estudo do comportamento de resistência e expansão de misturas de escória de aciaria com escória de alto-forno e/ou cinza volante;
- estudo do comportamento de resistência e expansão de misturas de escória de aciaria com solos argilosos;
- estudo dos limites de expansão obtidos por ensaio de laboratório, calibrando esses limites com pavimentos rigorosamente controlados, construídos com escória de aciaria e agregados naturais;
- estudo do efeito da granulometria na expansão da escória de aciaria obtida pelo método JIS A 5015/92;
- estudo do efeito da energia de compactação na expansão da escória de aciaria obtida de ensaios de campo;
- estudo do efeito da granulometria no tratamento da escória de aciaria, utilizando-se métodos de ensaio de expansão para avaliar esse fenômeno;
- proposição e estudo de outros métodos de determinação da expansão que sejam menos onerosos e mais rápidos para liberação de resultados;
- estudo para proposição de alteração dos limites da especificação rodoviária DNIT-EM 262/94, para a granulometria, absorção de água, massa específica e massa unitária da escória de aciaria utilizada na construção de pavimentos rodoviários.

## 6. REFERÊNCIAS

ALVARENGA, J. C. A. Um Estudo de Avaliação Estrutural e Econômica de Pavimentos Flexíveis de Escória de Aciaria. Dissertação de mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

AMARAL, L. A. Hormigones com escorias de horno eléctrico como aridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental. Tese de doutorado. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, 230 p. 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. Potencial de expansão de agregados em reações de hidratação. ASTM D 4792/2000.

\_\_\_\_\_. Classification of soils for engineering purpose. ASTM D 2487/1990.

\_\_\_\_\_. Graded aggregate material for bases or subbases for highways or airports. ASTM D 2940/2003.

\_\_\_\_\_. Soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate. ASTM C 88/1976.

ANDERSON, D. M. Problems of slag handling and utilization in North America. In; Utilization of blast furnace and BOF slag. International iron and steel institute (IISI). Bruxelas. 1984.

ARAUJO, A. L.; Manual de Siderurgia - Produção. São Paulo, Editora Arte & Ciência, V. 1, 1997.

ASA - AUSTRALIAN SLAG ASSOCIATION. A Guide to the use of slag in roads. Australasian Slag Association, 35p, 1993. Revision 2, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6457 - Solo - Amostras de Solos - Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização - 1986.

\_\_\_\_\_. NBR 6458 - Grãos de Pedregulhos Retidos na Peneira 4,8mm - Determinação da Massa Específica Aparente e da Absorção de Água - 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 6459 - Solo - Determinação do Limite de Liquidez - 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 6508 - Grãos de Solos que Passam na Peneira 4,8mm - Determinação da Massa Específica - 1984.

- \_\_\_\_\_. NBR 7180 - Solo - Determinação do Limite de Plasticidade - 1984.
- \_\_\_\_\_. NBR 7181 - Solo - Análise Granulométrica - 1984.
- \_\_\_\_\_. NBR 7182 - Solo - Ensaio de Compactação - 1986.
- \_\_\_\_\_. NBR 7251 - Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária - 1982.
- \_\_\_\_\_. NBR 9776 - Determinação da Massa Específica de Agregado Miúdo por meio do Frasco de Chapman - 1987.
- \_\_\_\_\_. NBR 9895 - Solo - Índice de Suporte Califórnia - 1987.
- \_\_\_\_\_. NBR 9937 - Massa Específica e Absorção de Agregado Graúdo - 1987.
- \_\_\_\_\_. NBR 10007 - Amostragem de resíduos sólidos - 2004.
- \_\_\_\_\_. NBR 10004 - Resíduos Sólidos (Classificação). Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. NBR 10005 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. NBR 10006 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. NBR 11804 - Materiais para sub-base ou base estabilizada granulometricamente - Especificação - 1991.
- \_\_\_\_\_. NBR 14545 - Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável - 2000.
- \_\_\_\_\_. NBR NM 26 - Amostragem de agregados - 2001.
- \_\_\_\_\_. NBR NM 27 - Redução de amostras de campo de agregados, para ensaios de laboratório - 2001.
- \_\_\_\_\_. NBR NM 51 - Agregado Graúdo - Ensaio de Abrasão Los Angeles - 2000.
- ATKINS, P. W. Physical Chemistry. Oxford, 6ª ed.. New York. 1014 p, 1997.
- AZEVEDO, C. S. Contribuição das adições minerais para a resistência à corrosão da armadura do concreto. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2001

BALTAZAR, R. P. Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 77p, 2001.

BRANCO, V. T. F. C. Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado. Dissertação de mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

CERATTI, J. A. P. Notas de aula da disciplina de mecânica dos pavimentos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

CERATTI, J. A. P.; LOPES F. R. Uma análise paramétrica do ensaio CBR. In.: Solos e Rochas, Vol 08. p. 37-44, 1985.

CISSE, A. Compactage à séc des remblais et assises de chaussés. Rapport de Recherche LPC, n° 112, Laboratoire Central des Ponts et Chaussés, França, 1982.

COCHRAN, W. Sampling Techniques. John Wiley, 3ª ed., New York, 1977.

COMPANHIA SIDERÚRGICA DE TUBARÃO - CST. Acerita, escória de aciaria com redução de expansão. In: Seminário escória de aciaria; a excelência na utilização do material de múltiplas aplicações. Vitória, 2003.

\_\_\_\_\_. Escória de aciaria in natura e acerita, escória de aciaria com redução de expansão. Qualidade e tecnologia aplicada à pavimentação rodoviária. Cartilha de utilização. Vitória, 2003b.

\_\_\_\_\_. Utilização de escória de aciaria LD-NP. Manual de utilização. Vitória, 2003c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Análise Granulométrica de Solos por Peneiramento - DNIT-ME 80-94, 1994.

\_\_\_\_\_. Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários - DNIT-PRO 263/94. Rio de Janeiro, 3p, 1994.

\_\_\_\_\_. Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários - DNIT-PRO 262/94. Rio de Janeiro, 4p, 1994.

\_\_\_\_\_. Índice de Suporte Califórnia de Solos, Método de Ensaio - DNIT - ME 50-64, 1964.

\_\_\_\_\_. Pavimentação - base estabilizada granulometricamente - DNIT-ES 303/97. Rio de Janeiro, 7p., 1997.

EMERY, J. J. Steel slag utilization in asphalt mixes. In.: Canadian technical asphalt association proceedings. Ontario, p. 296 - 304, 1984.

\_\_\_\_\_. Utilization des scories d'aciérie dans la construction des autorotes canadiennes. Revue de Métallurgie, p. 303 - 310, 1978.

\_\_\_\_\_. Japanese and Canadian use of steel slag aggregate in asphalt mixes. First presented at Paving in Cold Areas Mini Workshop 3, Joint Canada/Japan Science and Technology Consultations, Ottawa Ontario, July 20-22, 26p., 1987

FARRAND, B.; EMERY, J. Recent improvements in quality of steel slag aggregate. In: Transportation Research Record, n° 1486, p - 137-141, 1995.

FILEV, Rodrigo. Escória de aciaria, Ficha técnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, disponível em [http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria\\_de\\_aciaria.htm](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria_de_aciaria.htm) Acessado em abril de 2003.

FINE, L. W.; BEALL, H. Chemistry for engineers and Scientists. Sauders College Publishing, USA, 1006 p, 1990.

GEISELER J., SCHLOSSER R., Investigation concerning the structure and properties of steel slags, In: 3rd International Conference on Molten Slags and Fluxes, junho, Escócia, 1988.

GEISELER, J. Slag - approved materials for a better future. Iron and Steel Slags - Properties and utilization - Reports, Marseilles, p. 9 - 23, 1999.

\_\_\_\_\_. The working group metallurgical by-products. Iron and Steel Slags - Properties and utilization - Reports, p. 25-39, 1998.

\_\_\_\_\_. Use of steelworks slag in Europe. Waste management, vol 16, n.1-3, p.59-63, London. 1996.

GEISELER, J.; DRISSEN P.; KUEHN, M.; SCHREY, H. Liquid slag treatment guarantees high product quality of steel slags. Iron and Steel Slags - Properties and utilization - Reports, pp 177-188, 1998.

GEORGE, C. M.;SORRENTINO, F. P. Valorization of basic oxygen steel slags, 7° International Congress on the Chemistry of Cement - ICCC, Vol III, pp 140-144, Paris, 1980.

GEYER, R.T. Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto. Tese de Doutorado - UFRGS. Porto Alegre. 170p., 2001.

GOMES, F. P. Curso de estatística experimental. Livraria Nobel, 12ª ed., 467 p, Piracicaba, 1987.

GUMIERI, A. G.; PAGNUSSAT, D. T.; DAL MOLIN, D.C.C. The use of steel slag as mineral admixture to the concrete. In: Sustainable construction into the next millennium environmentally, friendly and innovative cement bases materials. João Pessoa, 2000.

HADJADJI T., GODINHO R., DINIS de SOUZA C., TORRES A., Aplicabilidade de Escórias de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos na Construção Rodoviária, 8º Congresso Nacional de Geotécnica - A Geotécnica Portuguesa e os Desafios do Futuro, Volume 3 - Lisboa, Portugal, 15 a 18 de Abril de 2002.

HEATON, B. S. Developments in the uses of slags from iron & steel plants in road pavements. The University of Newcastle, 9p, 1996.

\_\_\_\_\_. Steelworks slag road pavement test sections. Australian Road Research 19(2), pp. 14.5-154, 1989.

HIGHT, D.W., STEVENS, M. G. H., An analysis of the California Bearing Ratio test in Saturated Clays, Geotechnique 32, N 4, p. 315-322, 1982.

IHOBE S.A. Libro Blanco de minimización de residuos y emisiones de escorias de acería. Sociedad Pública de Gestión Ambiental, Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco, 131p., 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA - IBS. Anuário estatístico da indústria siderúrgica brasileira - 2005.

\_\_\_\_\_. Estudo sobre Aplicações de Escórias Siderúrgicas. Relatório Final, 104p, 1999.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Siderurgia. Balanço social da siderurgia, 2002.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS - JIS. Escória siderúrgica para construção de estradas (tradução da norma japonesa). JIS A 5015 - 1992.

JOHN, V. M. Pesquisa e desenvolvimento de mercados para resíduos. In: Workshop "Reciclagem e Reutilização de Resíduos como materiais de construção civil", ANTAC, São Paulo, 1996.

JONES, N. C.; DOBSON, C. J.; HANLEY, P. J. High quality steel slag aggregate for road construction. The Slag Reduction Company Ltd, 15p, Australia, 1996.



JUCKES, L. M. The volume stability of modern steelmaking slags. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, Transactions of the Institution of Mining & Metallurgy, section C, Vol. 112, pp 177-197, 2003.

JUCKES, L. M.; THOMAS, G. H. Self-binding of blast furnace and LD slag for road construction. 19p, s.d.

KANDHAL, P.S.; HOFFMAN, G.L. Evaluation of steel slag fine aggregate in hot-mix asphalt mixes. Transportation Research Record, Washington, D.C., n. 1583, pp 28-36, 1997.

KNELLER, W. A.; GUPTA, J; BORKOWSKI, M. L.; DOLLIMORE, D. Determination of original free lime content of weathered iron and steel slags by thermogravimetric analysis. Transportation Research Record 1434, p. 17-22, 1994.

KUEHN, M.; DRSSSEN, P.; SCHREY, H. Treatment of liquid steel slag. In: 2nd European slag conference - Euroslag. Dusseldorf, 2000.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. Soils Mechanics. Massachusetts Institute of Technology, 1969.

LAPAV - LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO. Relatório Interno. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEMASS, B. Slag solutions for heavy duty road pavements. Australian Steel Mill Services Pty Ltd - ASMS, 13 p., s. d.

LEE, P. Y.; SUEDEKAMP, R. J. Characteristics of irregularly shaped compaction curves of soils. Highway Research Record, Washington, nº 381, p. 1-9, 1972.

LITTLE, A. D; SETEPLA Tecnometal, Estudo sobre aplicações de escórias siderúrgicas. Relatório elaborado para o IBS, 1999.

MACHADO, A. T. Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 135p, São Paulo, 2000.

MARMIT, H. M. Efeito das características de compactação no módulo resiliente de britas graduadas. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

MASLEHUDDIN M., SHARIF A. M., SHAMEEM M., IBRAHIM M., BARRY M. S., Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. *Construction and Building Materials* 17, p. 105–112, 2003.

MASUERO, A. B.; VILELA, A. C.; DAL MOLIN, D. Utilização de escórias de aciaria e de cobre como adições para concretos. In: *International congress of concrete technology*, 1998, Buenos Aires. *Anais. Buenos Aires*, p. 447-460, 1998.

\_\_\_\_\_. Emprego de escórias de aciaria elétrica como adição a concretos. *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, 19 p, 2000

MAW, K. J. *Steel Slag Its Use and Development in the United Kingdom*. The Slag Reduction Company Limited. *Conf. Proceeding*, pp. 27-49, USA, 1979.

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

MIRSHAWKA, V. *Probabilidades e estatística para engenharia*. Livraria Nobel, 483 p, V. 1, São Paulo, 1986.

MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, 5<sup>a</sup> ed., 683 p, New York, 2001.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A. *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley & Sons, New York, 1992.

MORETTIN, P. A. *Introdução à estatística para ciências exatas*. Atual editora, 211 p, São Paulo, 1981.

MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slag an opportunity to save natural resources, In: *Waste Management* 21, Duisburg, Alemanha, p. 285-293, 2001.

MOTZ, H.; GEISELER, J. The steel slags - characteristics, properties and quality assurance, *Iron and Steel Slags - Properties and utilization - Reports* p. 149 - 168, 1998.

MURPHY J. N.; MEADOWCROFT T. R.; BARR P. V. Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag. *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol 36, p. 315-331, 1997.

NAGAO, Y; NUMATA, S; TERAURA, K; MORI, Y; OKUMURA, W; NAKAMURA, T; SAWADA, S; IMANISHI, N. Development of new pavement base course material using high proportion of steelmaking slag properly combined with air-cooled and granulated blast furnace slags. *Nippon Steel Technical Report n°43*, pp. 54-60, October 1989.

NASCIMENTO, J. F. Estudo da Redução da Expansibilidade em Escória de Aciaria para Uso em Pavimentação Rodoviária. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, 76p, Belo Horizonte, 2003.

NATIONAL SLAG ASSOCIATION - NSA, Steel Slag, Estados Unidos - Artigo não assinado, s.d.

OKAMOTO A., FUTAMURA, E., KAWAMURA, K. Hydration behavior of LD slag at autoclave test. In: Transactions ISIJ. Vol 21. p. 16-24, 1981.

PARENTE, E. B; BOAVISTA, A. H; SOARES, J. B. Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas de Solo e Escória de Aciaria para Aplicação na Construção Rodoviária na Região Metropolitana de Fortaleza. Anais do XVII Congresso de pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e ensino em Transportes. pp. 215-222, Rio de Janeiro, 2003.

PENA, D. C. Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria LD curada a vapor para utilização em peças de concreto para pavimentação. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, 152p, Vitória, 2004.

PENNSYLVANIA TESTING METHOD - PTM 130. Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria - Departamento de Transportes da Pensilvânia. 1978.

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.

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

PIZA, B. A. O Revestimento Sobre as Bases de Solo Cimento. Associação Brasileira de Cimento Portland, Curso de Solo Cimento, 1970.

REGAZZI, A. J. Teste para verificar a identidade de modelos de regressão e a igualdade de parâmetros no caso de dados de delineamentos experimentais. Revista Ceres, 46(266), p.383-409, Viçosa, MG, 1999.

ROBINSON, H. L. Low energy, sustainable, materials incorporating blast furnace and basic oxygen steel slag for highway construction and maintenance in the UK. In: 2nd European slag conference - Euroslag. Dusseldorf, 2000.

ROHDE, L. Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos - Estudo Laboratorial. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 101p, Porto Alegre, 2002.

ROHDE, L; NUÑEZ, W. P; CERATTI, J. A. P. Escória de Aciaria Elétrica: uma Alternativa aos Materiais Granulares Tradicionais. Revista Transportes, vol. XI, pp. 13-18, ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e ensino em Transportes, 2003.

SÁNCHEZ-LEAL, F.J., Interpretation of CBR-test results under the shear-strength concept of unsaturated soil mechanics. International Conference on Unsaturated Soils-UNSAT 2002, Recife, Vol. 2, p. 663-668, 2002.

SBRIGHI, C. N.; BATTAGIN, I. L. S. Precauções e limitações do uso de escórias como agregados na construção civil, CPTI, São Paulo, 40p, 2002.

SILVA, M. G. Influência da cura térmica em pastas e argamassas de cimentos de escória. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 232p, São Paulo, 1998.

SILVA, M. G (coordenadora); BICALHO, K. V.; BRAGA, F. S. Avaliação de custo, avaliação ambiental e avaliação da resistência e durabilidade do pavimento construído com escória de aciaria envelhecida (PAVIAMB) - Relatório parcial. Projeto de pesquisa firmado entre CST/FINEP/UFES/FEST, convênio 01.02.0097.00, Vitória, 2005.

SOWERS, G. F. Introductory Soil Mechanics & Foundations: Geotechnical Engineering, 4<sup>a</sup> ed, Collier MacMillan International Edition, 1979.

SOWERS, G. B.; SOWERS, G. F. Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones. 3<sup>a</sup> ed., 1980.

SPIEGEL, M. R. Estatística. Editora McGraw-Hill do Brasil, 580 p., São Paulo, 1974.

STEVENSON, W. J. Estatística aplicada à administração. Editora Harbra, 495 p, São Paulo, 2001.

TURNER-FAIRBANK HIGHWAY RESEARCH - TFHR. Steel Slag - Granular Base. Disponível em <http://www.tfhr.gov/hnr20/recycle/waste/ssa3.htm>. Acessado em março de 2003.

THOMAS G. H. Progress in the utilization of steel slags in the UK. In: 2nd European slag conference - Euroslag. Dusseldorf, 2000.

TOSTICARELLI, J.; ANGELONE, S.; ANDREONI, R. Escoria de acria. Estado actual de estudios sobre su utilização. Memoria técnica de las primeras jornadas técnicas de escorias siderúrgicas. Buenos Aires. 1985.

VANCINI, G. L. Avaliação de metais e não-metals da escória de aciaria de usinas siderúrgicas brasileiras conforme NBR 10004/2004. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, 164 p, Vitória, 2005.

van VERHASSELT, A.; CHOQUET, F. The Dimensional Stability of LD Slags. Translated from the French: La Technique Routiere No.4/198.5, 1985. Translated by R.E. Dawson for the BHP Central Research, Laboratories, 29 p, January 1987.

VARGAS, M. Introdução à Mecânica dos Solos. McGraw-Hill, São Paulo, 1981.

WACHSMUTH, F.; GEISELER, J.; FIX, W.; KOCH, K.; SCHWERDTFEGER, K. Contribution to the structure of BOF slags and its influence on their volume stability. Canadian Metalurgical Quarterly. Duisburg, Vol. 20, nº 3. p. 279 - 284, 1981.

WEAST, R.C. Handbook of chemistry and physics. Cleveland. 1971.

WITTENBORN, J.L.; GREEN, J.J. Steelmaking slag: a safe and valuable product. The Steel Slag Coalition, Washington, 1998.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)