

CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM O USO DE ESCÓRIA DE  
ACIARIA COMO AGREGADO

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
CIVIL.

Aprovada por:

---

Profa. Laura Maria Goretti da Motta, D.Sc.

---

Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D.

---

Prof. Jacques de Medina, L.D.

---

Dra. Leni Figueiredo Mathias Leite, D.Sc.

---

Prof. Salomão Pinto, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2004

CASTELO BRANCO, VERÔNICA TEIXEIRA FRANCO

Caracterização de Misturas Asfálticas Com o Uso  
de Escória de Aciaria como Agregado

[Rio de Janeiro] 2004

XVIII, 135 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,  
Engenharia Civil, 2004)

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
COPPE

1.Misturas asfálticas 2.Escória de aciaria

I. COPPE/UFRJ II. Título (série).

*Aos meus queridos **Caio e Cristiano**, para quem, neste período, não fui suficiente mãe nem esposa, mas por me amarem tanto contribuíram para que eu me tornasse suficientemente mais profissional.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço sinceramente:

- À Deus, em primeiro lugar e acima de qualquer coisa, por ter permitido que eu passasse por este processo engrandecedor e por ter me dado coragem e perseverança para superar todos os “contratempos” encontrados durante esta caminhada chamada “mestrado”;
- À minha família que sempre me apoiou, incentivou e educou para a vida. Em especial a minha querida mãe, Aurilêda Teixeira Franco Cavalcante, meu “espelho” profissional e principalmente pessoal, que mesmo com saudades me encorajou em todos os momentos;
- Ao meu marido, Cristiano Ribeiro Castelo Branco, pelo amor, companheirismo, compreensão e paciência e por ter me dado, neste período, o presente mais perfeito que meus olhos já viram: Caio Teixeira Franco Castelo Branco;
- À minha orientadora, Laura Maria Goretti da Motta, por ter me recebido de braços e coração abertos, por ter permitido que eu compartilhasse da sua sabedoria que me foi tão importante, pela cordialidade e atenção que sempre me deu, pelo carinho com que sempre me tratou, pelas lições de humildade e generosidade que, mesmo sem querer, me ensinou e, principalmente, por ter acreditado que eu era capaz;
- Ao meu co-orientador, Jorge Barbosa Soares, a quem ousou chamar de amigo, por ter mantido as “portas” do LMP sempre abertas para mim, me dado atenção e carinho nos momentos mais difíceis desta caminhada, por ter aumentado infinitamente meu potencial todas as vezes que se referiu a mim em público e me criticado, de forma muito construtiva, em particular e, principalmente, por ter sido o grande responsável pelo meu interesse por pesquisa e vida acadêmica;
- Às famílias Maya e Paulino Cavalcante, por terem me ajudado durante a minha estada no Rio de Janeiro, sempre me recebendo com muito carinho;
- Às amigas Cíntia Cunha e Socorro São Mateus, por terem dividido o mesmo teto e, por vezes, os mesmos problemas durante esta jornada. E por me ensinarem que longe nem sempre quer dizer separado;
- Aos professores Ian Martins e Willy Lacerda por terem contribuído sobremaneira para a minha formação, em especial ao prof. Ian por ter sido sempre muito prestativo me ajudando antes mesmo que eu iniciasse o curso e durante o decorrer do mestrado (às vezes até a distância);

- À turma da COPPE/UFRJ: Adriana Martins, Álvaro Dêlle, Ana Maria (que gentilmente realizou os ensaios na COPPE/UFRJ), Bororó, Fabrício Mourão, Fernando Affonso, Ricardo Gil, Sidclei Magalhães e em especial à amiga Vivianne Pessoa Cardoso Guedes simplesmente por ter deixado que eu me tornasse sua amiga, por nunca ter medido esforços para “quebrar todos os meus galhos de jequitibá” fossem eles quais fossem e por ter dividido comigo as angústias por estar longe de casa;
- À turma do LMP/DET/UFC: Annie Kariny, Conceição Lucena, Daniel Rodrigues Aldigueri, Everton Bezerra Parente, Heberton Souto Moreira, Jorge Magalhães Pinheiro, Thiago Aragão e Thiago Loureiro por terem dividido comigo as preocupações do dia-a-dia, feito sugestões que me ajudaram nas soluções dos problemas encontrados, e pelos momentos de diversão que vivemos, dentro ou fora do laboratório. Em especial à Kamilla Lima Vasconcelos (amiga de todas as horas, principalmente nas mais difíceis), por ter me ajudado tanto profissional quanto pessoalmente, por ter sido a amiga fiel de sempre e por ter me ensinado a encarar a vida de uma forma mais alegre;
- Ao professor Sérgio Armando de Sá e Benevides, que gentilmente me cedeu seus dados para que algumas análises pudessem ser feitas e respondeu a todos os meus questionamentos sobre o assunto;
- Aos laboratoristas Claiton Lopes e Rômulo Jácome pela disposição e “boa vontade” sempre demonstradas para a realização das atividades laboratoriais tão necessárias para a realização deste estudo;
- Ao CNPq pelo apoio financeiro fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa;
- À Gerdau Cearense S.A. e à Sobremetal Recuperação de Metais Ltda. pelo fornecimento da escória utilizada neste estudo, mas acima de tudo por terem me recebido e me ouvido com muito carinho;
- À Lubnor/Petrobras e ao Cenpes/Petrobras, em especial aos engenheiros João Augusto Araújo Paiva e Leni Figueiredo Mathias Leite, pelo fornecimento do CAP, apoio operacional e pelo fiel incentivo e confiança sempre em mim depositados;
- À todos, que direta ou indiretamente, me ajudaram na concretização deste sonho.

Resumo da Tese apresentada a COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM O USO DE ESCÓRIA DE ACIARIA COMO AGREGADO

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

Maio/2004

Orientadores: Laura Maria Goretti da Motta

Jorge Barbosa Soares

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho trata da caracterização de misturas asfálticas com utilização de escória de aciaria como agregado. A escória de aciaria elétrica, proveniente da Gerdau Cearense S.A., foi caracterizada química e fisicamente através dos ensaios exigidos pela norma DNER – EM 262/94 e por outros considerados relevantes pela autora. A expansibilidade da escória foi avaliada através do método PTM 130/78. As misturas asfálticas são do tipo CBUQ com o uso de CAP 50/60, DOPE, escória de aciaria e areia de campo. Estas misturas foram caracterizadas mecanicamente através dos ensaios de resistência à tração estática por compressão diametral, módulo de resiliência, fadiga por compressão diametral a tensão controlada e resistência à tração retida por umidade induzida. Os resultados foram comparados com os obtidos para uma mistura dosada com brita de origem granítica, areia de campo, pó de pedra, filer mineral e o mesmo CAP, porém sem DOPE. A escória de aciaria apresentou possibilidade de uso em revestimentos asfálticos. O aperfeiçoamento da metodologia mostrou-se necessário face à dificuldade encontrada devido à heterogeneidade dos agregados de escória de aciaria. O efeito do DOPE para as misturas avaliadas mostrou-se irrelevante. O condicionamento prévio dos corpos de prova acarretou aumento nos resultados dos ensaios de resistência à tração estática e módulo de resiliência.

Abstract of thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Masters of Science (M.Sc.)

## CHARACTERIZATION OF HOT ASPHALT MIXES USING STEEL SLAG AS AGGREGATE

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

May/2004

Advisors: Laura Maria Goretti da Motta  
Jorge Barbosa Soares

Department: Civil Engineering

This study is about the characterization of hot asphalt mixes using steel slag as aggregate. The electric steel slag, from Gerdau Cearense S.A., had its physical and chemical characteristics determined by the DNER – EM 262/94 test procedure and other tests considered important by the author. The expansive characteristics of the steel slag aggregates were determined by PTM 130/78. The hot asphalt mixes investigated had an asphalt cement 50/60, DOPE, steel slag and field sand. The mixture properties tested included split tensile strength, resilient modulus, fatigue and test moisture induced damage. The testing mixtures are compared with another mix made with natural aggregates and the same asphalt cement, but without DOPE. The steel slag can be used in hot mix asphalt concrete. The mixture design needs to be adapted because the surface texture of the slag is variable (from very dense and solid to vesicular). According to the result of the test moisture induced damage, the use of the DOPE was not significant for the mixtures using steel slag. The mix which was maintained under a temperature of 160°C during two hours before the compaction had the highest value of split tensile strength and the highest value of resilient modulus.

# SUMÁRIO

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| <b>ÍNDICE DE TABELAS</b> ..... | x  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> ..... | xv |

## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| <b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO</b> .....                                 | 01 |
| <b>CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                      | 04 |
| 2.1 - Aço.....   | 04 |
| 2.2 - Escória.....   | 08 |
| 2.3 - Produção da escória de aciaria no Ceará.....                 | 11 |
| 2.4 - Uso da escória de aciaria.....                               | 17 |
| 2.5 - A utilização da escória de aciaria em obras rodoviárias..... | 22 |
| 2.6 - Expansibilidade da escória.....                              | 27 |
| 2.7 - Ocorrência de tufo.....                                      | 33 |
| <b>CAPÍTULO 3 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS</b> .....    | 34 |
| 3.1 - Obtenção da escória de aciaria.....                          | 34 |
| 3.2 - Caracterização da escória de aciaria.....                    | 35 |
| 3.3 - Obtenção e caracterização dos demais agregados.....          | 50 |
| 3.4 - Obtenção e caracterização do CAP.....                        | 52 |
| 3.5 - Obtenção e caracterização do DOPE.....                       | 55 |
| <b>CAPÍTULO 4 DOSAGEM MARSHALL</b> .....                           | 56 |
| 4.1 - Densidade Máxima Teórica (DMT).....                          | 58 |
| 4.2 - Agregados.....   | 67 |
| 4.3 - Teor de Projeto (TP).....                                    | 70 |
| 4.4 - Absorção de ligante.....                                     | 80 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>CAPÍTULO 5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....</b>                                       | <b>84</b>  |
| 5.1 - Resistência à tração estática por compressão diametral (DNER – ME 138/94)..... | 85         |
| 5.2 - Módulo de resiliência (DNER – ME 133/94).....                                  | 92         |
| 5.3 - Fadiga por compressão diametral a tensão controlada.....                       | 101        |
| 5.4 - Resistência à tração retida por umidade induzida (AASHTO T – 283/89)           | 105        |
| 5.5 - Comparação dos resultados..  | 109        |
| <br>   |            |
| <b>CAPÍTULO 6 APLICAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>                                      | <b>113</b> |
| 6.1 - Dados gerais do trecho.....  | 113        |
| 6.2 - Análises utilizando o FEPAVE2.....   | 116        |
| <br>   |            |
| <b>CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>  | <b>122</b> |
| <br>   |            |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>   | <b>125</b> |

## ÍNDICE DE TABELAS

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| Tabela 2.1.1 - | Produção mundial de aço bruto por região, 10 <sup>6</sup> toneladas (IBS, 2001).....   | 04 |
| Tabela 2.1.2 - | Produção de aço bruto por processo de refino, no Brasil (IBS, 2002).....   | 06 |
| Tabela 2.1.3 - | Processos de fabricação do aço (MACHADO, 2000).....  | 07 |
| Tabela 2.1.4 - | Tipos de fornos utilizados pelas siderúrgicas brasileiras (IBS, 2002 <i>apud</i> ROHDE, 2002).....                                   | 08 |
| Tabela 2.2.1 - | Composição da escória produzida pelo processo LD no Brasil (IBS, 1998).....  | 09 |
| Tabela 2.2.2 - | Composições das escórias de aciaria elétrica (PEREIRA, 1994 <i>apud</i> MASUERO <i>et al.</i> , 2000).....                           | 09 |
| Tabela 2.4.1 - | Campo de aplicação das escórias de diferentes origens (BRUN e YUAN, 1994 <i>apud</i> GEYER, 2001).....                               | 19 |
| Tabela 2.4.2 - | Características das escórias de aciaria (NOURELDI e McDANIEL, 1989).....   | 20 |
| Tabela 2.4.3 - | Preços e receitas dos agregados siderúrgicos (IBS, 1998).....  | 21 |
| Tabela 2.4.4 - | Comparação entre valores de insumos, para camada de base (ALVARENGA, 2001).....  | 22 |
| Tabela 2.5.1 - | Proporções de escória utilizadas por SILVA (2003a).....  | 26 |
| Tabela 2.6.1 - | Produtos formados na oxidação e corrosão do ferro (MACHADO, 2000).....   | 29 |
| Tabela 2.6.2 - | Variação de volume dos compostos após a hidratação (WEAST, 1971 <i>apud</i> MACHADO, 2000).....                                      | 29 |
| Tabela 3.2.1 - | Análise química quantitativa da amostra de escória .....   | 37 |
| Tabela 3.2.2 - | Análise química semi-quantitativa da amostra de escória realizada com a utilização do Microscópio de Varredura Eletrônica (MVE)..... | 38 |
| Tabela 3.2.3 - | Ensaio de granulometria, em peso retido e porcentagem passando da escória.....   | 41 |
| Tabela 3.2.4 - | Gradação para o ensaio <i>Los Angeles</i> da norma ME 035 (1998).....  | 42 |
| Tabela 3.2.5 - | Resultado do ensaio de abrasão <i>Los Angeles</i> da escória .....   | 42 |
| Tabela 3.2.6 - | Densidades e absorção da escória de aciaria graúda .....   | 43 |

|                |   |    |
|----------------|---|----|
| Tabela 3.2.7 - | Expansão da escória de aciaria até o 14º dia do ensaio PTM 130/78.....  | 48 |
| Tabela 3.2.8 - | Expansão da escória após o 14º dia do ensaio PTM 130/78.....  | 49 |
| Tabela 3.3.1 - | Densidade real da areia de campo .....  | 51 |
| Tabela 3.4.1 - | Especificações e valores medidos para a amostra de CAP 50/60 Fazenda Alegre (Lubnor/Petrobras) .....  | 53 |
| Tabela 3.4.2 - | Composição química da amostra de CAP 50/60 Fazenda Alegre (Cenpes/Petrobras).....   | 52 |
| Tabela 3.4.3 - | Resultados das análises relativas às especificações Superpave da amostra de CAP 50/60 Fazenda Alegre (Cenpes/Petrobras).  | 53 |
| Tabela 3.4.4 - | Temperatura máxima do pavimento na região de Fortaleza e grau de classificação SHRP do CAP necessário para atender essa condição (SOARES, 2000).....  | 54 |
| Tabela 3.5.1 - | Especificações do CAP-DOP (PETROBRAS, 2003).....  | 55 |
| Tabela 4.1.1 - | Valores de Densidade Máxima Teórica (DMT) e de Densidade Máxima Medida (DMM) das misturas 1, 2 e 3, com 40,0%; 60,0% e 80,0% de escória, respectivamente.....   | 61 |
| Tabela 4.1.2 - | Valores de Densidade Máxima Medida (DMM) para a mistura 6 (40,0% de escória).....   | 62 |
| Tabela 4.1.3 - | Valores de Teor de Projeto (TP) (%) calculados a partir de valores de Densidade Máxima Teórica (DMT) e Densidade Máxima Medida (DMM) para as misturas experimentais.....                                      | 63 |
| Tabela 4.1.4 - | Valores de Densidade Máxima Teórica (para as misturas 1 e 6) e Densidade Máxima Medida (para as misturas 2 e 3) para o Teor de Projeto (TP).....  | 64 |
| Tabela 4.1.5 - | Valores de Densidade Máxima Teórica com obtenção das densidades reais de maneira convencional (DMT) e não-convencional (DMT*) das misturas 1, 2 e 3, com 40,0%; 60,0% e 80,0% de escória respectivamente..... | 66 |
| Tabela 4.2.1 - | Granulometria da mistura comparativa e limites da faixa C do DNER para CBUQ.....  | 68 |
| Tabela 4.2.2 - | Porcentagem de uso dos agregados nas misturas experimentais com escória.....  | 69 |
| Tabela 5.1.1 - | Resultados de Resistência à Tração indireta (RT) para as misturas 1, 2 e 3 (40,0%; 60,0% e 80,0% de escória, respectivamente) e comparativa.....  | 87 |

|                |   |     |
|----------------|---|-----|
| Tabela 5.1.2 - | Resultados de Resistência à Tração indireta (RT) para a mistura 4 (40,0% de escória) e comparativa.....   | 88  |
| Tabela 5.1.3 - | Resultados de Resistência à Tração indireta (RT) para a mistura 5 (60,0% de escória) e comparativa.....   | 88  |
| Tabela 5.1.4 - | Resultados de Resistência à Tração indireta (RT) para a mistura 6 (40,0% de escória), ensaiada na UFC e na COPPE, e comparativa.....  | 90  |
| Tabela 5.2.1 - | Valores de Módulo de Resiliência (MR) para as misturas 1, 2 e 3 (40,0%; 60,0% e 80,0% de escória, respectivamente) e comparativa.....   | 94  |
| Tabela 5.2.2 - | Valores de Módulo de Resiliência (MR) obtidos em corpos de prova em duas posições (0° e 90°) para a mistura 3 (80,0% de escória).....   | 95  |
| Tabela 5.2.3 - | Valores de Módulo de Resiliência (MR) para a mistura 4 (40,0% de escória).....  | 96  |
| Tabela 5.2.4 - | Valores de Módulo de Resiliência (MR) para a mistura 5 (60,0% de escória).....  | 97  |
| Tabela 5.2.5 - | Valores de Teor de Projeto (TP) convencional e acrescido do percentual de ligante absorvido para as misturas experimentais com escória de aciaria.....                            | 99  |
| Tabela 5.2.6 - | Valores de Módulo de Resiliência (MR) para a mistura 6 (40,0% de escória), ensaios realizados na UFC e na UFRJ, e comparativa.....  | 100 |
| Tabela 5.2.7 - | Valores de Módulo de Resiliência (MR) obtidos em um corpo de prova ensaiado em três posições (0°, 90° e 180°) para a mistura 6 (40,0% de escória).....                            | 101 |
| Tabela 5.3.1 - | Constantes (MPa) do ensaio de fadiga para as misturas 2 e 6 (60,0% e 40,0% de escória, respectivamente) e comparativa.....  | 104 |
| Tabela 5.4.1 - | Valores de Resistência à Tração indireta (RT) para a mistura 6 (40,0% de escória) com utilização de DOPE, sem DOPE e mistura comparativa - corpos de prova sem condicionamento... | 108 |
| Tabela 5.4.2 - | Valores de Resistência à Tração indireta (RT) para a mistura 6 (40,0% de escória) com utilização de DOPE, sem DOPE e mistura comparativa - corpos de prova com condicionamento... | 108 |

|                |   |     |
|----------------|---|-----|
| Tabela 5.5.1 - | Resultados dos ensaios mecânicos para as misturas testadas no projeto COPPETEC (1996).....  | 110 |
| Tabela 5.5.2 - | Constantes (MPa) do ensaio de fadiga para as misturas do projeto COPPETEC (1996).....   | 111 |
| Tabela 6.1.1 - | Características físicas de projeto e obtidas em laboratório por BENEVIDES (2000) da camada de revestimento do trecho Pajuçara-Pacatuba.....   | 114 |
| Tabela 6.1.2 - | Características físicas de projeto e obtidas em laboratório por BENEVIDES (2000) da camada de base do trecho Pajuçara - Pacatuba.....   | 114 |
| Tabela 6.1.3 - | Características físicas de projeto e obtidas em laboratório por BENEVIDES (2000) da camada de sub-base do trecho Pajuçara - Pacatuba.....   | 115 |
| Tabela 6.1.4 - | Características físicas de projeto e obtidas em laboratório por BENEVIDES (2000) do material de subleito do trecho Pajuçara - Pacatuba.....   | 115 |
| Tabela 6.1.5 - | Equações do Módulo de Resiliência (MR) e correlações para as camadas granulares do trecho Pajuçara-Pacatuba (BENEVIDES, 2000).....  | 115 |
| Tabela 6.1.6 - | Resistência à Tração (RT), Módulo de Resiliência (MR) e relação MR/RT para as misturas comparativa, 2 (60,0% de escória) e 6 (40,0% de escória), utilizadas como revestimento nas análises deste estudo.....                        | 116 |
| Tabela 6.1.7 - | Constantes (MPa) do ensaio de fadiga a tensão controlada, em função da diferença de tensões, para as misturas comparativa, 2 (60,0% de escória) e 6 (40,0% de escória), utilizadas como revestimento nas análises deste estudo..... | 116 |
| Tabela 6.2.1 - | Parâmetros $K_1$ e $K_2$ para dimensionamento das camadas granulares do trecho Pajuçara-Pacatuba (BENEVIDES, 2000)..  | 117 |
| Tabela 6.2.2 - | Resultados das análises feitas com utilização do FEPAVE2, utilizando a mistura comparativa como revestimento, para o trecho Pajuçara-Pacatuba.....  | 118 |

|                |   |     |
|----------------|---|-----|
| Tabela 6.2.3 - | Resultados das análises feitas com utilização do FEPAVE2, utilizando a mistura 2 (60,0% de escória) como revestimento, para o trecho Pajuçara-Pacatuba.....               | 119 |
| Tabela 6.2.4 - | Resultados das análises feitas com utilização do FEPAVE2, utilizando a mistura 6 (40,0% de escória) como revestimento, para o trecho Pajuçara-Pacatuba.....               | 119 |
| Tabela 6.2.5 - | Resistência à Tração (RT), Módulo de Resiliência (MR) e relação MR/RT para o revestimento (CBUQ original) do trecho Pajuçara Pacatuba, estudado por BENEVIDES (2000)..... | 121 |
| Tabela 6.2.6 - | Resultados das análises feitas com utilização do FEPAVE2, utilizando a mistura original (CBUQ) como revestimento, para o trecho Pajuçara-Pacatuba (BENEVIDES, 2000).....  | 121 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| Figura 2.1.1 - | Regionalização da produção de aço bruto no Brasil (IBS, 2002).....   | 05 |
| Figura 2.3.1 - | Localização do município de Maracanaú, Ce (BOAVISTA, 2003).....  | 12 |
| Figura 2.3.2 - | Fluxo de produção da Gerdau Cearense S.A. (ADERALDO, 2003).....  | 13 |
| Figura 2.3.3 - | Esquema de produção de escória em forno de arco elétrico (GEYER <i>et al.</i> , 1996 <i>apud</i> GEYER, 2001).....                         | 14 |
| Figura 2.3.4 - | Etapas para separação da matéria-prima e fornos utilizados no processo de beneficiamento do aço, Gerdau Cearense S.A.....                  | 15 |
| Figura 2.3.5 - | Escória de aciaria elétrica produzida pela Gerdau Cearense S.A.....  | 16 |
| Figura 2.3.6 - | Etapas do beneficiamento da escória na Sobremetal Recuperação de Metais Ltda.....  | 16 |
| Figura 2.6.1 - | Pavimento com utilização de escória não curada (SILVA, 2002).....  | 28 |
| Figura 2.6.2 - | Exemplo de taxa de expansão do ensaio PTM 130/78.....  | 32 |
| Figura 3.1.1 - | Coleta da escória na Sobremetal Recuperação de Metais Ltda.  | 34 |
| Figura 3.1.2 - | Etapas do armazenamento e homogeneização da escória no LMP/DET/UFC.....  | 35 |
| Figura 3.2.1 - | Fluxograma dos ensaios para caracterização da escória de aciaria.....  | 36 |
| Figura 3.2.2 - | Picos dos elementos existentes na escória obtidos com a utilização do Microscópio de Varredura Eletrônica (MVE) .....                      | 38 |
| Figura 3.2.3 - | Fotos dos grãos da escória, escalas variadas (a) 50 $\mu\text{m}$ , (b) 100 $\mu\text{m}$ e (c) 500 $\mu\text{m}$ .....                    | 38 |
| Figura 3.2.4 - | Exemplo de difratograma da escória utilizada.....  | 39 |
| Figura 3.2.5 - | Granulometrias das amostras de escória.....  | 41 |
| Figura 3.2.6 - | Comparação entre as amostras de escória de aciaria e padrão.   | 44 |
| Figura 3.2.7 - | Tentativas para obtenção da curva de compactação da escória  | 46 |
| Figura 3.2.8 - | Determinação da umidade ótima da escória na energia modificada, com a curva interpolada a partir dos resultados da terceira tentativa..... | 46 |

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| Figura 3.2.9 -  | Etapas para realização do ensaio de expansão da escória pelo método PTM 130/78.....   | 47 |
| Figura 3.2.10 - | Percentuais de expansão diária e acumulada (leitura zero até o 14º dia) da escória no ensaio PTM 130/78.....  | 49 |
| Figura 3.2.11 - | Percentuais de expansão diária e acumulada para a escória em continuação ao observado no ensaio PTM 130/78 (14º ao 30º dia).....  | 50 |
| Figura 3.3.1 -  | Vista da pedra e coleta dos agregados.....  | 51 |
| Figura 3.3.2 -  | Granulometria da areia de campo.....  | 51 |
| Figura 4.1 -    | Metodologia adotada nesta pesquisa.....   | 58 |
| Figura 4.1.1 -  | Equipamento para medição da densidade máxima.....   | 60 |
| Figura 4.1.2 -  | Valores de Densidade Máxima Teórica (DMT) e Densidade Máxima Medida (DMM) das misturas 1, 2 e 3 com 40,0%; 60,0% e 80,0% de escória, respectivamente versus teor de CAP.....  | 61 |
| Figura 4.1.3 -  | Valores de Densidade Máxima Teórica (DMT) e Densidade Máxima Medida (DMM) para a mistura 6 (40,0% de escória) material no estado original (misturado e sem condicionamento) e separado e condicionado versus teor de CAP..... | 63 |
| Figura 4.1.4 -  | Esquema agregado com ligante (VASCONCELOS <i>et al.</i> 2003).  | 65 |
| Figura 4.1.5 -  | Valores de Densidade Máxima Teórica (DMT) e Densidade Máxima Teórica Rice (DMT*) para as misturas 1, 2 e 3 com 40,0%; 60,0% e 80,0% de escória, respectivamente versus teor de CAP.....                                       | 66 |
| Figura 4.1.6 -  | Valores de Densidade Máxima Medida (DMM) e Densidade Máxima Teórica Rice (DMT*) para as misturas 1, 2 e 3 com 40,0%; 60,0% e 80,0% de escória, respectivamente versus teor de CAP.....  | 67 |
| Figura 4.2.1 -  | Proporção dos agregados e fracionamento da escória .....  | 68 |
| Figura 4.2.2 -  | Enquadramento das misturas de agregados (experimentais e comparativa) na faixa C do DNER.....   | 69 |
| Figura 4.2.3 -  | Granulometria Superpave das misturas experimentais e comparativa.....   | 70 |
| Figura 4.3.1 -  | Exemplo de obtenção do Teor de Projeto (TP).....  | 71 |
| Figura 4.3.2 -  | Viscosidade (Poise) da amostra de CAP 50/60 Fazenda Alegre versus temperatura (°C).....   | 72 |

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| Figura 4.3.3 -  | Varição dos parâmetros volumétricos (Vv e RBV) para a mistura comparativa.....  | 72 |
| Figura 4.3.4 -  | Varição dos parâmetros volumétricos (Vv e RBV) para a mistura 2 (60,0% de escória).....   | 74 |
| Figura 4.3.5 -  | Diferenças entre os aspectos da escória utilizada.....  | 74 |
| Figura 4.3.6 -  | Varição dos parâmetros volumétricos (Vv e RBV) para a mistura 1 (40,0% de escória) .....  | 75 |
| Figura 4.3.7 -  | Varição dos parâmetros volumétricos (Vv e RBV) para a mistura 3 (80,0% de escória) .....  | 76 |
| Figura 4.3.8 -  | Varição dos parâmetros volumétricos (Vv e RBV) para a mistura 4 (40,0% de escória) .....  | 77 |
| Figura 4.3.9 -  | Varição dos parâmetros volumétricos (Vv e RBV) para a mistura 5 (60,0% de escória) .....  | 78 |
| Figura 4.3.10 - | Varição dos parâmetros volumétricos (Vv e RBV) para a mistura 6 (40,0% de escória) .....  | 79 |
| Figura 4.3.11 - | Ilustração da separação da escória de aciaria em dois grupos pela aparência dos grãos para compor a mistura 6 (40,0% de escória).....         | 80 |
| Figura 4.4.1 -  | Tomografia computadorizada do grão da escória utilizada neste estudo.....   | 82 |
| Figura 4.4.2 -  | Tomografia computadorizada dos corpos de prova moldados com e sem a utilização de escória de aciaria como agregado....                        | 82 |
| Figura 5.1.1 -  | Esquema do ensaio de Resistência à Tração indireta (RT) e equipamento usado nesta pesquisa.....   | 85 |
| Figura 5.1.2 -  | Valores de Resistência à Tração indireta (RT) para as misturas 1, 2 e 3 (40,0%; 60,0% e 80,0% de escória, respectivamente) e comparativa..... | 87 |
| Figura 5.1.3 -  | Varição dos valores de Resistência à Tração indireta (RT) versus teores de CAP para a mistura 4 (40,0% de escória) .....                      | 89 |
| Figura 5.1.4 -  | Varição dos valores de Resistência à Tração indireta (RT) versus teores de CAP para a mistura 5 (60,0% de escória).....                       | 90 |
| Figura 5.1.5 -  | Valores de Resistência à Tração indireta (RT) para a mistura 6 (40,0% de escória), ensaiada na UFC e na COPPE, e comparativa.....             | 91 |
| Figura 5.2.1 -  | Equipamento para ensaio de Módulo de Resiliência (MR) de misturas asfálticas usado nesta pesquisa.....  | 92 |

|                |  |     |
|----------------|--|-----|
| Figura 5.2.2 - | Valores de Módulo de Resiliência (MR) para as misturas 1, 2 e 3 (40,0%; 60,0% e 80,0% de escória, respectivamente) e comparativa.....  | 94  |
| Figura 5.2.3 - | Varição dos valores de Módulo de Resiliência (MR) para a mistura 4 (40,0% de escória).....   | 96  |
| Figura 5.2.4 - | Varição dos valores de Módulo de Resiliência (MR) para a mistura 5 (60,0% de escória).....   | 97  |
| Figura 5.2.5 - | Esquema interação ligante-agregados para a compensação da heterogeneidade do material.....   | 99  |
| Figura 5.2.6 - | Valores de Módulo de Resiliência (MR) para as misturas comparativa e 6 (40,0% de escória), ensaiada na UFC e na UFRJ.....  | 100 |
| Figura 5.3.1 - | Esquema da diferença de tensões e do equipamento utilizado para o ensaio de vida de fadiga.....  | 103 |
| Figura 5.3.2 - | Vida de fadiga a tensão controlada (25°C) para as misturas 2 e 6 (60,0% e 40,0% de escória, respectivamente) e comparativa.  | 104 |
| Figura 5.4.1 - | Ilustração da falta de recobrimento dos agregados pelo ligante durante a moldagem Marshall dos corpos de prova.....  | 107 |
| Figura 5.4.2 - | Varição do Vv (%) com o número de golpes para a mistura 6 (40,0% de escória) no Teor de Projeto (TP).....  | 107 |
| Figura 5.5.1 - | Vida de fadiga a tensão controlada (25°C) para as misturas comparativa, 2 e 6 (60,0% e 40,0% de escória, respectivamente) e para a mistura 1 do projeto COPPETEC (1996)..... | 112 |
| Figura 6.1.1 - | Localização do trecho utilizado para análise de dimensionamento.....   | 113 |
| Figura 6.1.2 - | Estrutura do trecho Pajuçara-Pacatuba.....   | 114 |

# **CAPÍTULO 1**

---

---

## **1 INTRODUÇÃO**

Diante da escassez de recursos financeiros para aplicação nos mais diversos setores econômicos e da necessidade de proteção ambiental, torna-se viável o uso de técnicas e materiais alternativos. A escória de aciaria, um subproduto da produção do aço, é um rejeito que já vem sendo utilizado de várias formas desde a utilização na construção de quebra-mares até na infra e superestrutura rodoviária.

A escória de aciaria gerada é cerca de 12,0% a 16,0% em massa da produção de aço mundial. No Brasil, cada tonelada de aço produz entre 70 e 170 kg de escória de aciaria e por ano são produzidas mais de 4 milhões de toneladas deste material. No estado do Ceará são produzidas em torno de 10.000 toneladas de aço por mês, resultando em, aproximadamente, 1.500 toneladas de escória de aciaria elétrica produzidas.

O aproveitamento da escória é vantajoso para a indústria siderúrgica que gera este rejeito, e pode ser vantajoso para sua utilização pela indústria de construção civil como alternativa do uso de pedra britada a partir dos afloramentos rochosos. Para a primeira pode agregar-se valor ao rejeito e diminuir os gastos com a ocupação de áreas de deposição e tratamentos impostos pelas regras de proteção ambiental. Para a construção, o preço do material granular pode cair, além do agregado de escória ser tecnicamente competitivo.

A utilização da escória de aciaria, sozinha ou combinada, como agregado em revestimentos asfálticos já vem sendo realizada desde 1970 em vários países, como Estados Unidos, Inglaterra, Japão, Canadá, França, Alemanha, Polônia e Rússia. No Brasil, as cidades de Vitória e Vila Velha, no estado do Espírito Santo, utilizam este rejeito nas camadas de seus pavimentos e em vias não pavimentadas desde 1980 (SILVA, 1994; 2001b).

Como desvantagens do uso da escória de aciaria em projetos de pavimentação estão a heterogeneidade do rejeito (devido à matéria-prima utilizada, ao processo de fabricação do aço, à forma de resfriamento e ao armazenamento deste rejeito), a

porosidade (aumenta o consumo de cimento asfáltico e, conseqüentemente o custo), o alto potencial expansivo deste material e a formação de tufo (precipitação do carbonato de cálcio –  $\text{CaCO}_3$ ) que danifica o sistema de drenagem. A expansão é a maior causadora dos defeitos encontrados nos pavimentos que utilizaram escória de aciaria em suas camadas de revestimento e sub-camadas.

O objetivo geral desta pesquisa é:

- Avaliar o potencial de utilização da escória de aciaria elétrica, proveniente da Gerdau Cearense S.A., como agregado em misturas asfálticas do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ).

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Caracterizar o rejeito escória de aciaria através de ensaios laboratoriais normatizados e por outros considerados relevantes para este estudo;
- Realizar a dosagem Marshall de misturas asfálticas com a utilização de escória de aciaria, em diferentes proporções;
- Caracterizar mecanicamente as misturas experimentais;
- Comparar os parâmetros volumétricos obtidos na dosagem Marshall e os parâmetros mecânicos das misturas com escória de aciaria como agregado, com os parâmetros de uma mistura dosada com agregados pétreos no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) / Departamento de Engenharia de Transportes (DET) / Universidade Federal do Ceará (UFC).

A metodologia escolhida para obtenção destes objetivos foi a caracterização da escória de aciaria química e fisicamente, e a avaliação do seu potencial expansivo, observando-se o tempo de cura mínimo da escória. Os riscos de danos ambientais causados por este resíduo, através dos ensaios de lixiviação e solubilização foram avaliados. As misturas experimentais foram dosadas com diferentes proporções de escória, 40,0%, 60,0% e 80,0%, aproximadamente, e as curvas granulométricas das misturas foram propositadamente coincidadas para que o número de variáveis a avaliar diminuísse. Os parâmetros da dosagem Marshall foram obtidos para as misturas asfálticas experimentais do tipo CBUQ, utilizando Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/60, substância adesivadora comercial DOPE, escória de aciaria, areia de campo e filer mineral. Utilizou-se a faixa C do DNER para CBUQ. As misturas foram avaliadas mecanicamente através dos ensaios de Resistência à Tração estática por compressão diametral (RT), Módulo de Resiliência (MR), fadiga por compressão diametral a tensão controlada e resistência a tração retida por umidade induzida. As misturas com

utilização de escória de aciaria foram comparadas com uma mistura dosada somente com agregados naturais, isto é, brita 3/4" e 3/8" (origem granítica), pó de pedra, areia de campo, fíler mineral e o mesmo CAP.

O presente trabalho está assim organizado:

- O Capítulo 1 é este capítulo de introdução;
- O Capítulo 2 é uma revisão bibliográfica, nacional e internacional, sobre o assunto escória de aciaria. O processo de formação deste rejeito foi apresentado desde a fabricação do aço, geração do rejeito, vantagens e desvantagens do uso deste material em diversos campos de aplicação (em especial na construção rodoviária), estudos já realizados com o uso de escória de aciaria e algumas características deste material. Foi ainda dada ênfase à produção da escória de aciaria no Ceará, visto que este estudo foi desenvolvido neste estado;
- O Capítulo 3 trata da obtenção e caracterização dos materiais utilizados na presente pesquisa, isto é, escória de aciaria, areia de campo, fíler mineral, CAP e DOPE. Os ensaios utilizados para a caracterização, bem como seus resultados, encontram-se também neste capítulo;
- O Capítulo 4 trata da dosagem Marshall das diversas misturas utilizadas neste estudo. Discussões sobre a Densidade Máxima Teórica (DMT), misturas de agregados, Teor de Projeto (TP) e absorção de ligante pelos agregados estão neste capítulo;
- O Capítulo 5 apresenta a caracterização mecânica das misturas asfálticas através dos ensaios: Resistência à Tração estática por compressão diametral (RT), Módulo de Resiliência (MR), fadiga por compressão diametral a tensão controlada e resistência à tração retida por umidade induzida;
- O Capítulo 6 é a análise dos resultados encontrados a partir do dimensionamento de um trecho;
- O Capítulo 7 apresenta as conclusões deste estudo e as recomendações para futuras pesquisas.

## CAPÍTULO 2

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 - AÇO

O aço é uma liga metálica formada de ferro, pequenas quantidades de carbono (até 2,0%) e outros elementos (MAIA, 2002). A produção mundial de aço bruto passou de  $30 \times 10^6$  toneladas em 1901 para  $847 \times 10^6$  no ano de 2000. O desenvolvimento desta produção, a partir de 1995 até 2000, pode ser visualizado na Tabela 2.1.1, bem como a participação (%) de cada região/país no ano de 2000 (IBS, 2001). Atualmente, esta produção já supera  $945 \times 10^6$  toneladas (IBS, 2003).

Tabela 2.1.1 - Produção mundial de aço bruto por região,  $10^6$  toneladas (IBS, 2001)

| Região / Ano     | 1995  | 1996  | 1997  | 1998  | 1999  | 2000  | % (2000) |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| Europa           | 203,1 | 193,5 | 210,5 | 207,4 | 197,7 | 209,5 | 24,8     |
| União Européia   | 155,8 | 146,6 | 159,9 | 159,9 | 155,1 | 163,2 | 19,3     |
| Outros           | 47,3  | 46,9  | 50,6  | 47,5  | 42,6  | 46,3  | 5,5      |
| C.E.I.*          | 79,1  | 77,2  | 81,0  | 74,4  | 86,1  | 98,6  | 11,7     |
| Rússia           | 51,6  | 49,3  | 48,5  | 43,8  | 51,5  | 59,1  | 7,0      |
| Ucrânia          | 22,3  | 22,3  | 25,6  | 24,4  | 27,5  | 31,4  | 3,7      |
| Outros           | 5,2   | 5,6   | 6,9   | 6,2   | 7,1   | 8,1   | 1,0      |
| América do Norte | 109,6 | 110,2 | 114,1 | 114,6 | 113,6 | 118,1 | 14,0     |
| Estados Unidos   | 95,2  | 95,5  | 98,5  | 98,7  | 97,4  | 101,5 | 12,0     |
| Canadá           | 14,4  | 14,7  | 15,6  | 15,9  | 16,2  | 16,6  | 2,0      |
| América Latina   | 47,8  | 50,1  | 52,4  | 51,4  | 51,0  | 56,1  | 6,6      |
| Brasil           | 25,1  | 25,2  | 26,2  | 25,8  | 25,0  | 27,9  | 3,3      |
| Outros           | 22,7  | 24,9  | 26,2  | 25,6  | 26,0  | 28,2  | 3,3      |
| África           | 13,7  | 12,7  | 12,9  | 12,8  | 12,7  | 13,5  | 1,6      |
| África do Sul    | 8,7   | 8,0   | 8,3   | 8,0   | 7,9   | 8,4   | 1,0      |
| Outros           | 5,0   | 4,7   | 4,6   | 4,8   | 4,8   | 5,1   | 0,6      |
| Oriente Médio    | 8,3   | 9,4   | 10,1  | 9,4   | 10,1  | 11,0  | 1,2      |
| Ásia             | 279,6 | 288,0 | 308,6 | 297,8 | 308,3 | 331,4 | 39,1     |
| China            | 95,4  | 101,2 | 108,9 | 114,6 | 124,0 | 127,2 | 15,0     |
| Japão            | 101,6 | 98,8  | 104,5 | 93,5  | 94,2  | 106,4 | 12,6     |
| Outros           | 82,6  | 88,0  | 95,2  | 89,7  | 90,1  | 97,8  | 11,5     |
| Oceania          | 9,3   | 9,2   | 9,5   | 9,7   | 8,9   | 9,2   | 1,0      |
| Total            | 750,5 | 750,3 | 799,1 | 777,5 | 788,4 | 847,4 | 100,0    |

\*Comunidade dos Estados Independentes

O Brasil está entre os dez maiores produtores de aço bruto do mundo, com 3,7% da produção mundial no ano de 2003 (dados coletados até outubro). É, também, o maior produtor da América Latina sendo sua produção 52,5% do total neste mesmo ano. Em relação ao ano de 2002, a produção do aço aumentou em 6,0%, passando de 24,4 para 25,9×10<sup>6</sup> toneladas (IBS, 2003).

O estado do Ceará produz cerca de 0,3% da produção brasileira de aço bruto. O maior produtor de aço bruto do Brasil é o estado de Minas Gerais com aproximadamente 41,0% da produção do país. A regionalização da produção de aço bruto pode ser visualizada na Figura 2.1.1 (IBS, 2002).

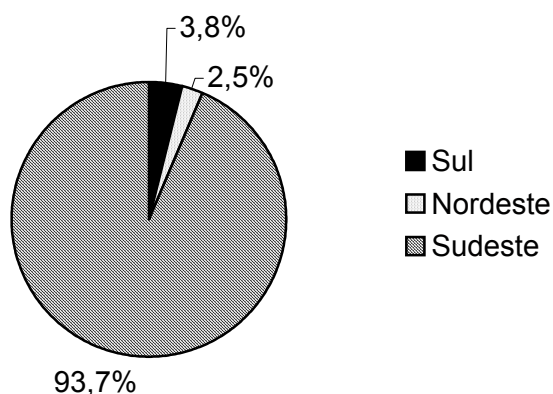


Figura 2.1.1 - Regionalização da produção de aço bruto no Brasil (IBS, 2002)

A siderurgia é dividida em dois grandes ramos: a íntegra (que possui como principais matérias-primas, ferro e carvão) e a elétrica (que possui como principal matéria-prima, sucata ferrosa). A segunda é mais atuante por possuir uma matéria-prima de menor custo, mais disponível e, ainda, ser reciclável. A utilização da sucata é ainda superior porque esta apresenta melhores características mecânicas se comparada com as outras matérias-primas utilizadas no processo de produção do aço. Isto ocorre devido à maior porcentagem de elementos químicos, tais como: cobre, níquel, cromo e estanho nas sucatas que ficam presentes nas escórias (MAIA, 2002; BELGO, 2003).

São ainda utilizadas outras matérias-primas no processo: ferro gusa, obtido através da redução do minério de ferro por adição de cálcio, ferro, silício, manganês e enxofre ao processo, ferroligas (ajustam as composições químicas do aço e lhe conferem as características mecânicas desejadas), cal (retém as impurezas do metal, forma a

escória e protege o forno contra os ataques químicos) e oxigênio (diminui o teor de carbono e o tempo de fusão).

Existem três grandes processos de fabricação do aço, divididos pelo processo de refino: *LD* (*Linz-Donawitz*) ou *BOF* (*Blast Oxygen Furnace*) que utiliza o conversor a oxigênio, elétrico ou *EAF* (*Electric Arc Furnace*) que utiliza o forno de arco elétrico e *OH* (*Open Heart*) que utiliza o forno *Siemens-Martin*. No Brasil, são responsáveis por cerca de 77,9%; 20,2% e 1,9% da produção de aço e conseqüentemente de escória, respectivamente. A Tabela 2.1.2 mostra a produção do aço bruto no Brasil por processo de refino (MACHADO, 2000; IBS, 2002).

Tabela 2.1.2 - Produção de aço bruto por processo de refino, no Brasil (IBS, 2002)

| Processo de Aciaria          | 10 <sup>6</sup> toneladas | Forno de Refino              |
|------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Oxigênio ( <i>LD / BOF</i> ) | 20,8                      | Conversor a Oxigênio         |
| Elétrico ( <i>EAF</i> )      | 5,4                       | Forno de Arco Elétrico       |
| OH                           | 0,5                       | Forno <i>Siemens-Martins</i> |

No processo *LD* não há necessidade de fonte de calor externa. Mistura-se ferro gusa líquido, sucatas ferrosas, escorificantes (cal e fluidificante) e oxigênio na cuba. O aço é fabricado através das seguintes operações: carregamento do conversor, sopragem, observação do banho (temperatura e composição química), ressopragem e formação do aço líquido e da escória. A última parte do processo é o lingotamento contínuo onde o aço líquido é transformado em barras.

No *EAF* existe a necessidade de utilização de uma fonte de calor externa. As matérias-primas são colocadas em cestões em quantidades pré-determinadas (a depender das características do aço que se deseja obter) e, posteriormente, são colocadas em uma abóboda (espécie de tampa do forno) fechada. O forno é então ligado e os materiais fundidos. Este processo pode ser assim dividido:

- Carregamento do forno: adiciona-se carga metálica e escorificante (cal), se necessário;
- Afinação oxidante: através da injeção de oxigênio consegue-se eliminar elementos como carbono e fósforo;
- Afinação redutora: redução do teor de oxigênio e enxofre;
- Ajustamento da composição química: realizada através de adições;
- Formação da escória.

Finalizando, as barras de aço são desbastadas, preparadas e acabadas. O material final ainda passa por um rigoroso controle de qualidade. A produção do aço segue as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 7480/1996, barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado. A referida norma determina propriedades como massa linear, dobramento, nervuras e entalhes, para aços do tipo CA 25, CA 50 e CA 60. Os processos de fabricação do aço são detalhados na Tabela 2.1.3.

Tabela 2.1.3 - Processos de fabricação do aço (MACHADO, 2000)

| Processos                | <i>OH</i>  | <i>LD ou BOF</i>   | <i>EAF</i>  |
|--------------------------|--|--|---|
| Forno de Refino          | <i>Siemens-Martin</i>  | Conversor a oxigênio   | Forno de arco elétrico  |
| Produtividade            | 300 ton/5 a 14 hs*   | 250 ton/30 a 60 min  | **  |
| Detalhamento do Processo | Adição de sucata metálica, calcário e minério de ferro, injeção de oxigênio para provocar a fusão e a agitação do banho metálico | Adição de sucata e gusa líquido (1300 a 1450°C), injeção de oxigênio gasoso em alta velocidade. Após a fusão, adiciona-se cal virgem | Fusão da sucata de aço, gerada por um arco elétrico, formado entre o aço e os eletrodos de grafite ou carvão amorfo. Após a fusão, injeta-se oxigênio |
| Escórias Geradas         | Oxidantes  | Oxidantes  | Oxidantes e Redutoras   |
| Objetivo                 | Remoção de fósforo através da adição de CaO na fase de refino  | Redução dos teores de carbono do ferro gusa (de 4,0% para 0,1%), silício, enxofre e fósforo  | Oxidação de carbono, silício e fósforo; desulfuração do aço líquido e adição de elementos de liga   |

\*Em desuso no Brasil

\*\*Produção variável, cerca de 100 a 150 kg de escória por tonelada de aço líquido

Os tipos de fornos utilizados pelas siderúrgicas brasileiras podem ser vistos na Tabela 2.1.4 (IBS, 2002\* *apud* ROHDE, 2002). Grande parte da literatura publicada sobre a utilização de escórias de aciaria não faz distinção entre os fornos utilizados para produção das mesmas.

\*IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia. Contato Pessoal de Rohde. 2002. Brasil.

Tabela 2.1.4 - Tipos de fornos utilizados pelas siderúrgicas brasileiras (IBS, 2002 *apud* ROHDE, 2002)

| Empresa   | Localização       | Tipo de Forno |        |     |
|---|-------------------|---------------|--------|-----|
|   |                   | OH            | LD/BOF | EAF |
| Acesita S.A.  | MG                |               | X      | X   |
| Aço Minas Gerais S.A. (AÇOMINAS)                    | MG/SP             |               | X      |     |
| Aços Villares S.A.                                  | SP                |               |        | X   |
| Cia. Siderúrgica Belgo Mineira                      | MG/SP/ES          |               | X      | X   |
| Cia. Siderúrgica Nacional (CSN)                     | RJ                |               | X      |     |
| Cia. Siderúrgica Paulista (COSIPA)                  | SP                |               | X      |     |
| Cia. Siderúrgica Tubarão (CST)                      | ES                |               | X      |     |
| Gerdau S.A.   | MG/PE/RS/PR/CE/BA | X             | X      | X   |
| Siderúrgica Barra Mansa S.A.                        | RJ                |               |        | X   |
| Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A. (USIMINAS) | MG                |               | X      |     |
| Vallourec & Mannesman Tubes - V & M do Brasil S.A.  | MG                |               | X      |     |
| Villares Metais S.A.                                | SP                |               |        | X   |

## 2.2 - ESCÓRIA

Os rejeitos siderúrgicos são oriundos do processo industrial para beneficiamento do aço. Dentre outros, é possível citar como rejeito da indústria do aço: escória de alto-forno, pó de alto forno, lama de alto-forno, escória de dessulfuração, escória de aciaria LD, lama grossa de aciaria, lama fina de aciaria e carepa (GEYER, 2001). As escórias são os resíduos de maior geração (mais de 60,0% da geração de resíduos) neste tipo de processo. Existem dois tipos de escórias siderúrgicas produzidos em larga escala:

- Alto-forno: resultante da fusão redutora dos minérios para obtenção do ferro gusa (obtido diretamente do alto forno, em geral com elevado teor de carbono e várias impurezas), obtidas em conversores;
- Aciaria: resultante da produção do aço. São obtidas em fornos elétricos e conversores a oxigênio, durante a conversão de sucata em aço. Estas escórias podem ser tanto oxidantes (produzida pela injeção de oxigênio no aço fundido para oxidar carbono, silício e enxofre) quanto redutoras (gerada após o vazamento da escória oxidada através da adição de óxido de cálcio - CaO e de fluorita- CaF<sub>2</sub>. Estes dois compostos são injetados no processo para dessulfurar o aço líquido e adicionar elementos de liga) (MACHADO, 2000).

Durante o processo de produção do aço são eliminados carbono, CaO e os íons de alumínio, silício e fósforo que tornam o aço frágil, quebradiço e difícil de ser transformado em barras (ZIEMKIEWIC, 1998). Todos estes elementos e compostos eliminados entram na composição da escória. Dentre as impurezas do processo que formarão a escória estão silicatos de cálcio ( $\text{CaSiO}_3$ ), óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), ferrita cálcica ( $\text{CaFe}_2\text{O}_4$ ), óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) e outros. Os altos teores de CaO e MgO livres, presentes nas escórias, são devidos ao fato de que, depois que o fósforo e o silício se oxidam, estes elementos precipitam porque ultrapassam os limites de solubilidade da escória fundida (JOHN, 2003). As composições típicas de algumas escórias de aciaria elétrica produzidas no Brasil e no mundo podem ser vistas nas Tabelas 2.2.1 e 2.2.2.

Tabela 2.2.1 - Composição da escória produzida pelo processo LD no Brasil (IBS, 1998)

| Composto       | CaO    | MgO   | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | FeO    | MnO   |
|----------------|--------|-------|----------------|-------------------------|--------|-------|
| Quantidade (%) | 6 - 45 | 1 - 9 | 7 - 16         | 1 - 4                   | 8 - 30 | 3 - 7 |

Tabela 2.2.2 - Composições das escórias de aciaria elétrica (PEREIRA, 1994\* *apud* MASUERO *et al.*, 2000)

| País     | Geração<br>kg/ton | CaO<br>(%) | MgO<br>(%) | $\text{SiO}_2$<br>(%) | $\text{Al}_2\text{O}_3$<br>(%) | FeO<br>(%) | MnO<br>(%) | $\text{P}_2\text{O}_5$<br>(%) | S<br>(%) |
|----------|-------------------|------------|------------|-----------------------|--------------------------------|------------|------------|-------------------------------|----------|
| Brasil   | 150               | 33         | 10         | 18                    | 6                              | 30         | 5          | 0,9                           | 0,1      |
| Japão    | 127               | 40         | 4          | 25                    | 5                              | 19         | 7          | -                             | 0,06     |
| Suécia   | 100               | 46         | 5          | 11                    | 5                              | 28         | 4          | 0,7                           | -        |
| EUA      | 160               | 41         | 10         | 17                    | 8                              | 18         | 4          | 0,6                           | 0,2      |
| Alemanha | 120               | 32         | 10         | 15                    | 4                              | 31         | 4          | 1,4                           | 0,1      |
| Itália   | 120               | 41         | 8          | 14                    | 7                              | 20         | 6          | 0,9                           | 0,1      |

As escórias de aciaria, tanto de alto forno quanto elétrica (NBR 5019/82), depois de beneficiadas tornam-se agregados siderúrgicos. Estes agregados são definidos como material não metálico e podem ser classificados como agregado bruto, graduado de alto forno (oriundo da escória de alto forno) ou como agregado graduado de aciaria (oriundo da escória de aciaria elétrica) (IBS, 1998).

\*Pereira, E.A.C. Aspectos Técnicos de Gestão de Resíduos nas Siderúrgicas Integradas a Coque. In: 25º Seminário de Redução, Matérias-Primas e Resíduos na Siderurgia. Volta Redonda, RJ, p. 187-199, 1994.

Em 2000, cerca de  $85 \times 10^6$  toneladas de escória foram geradas no mundo. No Brasil, em 1998, foram produzidas mais de  $4 \times 10^6$  toneladas deste rejeito (MACHADO, 2000; FILEV, 2003). Em média, cada tonelada de aço gera 150 kg de escória (SILVA e MENDONÇA, 2001a; COSIPA, 2003). A parte metálica da escória de aciaria (20,0%) é removida com um imã e recirculada no processo, enquanto que 80,0% ficam sem utilidade e são armazenados em grandes áreas e vendidos como rejeito ([www.inventabrasil.hpg.ig.com.br](http://www.inventabrasil.hpg.ig.com.br), 11/06/2003).

Tanto a produção quanto a composição da escória dependem de alguns fatores, dentre eles: o processo ou tipo de forno utilizado no beneficiamento do aço, o tipo de matéria-prima utilizada, a especificação do aço produzido, o resfriamento do rejeito, etc. Este material sai do forno com uma temperatura, aproximada, de  $1500^\circ\text{C}$ . O tipo de resfriamento deste rejeito afeta também a granulometria deste material, porque é neste momento que ocorre a maior parte das reações químicas (LIMA *et al.*, 2000). Escórias que são resfriadas ao ar são, geralmente, inertes devido à cristalização de seus óxidos. Escórias resfriadas rapidamente (ar ou vapor) possuem natureza expandida e tornam-se leves. Escórias resfriadas bruscamente (jato d'água) são vítreas, com granulometria semelhante a areia de rio, estrutura porosa e textura áspera. As escórias ácidas costumam ser mais densas, enquanto que as básicas são mais porosas (com estrutura vesicular) (GEYER, 2001). A composição química de uma determinada escória pode variar, para um mesmo dia de produção, de 30,0% a 60,0% para o CaO, de 0,0% a 35,0% para o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e de 15,0% a 30,0% para o  $\text{SiO}_2$  (MACHADO, 2000).

Segundo o DNER (1994j), a escória para uso em pavimentação deve obedecer aos seguintes limites:

- Máximo de 3,0% de expansão;
- Isentas de impurezas orgânicas, contaminação com escórias de alto forno, solos e outros materiais;
- Granulometria: 40,0% até 12,7 mm e 60,0% entre 12,7 e 50,8 mm de abertura nominal e atender a granulometria de projeto;
- Absorção de água: 1,0% a 2,0% em peso;
- Massa específica: 3,0 a  $3,5 \text{ g/cm}^3$ ;
- Massa unitária: 1,5 a  $1,7 \text{ kg/dm}^3$ ;
- Desgaste por abrasão *Los Angeles*: no máximo igual a 25,0% para sub-base, base e revestimento;

- Durabilidade ao sulfato de sódio: 0,0% a 5,0%, em 5 ciclos.

Vale salientar que, a citada norma do DNER para uso de escória de aciaria em pavimentos rodoviários não especifica o tipo de processo de refino utilizado na fabricação do aço que será responsável pela geração da escória. A norma EB – 2103 (1994) da ABNT, materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente, especifica que para utilização em sub-base e base de pavimentos a expansão da escória, utilizando o método PTM 130/78, deve ser no máximo igual a 1,0% e 0,5%, respectivamente (MACHADO, 2000).

Outros países já especificaram o uso da escória para construção rodoviária. A França, por exemplo, especificou o que chamam de *grave-laitier* que consiste na mistura deste rejeito com agregados comuns ou com cal hidratada ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), que também é chamada de hidróxido de cálcio, para ser utilizada em construções de base ou sub-base de pavimentos. Cerca de 65,0% das rodovias francesas utilizam este material. A África do Sul utiliza mistura de escória com cal (na proporção de 4:1) em seus pavimentos (SHERWOOD, 1995\* *apud* ROHDE, 2002).

### **2.3 - PRODUÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA NO CEARÁ**

No Ceará são produzidas em torno de 120.000 toneladas de aço por ano, resulta deste total, 15,0% em massa de escória de aciaria. A produção cearense pode ser considerada pequena se comparada com a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), cuja produção atinge o valor de 85.000 toneladas por mês (ALVARENGA, 2001). A Gerdau Cearense S.A. foi fundada em 1982 e é a única siderúrgica do Estado. Localizada no município de Maracanaú, distante 30 km da capital Fortaleza (Figura 2.3.1), utiliza o processo *EAF* em seu refino. O fluxo de produção da empresa é mostrado na Figura 2.3.2 e um esquema do processo utilizado está mostrado na Figura 2.3.3.

---

\*Sherwood, P.T. *Alternative Materials in Road Construction*. London: Thomas Telford, 124p., 1995.

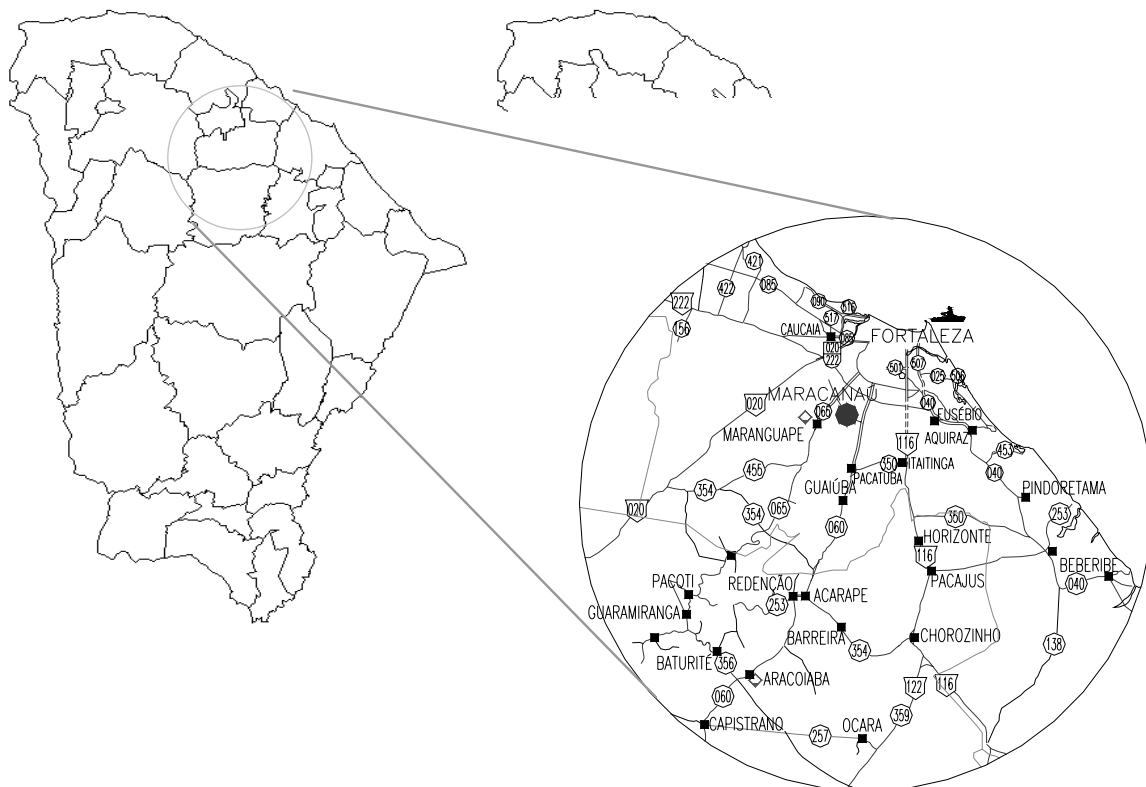


Figura 2.3.1 - Localização do município de Maracanaú, Ce (BOAVISTA, 2003)

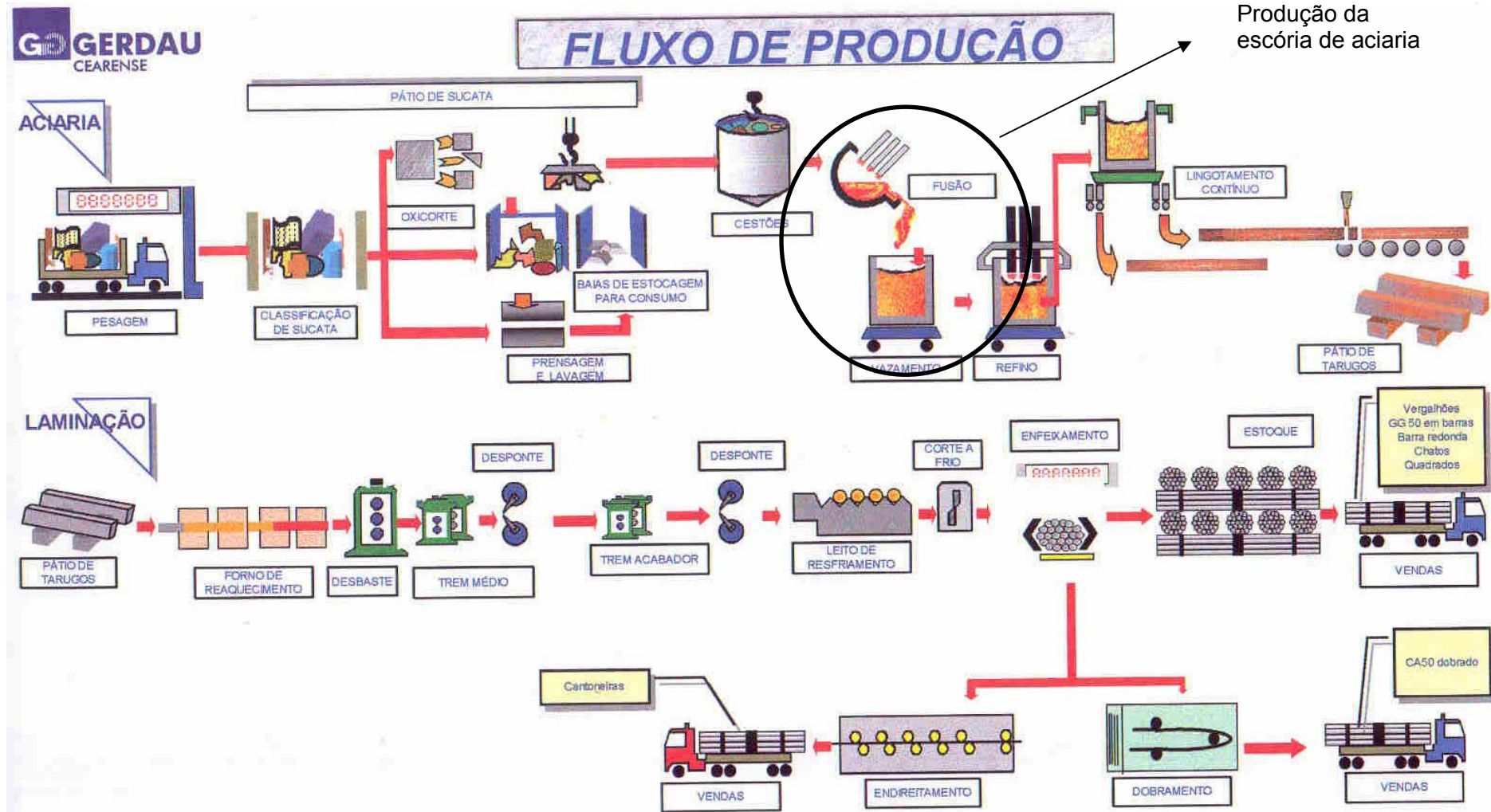


Figura 2.3.2 - Fluxo de produção da Gerdau Cearense S.A. (ADERALDO, 2003)

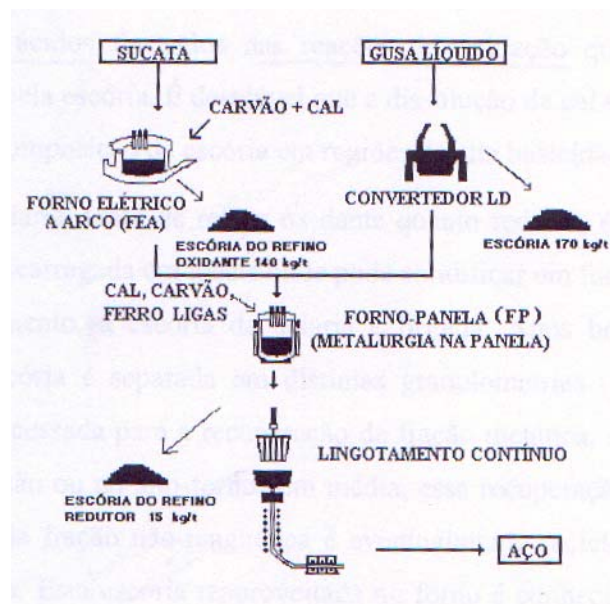


Figura 2.3.3 - Esquema de produção de escória em forno de arco elétrico (GEYER *et al.*, 1996\* *apud* GEYER, 2001)

A Gerdau Cearense S.A. utiliza como matéria-prima a sucata ferrosa e o ferro gusa, aproximadamente 90,0% e 10,0% de cada, respectivamente. A sucata é colocada em um pátio onde a mesma é separada e prensada (para o caso da sucata leve) ou cortada (para o caso da sucata pesada), com o intuito de reduzir o volume. Posteriormente este material é colocado em cestões com capacidade para dez toneladas e conduzido para os fornos através de pontes rolantes. A matéria-prima é então fundida em dois fornos. No primeiro, forno elétrico, são feitas adições de grafite, carbono e oxigênio e é gerada a escória de refino oxidante. Neste forno são gerados em torno de 80,0% da escória produzida. No segundo, forno panela, são feitas adições de ligas ferro-silício, ferro-manganês e cal (com a finalidade de absorver e neutralizar os óxidos ácidos que seriam responsáveis por ataques ao forno) e é gerada a escória de refino redutor. Estas adições são também feitas para ajustar a composição química do aço. As etapas para separação da matéria-prima, bem como os fornos da Gerdau Cearense S.A. estão na Figura 2.3.4.

\*Geyer, R. M. T.; Dal Molin, D.; Vilela, A.C. Possibilidades e fatores limitantes da reutilização de escórias de aciaria na construção civil. In: Congresso Anual da ABM, 51. Porto Alegre, RS. 1996, p.5-9.



(a) Pilha de matéria-prima (sucata)



(b) Pátio de separação da matéria-prima



(c) Forno de arco elétrico



(d) Forno panela

Figura 2.3.4 - Fornos utilizados no processo de beneficiamento do aço, Gerdau Cearense S.A.

A escória é transportada posteriormente para a empresa que comercializa este resíduo, Sobremetal Recuperação de Metais Ltda., também localizada no estado do Ceará. Após o resfriamento que transforma a escória líquida em sólida com cor acinzentada e forma cúbica (ALVARENGA, 2001), a mesma é transportada por esteiras e passada através de um eletro-ímã. Cerca de 20,0% da escória de aciaria é metálica e, depois de separada, é recirculada no processo (chamada de sucata “C” ou recuperada). O aspecto da escória produzida pode ser visualizado na Figura 2.3.5.



Figura 2.3.5 - Escória de aciaria elétrica produzida pela Gerdau Cearense S.A.

O material é britado e por meio de correias rolantes e separado nas graduações de 1", 3" e 8". A escória é estocada pela empresa em pilhas a céu aberto, o que provoca uma pré-expansão da mesma. Porém, o rejeito é estocado sem controle de idade e/ou de tipo, o que é um entrave à sua comercialização. As etapas para o beneficiamento deste rejeito na indústria que comercializa o mesmo podem ser visualizadas na Figura 2.3.6.



(a) Britagem da escória



(b) Pilha de escória armazenada

Figura 2.3.6 - Etapas do beneficiamento da escória na Sobremetal Recuperação de Metais Ltda.

Atualmente, a Sobremetal Recuperação de Metais Ltda. vende a maior parte deste rejeito para ser utilizado em aterros na capital Fortaleza. Porém, a Prefeitura Municipal de Maracanaú já utiliza este material em rodovias primárias com o intuito de facilitar o tráfego e diminuir a formação de poeira (ADERALDO, 2003).

A Gerdau Cearense S.A. realiza, a cada seis meses, no estado de São Paulo a avaliação do potencial contaminante deste rejeito. Este material é classificado como Classe – II (NBR 10004), isto é, não inerte, merecendo, porém acondicionamento

especial para evitar o contato com o solo e sua posterior contaminação. Este procedimento não é adotado pela citada siderúrgica.

## 2.4 - USO DA ESCÓRIA DE ACIARIA

Na Europa em 1982 foram produzidas, aproximadamente,  $9 \times 10^6$  toneladas de escória, o que alertou para o fato de que este material deveria ser reutilizado para muitos outros fins, além de matéria-prima para a indústria de fertilizantes (MACHADO, 2000). No Brasil, a maior parte da escória de aciaria é LD e elétrica. Cerca de 56,0% e 65,0% destas escórias, respectivamente, são estocados enquanto o restante é utilizado na construção de bases e sub-bases de rodovias ou em lastros ferroviários (IBS, 1998). Porém as escórias podem ser utilizadas em diversos fins, como:

- Matéria-prima na indústria de vidro e vitro-cerâmica, principalmente, as escórias de alto forno, após tratamento térmico, são utilizadas para este fim como substituto ao feldspato devido ao seu alto teor de sílica e óxidos metálicos;
- Produção de fertilizantes agrícolas termofosfatados, ou aditivo no cultivo de plantas e algas devido à composição química da escória (devido aos seus elevados teores de CaO e pentóxido de fósforo -  $P_2O_5$ ). Esta aplicação, a partir de 1982 na Europa, passou a ser controlada por causa do alto teor de fósforo e de metais pesados (chumbo, por exemplo) presentes nas escórias evitando, assim, a toxicidade;
- Estabilização de solos, por apresentar maior rugosidade superficial, excelente índice de forma, maior angulosidade, maior resistência ao desgaste e aumento da resistência dos solos (MACHADO, 2000). Esta utilização é limitada pelo alto potencial expansivo deste rejeito;
- Matéria-prima para produção de cimento, devido à presença dos silicatos dicálcico e tricálcico ( $2CaO-SiO_2$  e  $3CaO-SiO_2$ ) que tornam o material com composição química muito parecida com o clínquer formado na produção do cimento Portland. Além disso, a substituição parcial do calcário por escória traz vantagens como: diminuição do calor para formação do clínquer e da formação de gases poluentes (como o gás carbônico -  $CO_2$ ). Para este uso, a escória precisa ser reajustada quimicamente. GEYER (2001) classificou como viável a utilização de 10,0% da escória de refino redutor como adição ao cimento para produção de concreto;

- Nas próprias siderúrgicas, tanto como material reciclado, que é novamente incorporado ao processo como fundente, quanto como protetor do revestimento refratário dos fornos (substituindo a cal e o calcáreo) (ROHDE, 2002);
- Agregado na produção de concreto, por possuir alta resistência à compressão e durabilidade à abrasão. É necessário atentar, porém, para o alto potencial de desintegração que este rejeito possui. MASUERO *et al.* (2000) avaliaram a adição de 20,0% de escória de aciaria elétrica em concreto. Como resultados obtiveram que as propriedades mecânicas (resistência à compressão e resistência à tração na flexão) avaliadas foram superiores para o concreto com adição deste rejeito em relação ao concreto sem adição. Além disto, houve redução do consumo de cimento para o concreto produzido com escória;
- Construção de lastros no leito de ferrovias, por possuir alta massa específica. É necessário garantir a baixa condutividade deste rejeito, quando for utilizado para este fim, para garantir a não formação de fagulhas no caso de transporte de cargas inflamáveis;
- Controle na drenagem de ácidos. A escória de aciaria tem altas taxas de alcalinidade capazes de neutralizar ácidos. Estas taxas podem ser mantidas durante anos a céu aberto, porque a mesma não absorve o CO<sub>2</sub> do ar e re-converte em calcita insolúvel. O pH deste material é próximo de 10 devido à grande presença de CaO, MgO e SiO<sub>2</sub>. Por apresentar, em sua maioria, aspecto poroso, possui alta permeabilidade permitindo a passagem d'água, o que facilita a drenagem dos ácidos;
- Utilização na infra e superestruturas rodoviárias, bem como em forma de cascalho em vias não pavimentadas para evitar a formação de poeira. Este material tanto pode ser utilizado em base e sub-base de pavimentos quanto como agregado na confecção de misturas asfálticas. A escória é mais utilizada em camadas inferiores do que como agregado em revestimentos;
- Outros fins, tais como: execução de aterros, construção de peças de quebra-mar, contenção sendo utilizada na fabricação de gabiões, etc.

BRUN e YUAN (1994)\* *apud* GEYER (2001) mostram as diferentes origens das escórias aplicadas em vários campos. A procedência deste rejeito, em relação ao campo de aplicação da mesma, pode ser visualizada na Tabela 2.4.1. O tipo de resfriamento da escória também interfere no seu potencial de utilização. Escórias

---

\*Brun, D.W. e Yuan, W.C. Caracterização e aproveitamento dos resíduos siderúrgicos principais gerados pela aciaria elétrica. Porto Alegre: PPGEMM/UFGRS, 1994, 34p. (Seminário da disciplina MTMD99 – Tópicos especiais – Resíduos industriais siderúrgicos: caracterização e aproveitamento).

resfriadas ao ar são utilizadas, principalmente, como agregados para construção de estradas e em lastros de ferrovias. Já as escórias resfriadas bruscamente (granuladas) são potencialmente utilizadas como agregado em concreto, aterro, fabricação de tijolos, adições em concreto de cimento Portland, vidros, granito sintético, concreto leve e matéria-prima para produção do cimento (GEYER, 2001).

Tabela 2.4.1 - Campo de aplicação das escórias de diferentes origens (BRUN e YUAN, 1994 *apud* GEYER, 2001)

| Campo de Aplicação | Procedência da Escória |            |            |
|--------------------|------------------------|------------|------------|
|                    | Aciação                | Alto-forno | Ferro-liga |
| Ferroviário        | X                      |            |            |
| Rodoviário         | X                      | X          | X          |
| Construção Civil   | X                      | X          | X          |
| Agricultura        | X                      | X          | X          |
| Fábrica de Cimento | X                      | X          |            |
| Metalúrgico        | X                      | X          |            |

A utilização da escória de aciaria pode trazer benefícios:

- Ambientais: diminui-se o problema da deposição deste rejeito que necessita de grandes áreas para descarte e ao mesmo tempo diminui-se a degradação ambiental provocada pela extração de agregados pétreos. A legislação ambiental exige a disposição em *contêiners* de concreto para evitar a contaminação do solo e a emissão de poeira (JOHN, 2003). A avaliação através dos processos de lixiviação (NBR 10005/ABNT, 1987) e solubilização (NBR 10006/ABNT, 1987) se faz necessária. Estudos realizados nos Estados Unidos verificaram que não há escoamento de nenhum metal pesado (UFPR, 2003). Porém, ROHDE (2002) classificou a escória de aciaria elétrica utilizada em seu estudo como resíduo de classe II (não inerte), capaz de causar danos ao meio ambiente e à saúde pública. A partir da análise do extrato solubilizado, a citada autora verificou concentrações de cádmio, chumbo, cromo e carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) superiores ao especificado pela norma, além de uma dureza acima do estabelecido pela NBR 10004/ABNT 1987 (resíduos sólidos). A escória utilizada neste estudo também é classificada como classe II (ADERALDO, 2003);
- Técnicos: apresenta várias possibilidades de uso e vantagens em relação aos materiais que pode substituir. Os grãos da escória, devido a sua forma e textura, apresentam maior resistência à derrapagem e ao desgaste superficial. Além de serem 100,0% trituráveis, apresentam melhor trabalhabilidade e compacidade se

comparados com grãos de outros agregados (MACHADO, 2000). Apresenta boa adesividade para emulsões e Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP), se comparada com agregados pétreos (SILVA, 1991). Possui alto coeficiente de atrito (0,58; 0,53 e 0,48 para revestimentos executados com escória de aciaria, com brita e com concreto de cimento Portland; respectivamente), o que confere ao pavimento qualidades anti-derrapantes (CARNEIRO, 1993\* *apud* MACHADO, 2000). Desde que britada, atende às várias faixas granulométricas existentes, possui alto Índice de Suporte Califórnia (ISC), baixa abrasão *Los Angeles*, alto poder hidráulico por possuir estrutura vesicular, comparativamente com a brita apresenta maior peso próprio e menor equivalente de areia, comportamento tensão-deformação pouco dependente da umidade e da energia de compactação (SILVA, 1994; KHAN e WAHHAB, 1998; ALVARENGA, 2001). Apresenta hidraulicidade, quando em contato com a água há reação com os CaO e SiO<sub>2</sub> formando hidratos. Em atmosferas alcalinas, ocorre a formação de hidratos com o óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que aumenta significativamente a dureza do rejeito. Este fato faz com que o pavimento, que utiliza escória como agregado, tenha um comportamento estrutural semi-rígido ou rígido (LIMA *et al.*, 2000). As características típicas de escórias de aciaria são apresentadas na Tabela 2.4.2;

Tabela 2.4.2 - Características das escórias de aciaria (NOURELDIN e McDANIEL, 1989)

| Característica                       | Valor               |
|--------------------------------------|---------------------|
| Densidade Aparente                   | 3,2 – 3,6           |
| Porosidade (%)                       | > 3                 |
| Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)       | 20 – 25             |
| Durabilidade ao sulfato de sódio (%) | < 12                |
| Dureza                               | 6 – 7               |
| ISC (%)                              | > 300               |
| Polaridade                           | Alcalina (pH 8 –10) |
| Teor de ligante (%), misturas densas | > 6,5               |

- Econômicos: ROHDE (2002) cita que a demanda por agregados para construção civil gerada pelo crescimento econômico é muito significativa. A construção de estradas representa cerca de 1/3 desta demanda. Este rejeito possui alta produção e custo bem inferior ao da brita (Tabela 2.4.3), até uma certa distância

\*Carneiro, F.A.V., Emprego de Escórias Siderúrgicas Integradas na Engenharia Civil, Tese M.Sc., UFF, Niterói, RJ, Brasil, 1993.

média de transportes, ideal para utilização em zonas urbanas. ALVARENGA (2001) mostrou que para a região de Volta Redonda, tanto a aquisição da escória quanto a execução de um pavimento utilizando este rejeito, seriam mais baratas do que a execução e a construção utilizando brita num raio de aproximadamente 120 km (Tabela 2.4.4). LIMA *et al.* (2000) acreditam que a escória de aciaria é um agregado competitivo para distâncias de até 80 km para utilização do transporte rodoviário e até 150 km para utilização do transporte intermodal (ferroviário e rodoviário). Se usada em contenções ou lastros, o seu maior peso próprio resulta em diminuição dos custos no dimensionamento devido à economia de material (GEYER, 2001). BAYOMY e WAHHAB (1985)\* *apud* BAGAMPADDE *et al.* (1999) citam que o aumento no valor do transporte deste material, devido ao seu peso próprio, é compensado com a redução da espessura do pavimento que utiliza este rejeito como agregado. É necessário ainda contabilizarem-se os custos ambientais, tais como: custo da remoção e estocagem da camada vegetal, custos das obras de proteção ambiental das áreas de bota-fora, custo do transporte do material utilizável, custo da recuperação ambiental das áreas degradadas, custos burocráticos junto aos órgãos ambientais e governamentais, etc. GALDEANO *et al.* (1994)\*\* *apud* GEYER (2001) comentam que o custo do transporte e da preparação da área para descarte deste rejeito é em torno de 25 dólares por tonelada deste material.

Tabela 2.4.3 - Preços e receitas dos agregados siderúrgicos (IBS, 1998)

| Tipo                      | Preço (R\$ / m <sup>3</sup> ) |           | Receita (R\$ × 10 <sup>6</sup> / anual) |           |
|---------------------------|-------------------------------|-----------|---|-----------|
|                           | Atual                         | Potencial | Atual                                   | Potencial |
| Alto forno granulado      | 7,50                          | 15,00     | 41,63                                   | 84,00     |
| Aciaria LD                | 2,10                          | 4,00      | 1,11                                    | 9,20      |
| Aciaria elétrica graduada | 2,20                          | 4,00      | 1,14                                    | 2,40      |
| Alto forno moído          | -                             | 45,00     | -                                       | 252,0     |

\* Bayomy, F. e H.I. Abdul Wahhab, 1985, "Utilization of Hadeed Slag in Pavement Construction in Saudi Arabia", Proc. 3<sup>rd</sup> IRF Regional Conf., Ministry of Communications, Riyadh, Saudi Arabia, 5.97-5.111.

\*\* Galdeano, O.V.R. *et al.* A experiência da CSN na reciclagem de resíduos sólidos nas sinterizações da CSN. In: Seminário de Redução e Matérias-Primas Resíduos na Siderurgia, 25, Volta Redonda, RJ, 1994, p. 271-285.

Tabela 2.4.4 - Comparação entre valores de insumos para camada de base (ALVARENGA, 2001)

| Insumo             | Preço (R\$/ m <sup>3</sup> ) |          |
|--------------------|------------------------------|----------|
|                    | Material                     | Execução |
| Escória de Aciaria | 3,60                         | 6,31     |
| Brita Graduada     | 25,00                        | 27,71    |

## 2.5 - A UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA EM OBRAS RODOVIÁRIAS

Desde 1979 a escória de aciaria vem sendo utilizada na infraestrutura de estradas em países como Estados Unidos, Inglaterra, Japão e Canadá. No Brasil, baseada nas informações disponíveis, este uso teve início em 1986 com a execução de 100 km de base e sub-base no estado do Espírito Santo (SILVA, 1994; SILVA e MENDONÇA, 2001b). Países como Grã-Bretanha, Alemanha, Polônia, França, Japão, Estados Unidos e Rússia utilizam escória de aciaria, sozinha ou combinada, como agregado em revestimentos asfálticos. SILVA e MENDONÇA (2001a) relatam que pavimentos construídos com este material suportaram tráfego pesado, como, por exemplo, o transporte de placas de aço, por 16 anos.

NOURELDIN e McDANIEL (1989) avaliaram a utilização de escória de aciaria em diferentes porcentagens (87,0%; 73,0% 59,0% e 40,0%) em misturas asfálticas para serem utilizadas em pavimentos com alto volume de tráfego. Como resultado obtiveram que as misturas com utilização deste rejeito apresentaram alta estabilidade Marshall (até 1.273 Kg) e resistência à tração da ordem de 1,1 MPa. Os autores ainda realizaram avaliação em campo e verificaram uma boa condição de superfície e resistência à derrapagem. Foi sugerido então, que a expansibilidade da escória fosse combatida com a utilização de um maior teor de cimento asfáltico apesar da redução de estabilidade que esta atitude produz. O alto teor de ferro e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> neste material provocou um endurecimento da mistura asfáltica e aumentou o trincamento quando a mesma foi utilizada em baixas temperaturas. Sugeriram então o uso de cimentos asfálticos menos viscosos. Ainda recomendaram o uso de misturas asfálticas mais “abertas” e a substituição dos finos da escória por finos de agregados naturais para diminuir o alto peso específico do material.

SILVA (1991) verificou a potencialidade de uso de escória de aciaria estabilizada granulometricamente com e sem mistura com argila (em diferentes proporções) em bases e sub-bases de pavimentos e em misturas usinadas a frio que utilizaram

escória, areia e emulsão asfáltica. Estas misturas asfálticas foram confeccionadas com 80,0% e 100,0% deste rejeito nas faixas C do DER-SP e B da Ipiranga, respectivamente. O autor propôs algumas seções tipo, a depender da capacidade de suporte do subleito, para pavimentos construídos com a utilização deste rejeito.

SILVA (1994) avaliou misturas de escória, argila e areia (em várias proporções) em sub-bases, bases e em misturas asfálticas a frio (faixas C do DER-SP e B3 da Ipiranga). A mistura com argila do tipo A7-6 foi indicada para combater a expansão do rejeito nas camadas de base e sub-base. Neste estudo foram utilizadas emulsões de Ruptura Lenta (RL-1C) e Ruptura Média (RM-1C). A mistura que utilizou a faixa C do DER-SP apresentou maior estabilidade Marshall quando comparada com a mistura na faixa B3 da Ipiranga.

COOMARASAMY e WALZAK (1995) investigaram a falência precoce de alguns pavimentos, em Ontário, Canadá, que utilizaram a escória de aciaria. A avaliação química e morfológica de diferentes escórias foi feita através de microscópios de varredura eletrônica e difração de raio-X. Foram confeccionadas misturas asfálticas com utilização de escórias de forno elétrico e de conversor de oxigênio. Os resultados mostraram que o  $\text{CaCO}_3$  foi o principal responsável pelo insucesso dos pavimentos investigados. A presença deste composto provocou uma “colagem” das interfaces do rejeito o que provoca a expansão do material e o conseqüente trincamento do pavimento.

FARRAND e EMERY (1995) utilizaram a escória de aciaria como agregado em misturas asfálticas em rodovias americanas. O desempenho dos pavimentos foi considerado satisfatório, porém os autores recomendam o controle tanto da produção do material (para evitar a alta heterogeneidade), quanto do potencial expansivo do mesmo.

KANDHAL e HOFFMAN (1998) propuseram o uso da parcela fina (passando na peneira de 4,8 mm) curada deste material para a produção de misturas asfálticas a quente. Fizeram também uma correlação entre a expansão das parcelas fina e grossa (retida na peneira de 4,8 mm) indicando o uso da parcela fina curada deste material. Para obtenção desta conclusão realizaram ensaios de expansão e resistência à tração retida por umidade induzida - *Lottman* (AASHTO T-283) com materiais de diferentes fontes, a fim de verificar possíveis problemas ocasionados pelo inchamento e pela umidade. As misturas asfálticas a quente contendo agregado miúdo de escória de

aciaria apresentaram estabilidade Marshall até 35,0% superior às das misturas convencionais. Após este estudo, algumas recomendações sobre o agregado miúdo de escória de aciaria foram incorporadas às normas do Departamento de Transportes da Pensilvânia, tais como: apresentar qualidade e densidade uniformes, expansão não superior a 0,5% (avaliada pelo método PTM 130), percentual retido da estabilidade Marshall a 60°C superior a 75,0% e expansão dos corpos de prova (cps), quando imersos em água a 71°C durante 48 horas, no máximo 1,0%. Os cps, quando condicionados, não devem apresentar trincas ou destacamento de agregados.

KHAN e WAHHAB (1998) estudaram a aplicação de escória pura ou misturada com agregados calcários para a realização de selagens com lama asfáltica na parte Oriental da Arábia Saudita. Os autores concluíram que estes dois agregados quando combinados apresentam melhor desempenho do que quando são utilizados separados porque suas qualidades são complementares. A cal apresenta boa afinidade com o betume e a escória apresenta alta resistência ao esmagamento e à abrasão. Misturas asfálticas realizadas sem a mistura destes dos agregados acima citados não apresentaram bom desempenho. As misturas que utilizaram apenas agregados calcários apresentaram alta abrasão e aquelas que utilizaram apenas escória apresentaram trincamento. Os melhores resultados foram obtidos com a mistura de agregado calcário e escória de aciaria passando na peneira nº 30 (0,6 mm) com 15,0% de emulsão catiônica. Os autores ainda admitem a utilização deste tipo de mistura com menores teores de emulsão (9,0% e 11,0%) para aplicações econômicas em campo.

BAGAMPADDE *et al.* (1999) avaliaram oito tipos de misturas utilizando escória de aciaria. As misturas utilizaram, além de agregado calcário e aditivos, este rejeito em diferentes proporções e de diferentes formas (tanto como agregado graúdo como miúdo). Verificaram que misturas com a parcela grossa da escória, agregados calcários e CAP modificado com polímero demonstraram maior vida de fadiga (carga dinâmica, tempo de ciclo 0,1s) e maior resistência à deformação permanente (*creep* dinâmico). As misturas com o uso de cal e polímero apresentaram maior resistência à umidade (maior Módulo de Resiliência - MR depois de condicionadas em contato com água a 60°C durante 35 minutos e após 24 horas). As misturas que utilizaram CAP modificado com polímero ainda apresentaram menor susceptibilidade térmica. A mistura que utilizou apenas escória de aciaria como agregado não se mostrou adequada para ser utilizada no local da pesquisa, visto que a mesma apresentou a maior deformação permanente (*creep* dinâmico) e faliu prematuramente não podendo

ser ensaiada para tensões acima de 689,5 kPa. Os autores atribuem este fato ao caráter muito áspero dos grãos da escória, que leva a maiores tensões cisalhantes nas misturas.

HUNT e BOYLE (2000) avaliaram a utilização de escória de aciaria em misturas asfálticas usinadas a quente (faixa B do Departamento de Transportes de Oregon). Para a realização deste estudo um pavimento foi construído, com utilização de 30,0% deste rejeito como agregado na mistura do revestimento, e avaliado durante cinco anos. O desempenho do pavimento foi considerado satisfatório visto que, neste período, não apresentou trincamento ou diminuição da resistência à derrapagem. A mistura com utilização de escória de aciaria elétrica apresentou maior estabilidade devido à textura rugosa e ao formato angular dos grãos que conferem um maior intertravamento.

LIMA *et al.* (2000) compararam dois pavimentos, sendo um com Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) e outro com Tratamento Superficial Duplo (TSD), construídos com utilização de escória de aciaria nas camadas de base e sub-base com um terceiro que utilizou Brita Graduada Simples (BGS) e Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) nestas mesmas camadas. As avaliações estruturais foram feitas através de retroanálise dos MRs *in situ* de todas as camadas do pavimento e do subleito, utilizando o programa RETRAN5-L. Para tanto, foram realizadas avaliações estruturais com a utilização da viga *Benkelman*. Os autores concluíram que pavimentos delgados feitos com a utilização de escória de aciaria são equivalentes aos espessos executados com agregados convencionais. Os módulos retroanalizados das camadas executadas com escória de aciaria mostraram-se de 3 a 4 vezes superiores ao da camada com BGS. Apesar da grande diferença entre as capacidades estruturais (análise visual e levantamento deflectométrico) dos dois tipos de pavimento (o convencional tinha aproximadamente o dobro da capacidade estrutural do pavimento com TSD e camada de base e sub-base com escória de aciaria), as deflexões máximas mostraram-se apenas 37,0% superiores para o pavimento com escória. O pavimento experimental apresentou ainda melhor distribuição de carga por apresentar maiores raios de curvatura.

ALVARENGA (2001) comparou as propriedades resilientes e o custo de pavimentos que utilizaram escória de aciaria e agregado convencional (brita) em suas bases. O autor determinou os MRs destes materiais e utilizou o programa FEPAVE2 para dimensionar estes pavimentos. Concluiu que este rejeito pode ser usado como

material de base porque o mesmo possui comportamento tensão versus deformação pouco dependente da umidade e da energia de compactação, além de ter um custo bastante inferior ao da brita. Para este estudo, foi verificado que a utilização deste rejeito é considerada recomendável para regiões no entorno da CSN, até 120 km de transporte por meio rodoviário.

SILVA e MENDONÇA (2001a) apresentaram a dosagem Marshall de uma mistura asfáltica do tipo CBUQ utilizando 97,0% de escória de aciaria com graduação menor do que 12,5 mm, fíler calcário e CAP 20. A mistura foi enquadrada na faixa C do DNER e a escória utilizada foi envelhecida durante mais de 3 anos, o que lhe conferiu expansão (1,83%) abaixo do limite estabelecido pela norma do DNER (ME 262/94) (3,0%)

ROHDE (2002) avaliou a utilização de Escória de aciaria elétrica com Granulometria Corrigida (EGC), na faixa C do DNER, como material de base e sub-base em pavimentos. O rejeito foi corrigido granulometricamente devido aos baixos valores de ISC encontrados (abaixo de 100,0%) não condizentes com a bibliografia consultada que indica ISC de até 300,0%. Após a correção, o rejeito apresentou melhorias na trabalhabilidade e compactação. A autora encontrou para a EGC valores de ISC cerca de duas vezes superiores ao da brita graduada. Investigou ainda o MR desse material, que apresentou-se, para todos os níveis de tensões, superior aos de outros materiais, como basalto, saibro e granito.

SILVA (2003a, 2003b) estudou o uso em camadas de sub-base, base, binder (faixa A do DNER), capa (Faixa B do DNER), Pré Misturado a Quente (PMQ), camada de vedação (faixa C do DNER) e microvestimento (faixa III do DNER). Utilizou diferentes graduações e proporções de escória nas diversas camadas do pavimento. Estas proporções estão mostradas na Tabela 2.5.1. Além disto, o autor utilizou escória de aciaria como agregado para produção do concreto utilizado para a construção de valetas, meio fios e sarjetas do citado pavimento.

Tabela 2.5.1 - Proporções de escória utilizadas por SILVA (2003a)

| Camada    | Sub-base | Base | Binder | Capa | Camada de Vedação | PMQ  | Micro |
|-----------|----------|------|--------|------|-------------------|------|-------|
| % escória | 70,0     | 87,0 | 76,2   | 75,6 | 66,3              | 98,6 | 88,0  |

PARENTE *et al.* (2003) compararam o uso de solo e escória de aciaria, para a construção de bases e sub-bases, através do comportamento mecânico (ensaios

triaxiais cíclicos e ISC) de duas misturas (utilizando 70,0% e 50,0% de escória), com misturas de solo-brita com a mesma granulometria (faixa D do DNER). As misturas em teste apresentaram maiores valores de massa específica seca máxima e menores valores de umidade ótima, quando comparadas às misturas de solo-brita. Quanto aos valores de ISC, as misturas em teste apresentaram ISC três vezes superiores aos das misturas solo-brita e duas vezes superiores ao do solo puro. Concluíram, também, que os valores de MR, para qualquer nível de tensão, para as misturas solo-escória foram superiores aos das misturas solo-brita e solo puro.

Existem algumas obras brasileiras onde foi utilizada escória de aciaria na pavimentação. Entre elas: BR-393 (Volta Redonda-Três Rios), RJ-157 (Barra Mansa-Divisa RJ/SP), RJ-141 (BR-393-Vargem Alegre), BR-116 (Volta Redonda-Divisa RJ/SP), 13 km da rodovia que liga Volta Redonda e o distrito Nossa Senhora do Amparo (Barra Mansa), várias ruas dos municípios de Volta Redonda, Resende, Barra do Piraí, Itaguaí, Barra Mansa e Magé (RJ) e no município de Mogi das Cruzes (SP), vias no interior da CST e revestimentos primários na região Sul Fluminense (ALVARENGA, 2001).

## **2.6 - EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA**

Um dos maiores entraves quanto à utilização da escória de aciaria na construção rodoviária é o seu potencial expansivo. Esta expansão pode chegar a 10,0%, ocasionando erupções na pista, que podem atingir até 10 cm de altura (SILVA e MENDONÇA, 2001a). A Figura 2.6.1 ilustra pavimentos com utilização de escória não curada.

A identificação destes defeitos nas pistas pode ser prevista através da observação da formação de trincas radiais de tamanho reduzido e do estufamento do revestimento. A formação de defeitos no pavimento ocasionados pela expansão pode ocorrer tanto quando a escória é utilizada em base e/ou sub-base, ou como agregado em revestimentos asfálticos. Neste segundo caso, apesar de inicialmente o ligante impermeabilizar os grãos da escória, com o desgaste, ocorre o contato entre a escória e a água provocando reações de hidratação e, conseqüentemente, a expansão do material (KANDHAL e HOFFMAN, 1998; SILVA, 2002).



(a) Erupções na pista



(b) Pavimento trincado

Figura 2.6.1 - Pavimento com utilização de escória não curada (SILVA, 2002)

Alguns autores citam que o aumento do conteúdo da cal ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) nas escórias está diretamente relacionado com o aumento da expansibilidade das mesmas, assim como o aumento da temperatura e da quantidade de espécies no estado livre (ROHDE, 2002). Já existem países que limitam o teor de cal nas escórias para que as mesmas possam ser utilizadas em camadas granulares, entre 4,0% e 7,0% (GEYER, 2001). Uma forma de minimizar estes efeitos danosos causados pela cal é utilizá-la com o menor tamanho de grão possível para que a mesma sofra completa dissolução.

A hidratação dos CaO e MgO livres é a principal responsável pela expansão da escória no curto e longo prazos, respectivamente (KANDHAL e HOFFMAN, 1998). SILVA *et al.* (2003) concluíram, após 15 anos de estudo, que a cinética da reação de hidratação do MgO é muito lenta. O grau de instabilidade destes compostos depende do tamanho dos cristais. Os cristais pequenos hidratam-se rapidamente, enquanto cristais grandes são formados por um processo de resfriamento lento. A cal livre quando hidratada forma o  $\text{Ca(OH)}_2$ , de acordo com a reação indicada na Equação 2.6.1. O MgO quando reage com a água forma o hidróxido de magnésio ou brucita ( $\text{Mg(OH)}_2$ ) (Equação 2.6.2). Além das reações de hidratação, a reação de carbonatação (Equação 2.6.3) também é responsável pela expansão do material.



Além disto, a expansão da escória deve-se, em menor escala, à:

- Corrosão do ferro metálico ( $\text{Fe}^0$ ): a causa deste processo é a diferença de volume molar dos produtos de oxidação e corrosão. Os produtos formados neste processo estão mostrados na Tabela 2.6.1;
- Mudanças nas formas alotrópicas do  $2\text{CaO-SiO}_2$  de  $\beta$  (larnita) para  $\gamma$  (calcolivina). Esta transferência instável ocorre durante o resfriamento lento da escória a, aproximadamente,  $725^\circ\text{C}$ , gerando uma alta expansão volumétrica (da ordem de 11,0%) causando o fenômeno do esfarelamento.

Tabela 2.6.1 - Produtos formados na oxidação e corrosão do ferro (MACHADO, 2000)

| Reações  | Formação   | Produto           |
|----------|--|-------------------|
| Oxidação | $\text{Fe}^0 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{FeO}$                                      | Wüstita           |
|          | $2 \text{Fe}^0 + \frac{3}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$                         | Hematita          |
|          | $3 \text{Fe}^0 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$                                   | Magnetita         |
| Corrosão | $\text{Fe}^{+2} + 2\text{OH} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$                                   | Hidróxido Ferroso |
|          | $4 \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{Fe}(\text{OH})_3$ | Hidróxido Férrico |

A hidratação das espécies químicas presentes na escória causa uma grande variação no volume das mesmas. Os compostos, bem como a variação do volume dos mesmos, estão na Tabela 2.6.2.

Tabela 2.6.2 - Variação de volume dos compostos após a hidratação (WEAST, 1971\* *apud* MACHADO, 2000)

| Fórmula                                   | Nome               | Densidade   | Variação de Volume(%) |
|---|--------------------|-------------|-----------------------|
| <b>Em relação ao MgO</b>                  |                    |             |                       |
| <b>Mg(OH)<sub>2</sub></b>                 | <b>Brucita</b>     | <b>2,36</b> | <b>119,5</b>          |
| <b>Em relação ao CaO</b>                  |                    |             |                       |
| <b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>                 | <b>Portlandita</b> | <b>2,24</b> | <b>99,4</b>           |
| <b>CaCO<sub>3</sub></b>                   | <b>Calcita</b>     | <b>2,93</b> | <b>105,9</b>          |
|   | <b>Aragonita</b>   | <b>2,71</b> | <b>122,6</b>          |
| <b>CaCO<sub>3</sub>. MgCO<sub>3</sub></b> | <b>Dolomita</b>    | <b>2,87</b> | <b>287,3</b>          |
| <b>Em relação ao Fe<sup>0</sup></b>       |                    |             |                       |
| <b>FeO</b>                                | <b>Wustita</b>     | <b>5,70</b> | <b>77,4</b>           |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>        | <b>Hematita</b>    | <b>5,24</b> | <b>328,7</b>          |
| <b>Fe(OH)<sub>2</sub></b>                 | <b>Hidróxido</b>   | <b>3,40</b> | <b>271,7</b>          |
| <b>FeO(OH)</b>                            | <b>Goetita</b>     | <b>4,28</b> | <b>192,0</b>          |

\* Weast, R.C. HandBook of chemistry and physics. 52 ed. Cleveland, 1971.

Para que o fenômeno indesejável de expansão das escórias não ocorra, faz-se uma pré-hidratação do material denominada cura, que pode ser realizada a céu aberto submetendo-se o material ao contato com a água. Este processo tem duração média de três meses a um ano, a depender da composição química da escória (MACHADO, 2000).

Uma forma de diminuir a expansão da escória de aciaria é armazená-la em pequenas pilhas e com altura reduzida (de 1,5 a 2,0 metros). LIMA *et al.* (2000) sugerem no máximo 10.000 toneladas de material por pilha e que as mesmas não sejam muito altas para evitar que alguma parte do material não seja curada. Estas medidas devem ser tomadas para que o processo expansivo ocorra o mais rápido possível.

Outra forma de minimizar os prejuízos causados pela expansão deste material, para o uso em camadas de reforço do subleito, base e sub-base, é misturá-lo com outro material capaz de absorver esta expansão, como argila, por exemplo (SILVA, 1991). Este processo é apenas físico, nenhuma reação química ocorre entre a escória e o material utilizado na mistura. Geralmente usa-se um material mais fino do que a escória para diminuir a permeabilidade e também o contato escória-água. Deve-se atentar também para a qualidade do material utilizado. Para o caso da argila, a mesma deve ser laterítica não possuindo caráter expansivo. SILVA (1994) utilizou várias amostras de escória adquiridas na Companhia Siderúrgica Tubarão (CST), em substituição aos agregados convencionais, misturadas com argila da região, para a construção das camadas de sub-base e base. Essa escória foi usada sem nenhuma espécie de cura, utilizando tal argila para combater a expansão. A maior expansão encontrada para as misturas que utilizaram estas misturas foi de 0,5%.

GEYER (2001) cita ainda que é possível obter-se uma cura acelerada deste rejeito. A escória é submetida a um *spray* de água quente e em seguida à injeção de vapor ou passagem através de zona de vapor. Com o uso destas técnicas é possível reduzir o tempo de cura das escórias para vinte dias. Existe ainda o resfriamento brusco onde a mesma é fragmentada por um jato d'água e resfriada em um tanque com água. Deve-se atentar, porém para a presença de MgO que possui um alto potencial expansivo e neutraliza somente a longo prazo.

São métodos de avaliação da expansibilidade das escórias (MACHADO, 2000):

- Norma japonesa JIS A 5015/92: avalia a expansão em cps que, depois de imersos em água, são aquecidos a 80°C em ciclos de 6 horas diárias. Esta norma

recomenda uma expansão máxima de 2,5% aos dez dias para que o pavimento não sofra perda de resistência, para misturas asfálticas do tipo CBUQ. Fixa ainda outras condições, tais como: massa específica (em torno de 2,45 kg/dm<sup>3</sup>), absorção de água (< 3,0%) e abrasão (< 30,0%);

- ASTM D 4792/95: potencial de expansão dos agregados com reações de hidratação. Analisa a expansão de cps a partir do aumento vertical dos mesmos, depois de imersos em água a  $71 \pm 2^\circ\text{C}$ ;
- ASTM 1260/94 e NBR 11582/91: métodos adaptados da avaliação da expansão em concretos. O primeiro é a avaliação do potencial da reatividade álcali-agregado e o segundo é a determinação da expansibilidade nas agulhas de *Le Chatelier* em cps de argamassa de cimento Portland e água;
- Método das Barras: adaptado do método do *National Building Research Institute (NBRI)*. Moldam-se barras (NBR 9773) de argamassa que após 24 horas são desmoldadas e medidas. Posteriormente, estes cps são condicionados em água a  $80^\circ\text{C}$ . Durante doze dias são realizadas leituras. Ao final do ensaio a expansão deve ser inferior a 0,11% (MASUERO *et al.*, 2000);
- Ensaio de Autoclave: consiste em colocar cps de pasta de cimento (após 24 horas) em autoclave durante 3 horas com pressão de 2 MPa. Posteriormente as amostras são condicionadas a  $23^\circ\text{C}$  durante 15 minutos. São realizadas leituras antes e após o condicionamento descrito acima (MASUERO *et al.*, 2000).

Este trabalho utilizará o método do Departamento de Transportes da Pensilvânia (PTM 130/78) por ter sido adaptado pelo DMA-1/DER-MG/82 (Departamento de Rodagem de Minas Gerais) de acordo com o DNER-DPT 49/64 (MACHADO, 2000). Este método é também o utilizado para estabelecimento do limite de expansão pelo DNER (ME – 262/94). O método é assim descrito (KANDHAL e HOFFMAN, 1998):

- Preparar a amostra, seca ao ar, passando-a na peneira de 50,8 mm (2”), desprezando a fração retida nesta citada peneira;
- Determinar a umidade ótima através do ensaio de compactação (DNER - ME 049/94);
- Compactar a amostra no molde ISC (diâmetro de 152 mm). A compactação é realizada na umidade ótima, em três camadas e com energia modificada (56 golpes por camada);
- Submergir a amostra em água (colocando o conjunto molde + cp dentro de um tambor com água) e colocar a mesma em estufa a  $71 \pm 3^\circ\text{C}$ ;
- Realizar uma leitura inicial após 2 horas da amostra na estufa;

- Medir a expansão vertical durante sete dias, realizando uma leitura por dia;
- Retirar o cp da condição submersa e mantê-lo na condição saturada (adicionando-se água ao molde) por mais sete dias, realizando uma leitura diária;
- Calcular a porcentagem total de expansão volumétrica através da seguinte relação:

$$\text{Expansão Total} = \frac{\text{leitura}_{14\text{dias}} - \text{leitura}_{\text{inicial}}}{h_{\text{amostra}}} \quad (2.6.4)$$

Onde:  $\text{leitura}_{14\text{dias}}$  = leitura do extensômetro após quatorze dias de ensaio;

$\text{leitura}_{\text{inicial}}$  = leitura realizada após duas horas de colocação da amostra na estufa;

$h_{\text{amostra}}$  = altura inicial da amostra.

- A taxa de expansão é ilustrada pelo gráfico da Figura 2.6.2:

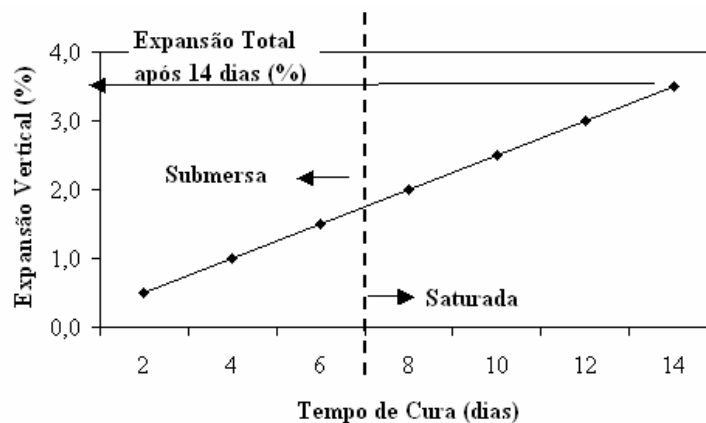


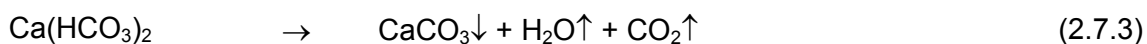
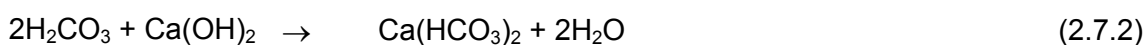
Figura 2.6.2 - Exemplo de taxa de expansão do ensaio PTM 130/78

MACHADO (2000) comparou alguns métodos para avaliação do potencial expansivo das escórias de aciaria, dentre eles: ASTM 1260/94, JIS A 5015/92, ASTM D 4792/95 e DNER ME 228/89 e M 192/89. Em seu estudo concluiu que o método das barras prismáticas (ASTM 1260/94) possui um tempo de execução em torno da metade ou um terço dos tempos gastos nos outros citados ensaios. Este método ainda apresentou algumas vantagens em relação aos demais, tais como: não necessitar da obtenção da umidade ótima através do ensaio de compactação, poder ser realizado com pequenas quantidades de material e não utilizar aparelhos exclusivos para realização do mesmo o que facilita o procedimento.

## 2.7 - OCORRÊNCIA DE TUFO

O tufo é a precipitação do  $\text{CaCO}_3$ , após a solubilização do  $\text{CaO}$  presente na escória, em água, seguida da carbonatação (MACHADO, 2000). Quando este processo ocorre em rodovias que utilizaram escória de aciaria na construção de suas bases e/ou sub-bases, as mesmas têm os seus sistemas de drenagem prejudicados devido ao entupimento dos mesmos.

Ocorrem basicamente duas reações químicas: entre o  $\text{CaO}$  e a água das chuvas formando o  $\text{Ca(OH)}_2$  (reação descrita pela Equação 2.6.1) e entre o  $\text{CO}_2$  e a água das chuvas formando o ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), que por sua vez reage com o  $\text{Ca(OH)}_2$  e forma o bicarbonato de cálcio,  $\text{Ca(HCO}_3)_2$  (Equações 2.7.1 e 2.7.2). A água contendo o  $\text{Ca(HCO}_3)_2$  evapora com o aumento da temperatura e libera o  $\text{CO}_2$  e provoca a precipitação do  $\text{CaCO}_3$  (Equação 2.7.3). Alguns outros fatores aceleram este processo, como: reatividade da escória com a água, área superficial, porosidade, quantidade de água a que a escória está exposta e teor de  $\text{CO}_2$  (MACHADO, 2000).



## CAPÍTULO 3

---

---

### 3 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 3.1 - OBTENÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA

Para o presente estudo, a escória de aciaria foi obtida na Sobremetal Recuperação de Metais Ltda., localizada no município de Maracanaú, nas dependências da Gerdau Cearense S.A. Este material encontrava-se a céu aberto, o que certamente provocou uma pré-expansão da escória antes mesmo de ser adquirida pelo LMP/DET/UFC. Nenhum procedimento normatizado de amostragem foi realizado neste estudo. As amostras apenas foram retiradas de locais diferentes da pilha, onde a mesma estava estocada, para garantir a representatividade do material (Figura 3.1.1). A primeira amostra (70 kg) foi coletada em Outubro de 2002, a segunda (150 kg) em Janeiro de 2003 e a terceira em Outubro de 2003 (500 kg). O material coletado destinou-se a este estudo e a ao estudo de Parente *et al.* (2003).



Figura 3.1.1 - Coleta da escória na Sobremetal Recuperação de Metais Ltda.

A escória foi estocada a céu aberto, nas dependências do LMP/DET/UFC, para propiciar a cura do rejeito. O material foi disposto sobre uma lona impermeável para evitar a perda de finos. Depois de colocado sobre a lona, o rejeito foi misturado para garantir a homogeneização do material (Figura 3.1.2). Esse procedimento foi repetido a cada coleta de escória realizada.



(a) Lona para dispor o material



(b) Disposição do material



(c) Início da homogeneização do material



(d) Final da homogeneização do material

Figura 3.1.2 - Etapas do armazenamento e homogeneização da escória no LMP/DET/UFC

### 3.2 - CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA

A caracterização da escória de aciaria foi realizada por meio dos ensaios exigidos pela norma DNER – EM 262/94 (Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários) conforme mencionado no Capítulo 2. Outros ensaios considerados importantes foram realizados. A caracterização deste rejeito seguiu o fluxograma da Figura 3.2.1.

A avaliação da cura do rejeito foi realizada com a primeira amostra de escória de aciaria coletada. O material foi empilhado e disposto a céu aberto durante aproximadamente três meses. O rejeito foi colocado em bandejas, para evitar a perda de finos, e submetido às intempéries (sol e chuva). Além disso, era constantemente regado para hidratação dos compostos responsáveis pelo processo expansivo.

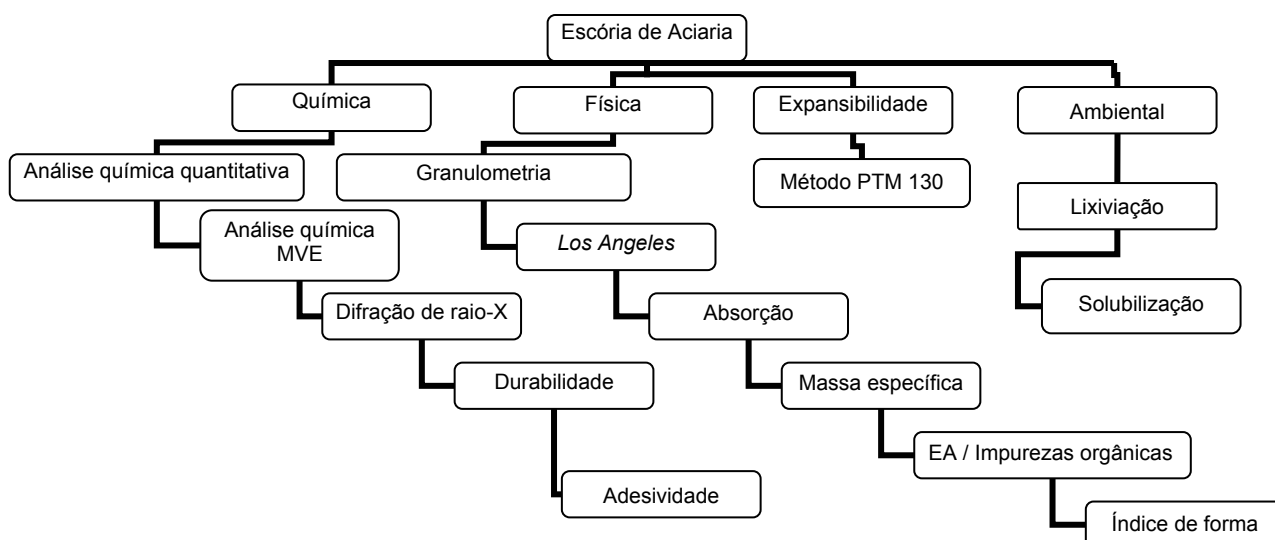


Figura 3.2.1 - Fluxograma dos ensaios para caracterização da escória de aciaria

Com relação ao material recolhido, as amostras de escória de aciaria foram misturadas e homogeneizadas para permitir a representatividade do material. A tendência dos grãos maiores é se localizarem na periferia das pilhas de material (DNER, 1996). O quarteamento da amostra foi realizado manualmente. O montante de escória foi colocado em um monte em forma de tronco de cone e dividido em quatro partes iguais. A partir daí, as duas partes opostas foram misturadas. Esta operação foi repetida algumas vezes até que a amostra ficasse visivelmente homogênea.

A análise química quantitativa foi realizada pelo Departamento de Engenharia Química da UFC, tendo apresentado os resultados contidos na Tabela 3.2.1 para as duas amostras de escória, onde C = Concentração e DP = Desvio Padrão.

As amostras de escória sofreram primeiramente uma digestão, ou “abertura”, um processo no qual a escória é misturada com ácido clorídrico, ácido anídrico e peróxido e colocada em um forno de microondas. Esse processo de digestão é realizado para que os elementos que não serão analisados sejam dissolvidos e, conseqüentemente, eliminados da caracterização. A primeira amostra utilizada pesava 0,0509 g, enquanto que a segunda pesava 0,0501 g. Após a digestão, as amostras foram dissolvidas em 30 ml de água bidestilada e feita a análise química quantitativa dos elementos presentes no material.

Tabela 3.2.1 - Análise química quantitativa da amostra de escória

| Elemento | Amostra 1   |              | Amostra 2   |              |
|----------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|          | C (g/100 g) | DP (g/100 g) | C (g/100 g) | DP (g/100 g) |
| Fe       | 13,26       | 0,0707       | 14,97       | 0,1078       |
| Si       | 9,84        | 0,1120       | 12,51       | 0,2455       |
| Ca       | 6,60        | 0,0472       | 8,80        | 0,1138       |
| Mn       | 2,38        | 0,0165       | 2,70        | 0,0293       |
| Mg       | 1,50        | 0,0147       | 2,39        | 0,0323       |
| Al       | 1,33        | 0,0000       | 2,31        | 0,0443       |

A análise química qualitativa foi realizada no Microscópio de Varredura Eletrônica (MVE) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFC com uma amostra (décimos de grama) de escória de aciaria passada na peneira de nº 200. A amostra foi desidratada e posteriormente sofreu um recobrimento com carbono (para tornar o material condutor). Os resultados estão apresentados nas Figuras 3.2.2 e 3.2.3, onde é possível perceber, respectivamente, os elementos existentes nesta amostra (carbono, oxigênio, magnésio, alumínio, silício, cálcio e ferro), bem como a forma e a textura dos grãos. As constantes  $K_a$  e  $K_b$  que aparecem na Figura 3.2.2 são referentes aos diferentes níveis de radiação dos elementos. Foi ainda realizada uma análise semi-quantitativa (devido a imprecisão do equipamento para este tipo de análise) dos elementos presentes na escória apresentada na Tabela 3.2.2. Percebem-se os altos teores de carbono e oxigênio. Através das fotos, verifica-se que os grãos da escória de aciaria possuem tamanhos variados, desde tamanhos menores do que 50  $\mu\text{m}$  até maiores do que 500  $\mu\text{m}$ .

Verifica-se que em relação aos elementos manganês e cálcio os resultados das análises químicas semi-quantitativa (MVE) e quantitativa apresentaram-se bem próximos. Provavelmente, as diferenças encontradas, em relação aos outros elementos, são devidas ao fato de que a análise feita pelo MVE é somente uma aproximação. Percebe-se que para a primeira análise química, apenas alguns elementos foram detectados, pois a soma da quantidade dos mesmos é diferente de 100 g. Os elementos carbono e oxigênio, principais na análise semi-quantitativa, feita pelo MVE, não está presente na análise quantitativa.

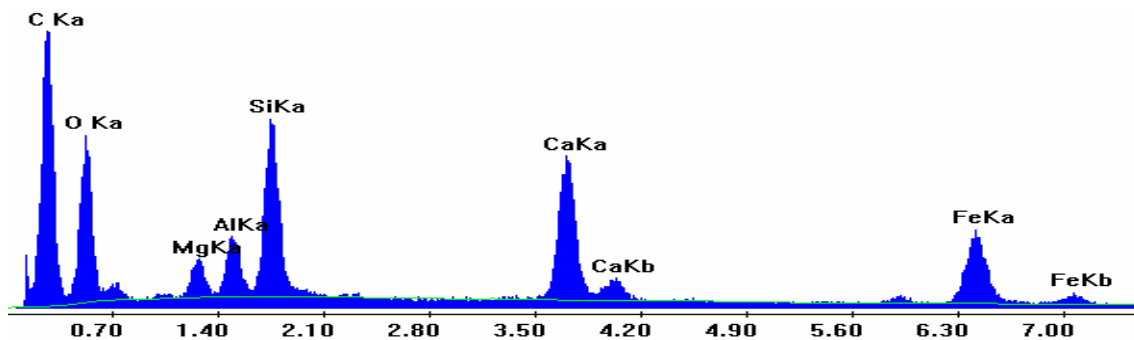
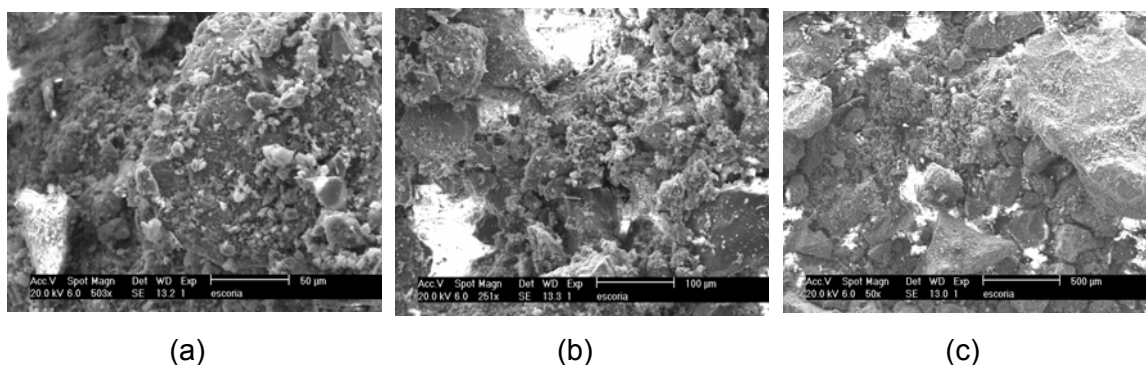


Figura 3.2.2 - Picos dos elementos existentes na escória, obtidos com a utilização do Microscópio de Varredura Eletrônica



(a)

(b)

(c)

Figura 3.2.3 - Fotos dos grãos da escória, escalas variadas (a) 50 µm, (b) 100 µm e (c) 500 µm

Tabela 3.2.2 - Análise química semi-quantitativa da amostra de escória realizada com utilização do Microscópio de Varredura Eletrônica (MVE)

| Elemento   | C     | O     | Fe   | Ca   | Si   | Al   | Mg   |
|------------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| % em massa | 51,77 | 23,14 | 9,48 | 6,53 | 5,50 | 2,02 | 1,56 |

A difração de raio-X foi realizada pelo Departamento de Física da UFC, em um difratômetro de raio-X convencional (modelo DMAXB operado numa potência de 40 kV/25mA) a 23°C. Este ensaio tem como intuito identificar a composição mineralógica da escória de aciaria. A difração é o efeito da interferência entre ondas que reforça as intensidades dos picos. As partículas são formadas por estruturas cristalinas com padrões de difrações diferentes e característicos de cada fase. O feixe de raios-X é incidido em ângulos variáveis na amostra de policristal (em forma de pó e com arranjo atômico ou molecular com estrutura que se repete de forma periódica e tridimensional) (BLEICHER e SASAKI, 2000).

Como resultado, este ensaio fornece o difratograma, que é um gráfico do ângulo de espalhamento ( $2\theta$ ) versus intensidade dos picos de incidência. Este ângulo é aquele formado entre a onda incidente e a onda espalhada. Percebe-se que para um mesmo composto existem vários picos, com várias intensidades, porque o mesmo é formado por vários planos. Um exemplo de difratograma, para a amostra de escória de aciaria, é mostrado na Figura 3.2.4. Os resultados são encontrados a partir da comparação com padrões de difração já conhecidos.

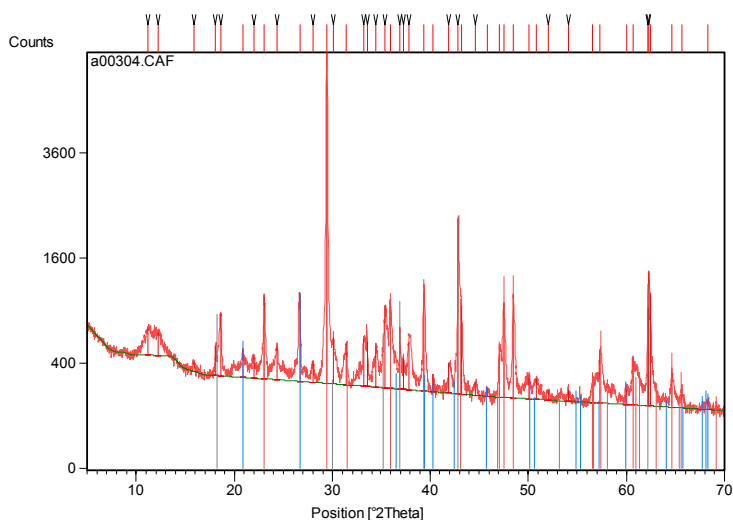


Figura 3.2.4 - Exemplo de difratograma da escória utilizada

Para a amostra de aciaria ensaiada (décimos de grama passando na peneira nº 200) foram encontrados cerca de 340 compostos diferentes, sendo o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e o óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) encontrados em maior quantidade. Alguns compostos encontrados são formados por metais, como prata, níquel, mercúrio e zinco. A não existência dos compostos responsáveis pela expansão do material é um indicativo de que a escória foi realmente curada.

O ensaio de durabilidade seguiu a norma DNER – ME 089/94 (Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio). A amostra de escória foi imersa em uma solução de sulfato de sódio ( $\text{NaSO}_4$ ) durante 16 horas, aproximadamente. Depois, a amostra foi drenada e seca em estufa ( $110^\circ\text{C}$ ). Este processo foi repetido cinco vezes (ciclos), em temperatura constante ( $20^\circ\text{C}$ ). A perda de massa, definida como a porcentagem em peso de cada fração da amostra que após o ensaio passou na peneira na qual originalmente era retida, foi de 4,7%.

A avaliação da adesividade ao ligante seguiu a norma DNER – ME 078/94 (Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso). Este ensaio verifica a adesividade entre a película de ligante e os grãos do agregado graúdo, depois que os mesmos são submetidos ao contato com a umidade (submersão em água destilada a 40°C, por 72 horas). O ensaio é dito satisfatório quando não há deslocamento da película de asfalto e não satisfatório quando há. Para o caso de haver deslocamento da película de ligante pode-se utilizar melhoradores de adesividade como: cimento Portland, cal hidratada ou aditivos químicos líquidos. Estes aditivos fazem com que haja maior recobrimento do agregado pelo ligante, diminuindo a tensão superficial entre o ligante e o agregado (BERNUCCI *et al.*, 1999).

Como houve o deslocamento da película de asfalto com o uso apenas do CAP 50/60 de origem Fazenda Alegre, optou-se por utilizar um aditivo químico líquido, o CAP-DOP, da BR Distribuidora. Primeiramente executou-se o ensaio com 0,5% de DOPE e obteve-se novamente o deslocamento da película. Executou-se então com 1,0% de DOPE, não sendo verificado o deslocamento da película e a adesividade considerada satisfatória.

Este ensaio vem sendo questionado no meio técnico devido à sua subjetividade. Trata-se de uma avaliação visual fornecida pelo executor do ensaio. Alguns autores preferem utilizar a metodologia AASHTO T – 283 (Resistência à tração retida por umidade induzida) (BERNUCCI *et al.*, 1999). Neste estudo este método também foi empregado e os resultados serão discutidos no Capítulo 5 (Caracterização Mecânica).

A granulometria do rejeito foi avaliada através da norma DNER – ME 083/98 (Agregados – análise granulométrica). Após a homogeneização das duas primeiras amostras de escória coletadas, o material foi separado em quatro sacos plásticos de 50 kg. Foram realizados dois ensaios para cada porção de material, totalizando, assim, oito ensaios. Na Figura 3.2.5 é possível verificar que as distribuições granulométricas das amostras são bem semelhantes, o que garante a homogeneidade do material, pelo menos no que diz respeito a este parâmetro. As médias dos resultados estão mostradas na Tabela 3.2.3 em peso retido e em porcentagem passando, respectivamente.

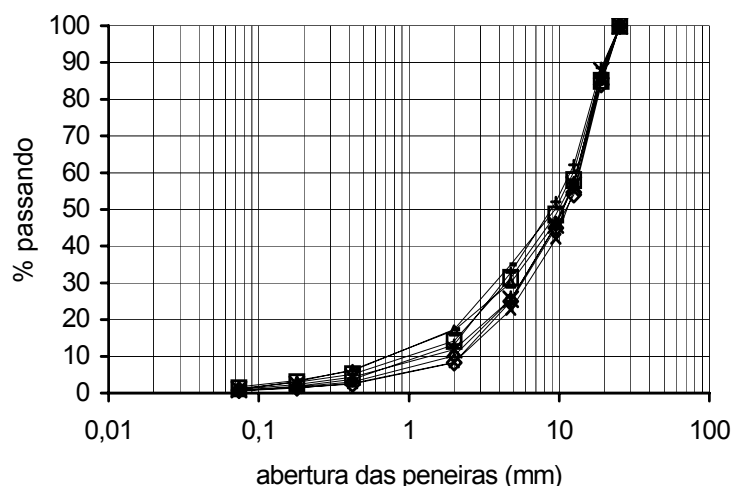


Figura 3.2.5 - Granulometrias das amostras de escória

Tabela 3.2.3 - Ensaio de granulometria, em peso retido e porcentagem passando da escória

| Peneira<br>(mm) | Porção 1 |       | Porção 2 |       | Porção 3 |       | Porção 4 |       | Média |       |
|-----------------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|-------|-------|
|                 | (g)      | (%)   | (g)      | (%)   | (g)      | (%)   | (g)      | (%)   | (g)   | (%)   |
| 25,4            | -        | 100,0 | -        | 100,0 | -        | 100,0 | -        | 100,0 | -     | 100,0 |
| 19,1            | 305,5    | 84,7  | 285,7    | 85,7  | 269,0    | 86,5  | 243,2    | 87,8  | 275,9 | 86,2  |
| 12,7            | 573,3    | 56,6  | 591,5    | 56,1  | 592,4    | 56,9  | 530,3    | 61,3  | 571,9 | 57,7  |
| 9,5             | 189,3    | 46,6  | 233,1    | 44,3  | 219,9    | 45,8  | 199,7    | 51,2  | 210,5 | 47,0  |
| 4,8             | 364,7    | 28,3  | 357,0    | 26,4  | 406,0    | 25,5  | 345,2    | 33,9  | 368,2 | 28,5  |
| 2,0             | 340,5    | 11,3  | 273,3    | 12,8  | 288,9    | 11,0  | 371,6    | 15,3  | 318,6 | 12,6  |
| 0,42            | 148,2    | 3,8   | 164,2    | 4,5   | 144,3    | 3,7   | 207,1    | 4,9   | 166,0 | 4,2   |
| 0,18            | 31,5     | 2,3   | 44,2     | 2,3   | 33,5     | 2,1   | 44,1     | 2,7   | 38,3  | 2,6   |
| 0,074           | 23,3     | 1,1   | 29,4     | 0,8   | 24,9     | 0,8   | 29,6     | 1,2   | 26,8  | 1,0   |
| < 0,074         | 18,5     | -     | 16,7     | -     | 18,6     | -     | 19,8     | -     | 18,4  | -     |

O ensaio de abrasão foi feito segundo a norma DNER – ME 035/98 (Agregados – determinação da abrasão *Los Angeles*). As graduações para este ensaio, segundo a norma citada, estão na Tabela 3.2.4. Foram realizados dois ensaios: para as graduações B e C (1º ensaio), e para as graduações B, C e D (2º ensaio). Apesar de ter sido realizado um ensaio para a graduação D, as graduações B e C apresentam granulometrias mais próximas da obtida para a escória deste estudo (conforme discutido acima). A massa total foi de 5.000 g  $\pm$  10 g para as três graduações e foram realizadas 500 rotações do tambor. A carga abrasiva foi de 4.584 g  $\pm$  25 g, 3.330 g  $\pm$

20 g e 2.500 g  $\pm$  15 g para as graduações B, C e D, respectivamente. Os resultados estão contidos na Tabela 3.2.5.

Tabela 3.2.4 - Graduação para o ensaio *Los Angeles* da norma ME 035 (1998)

| Peneiras (mm) |        | Amostra – massa parcial (gramas) |                |                |
|---------------|--------|----------------------------------|----------------|----------------|
| Passando      | Retido | Grad. B                          | Grad. C        | Grad. D        |
| 38,1          | 25,4   | 1.250 $\pm$ 25                   | -              | -              |
| 25,4          | 19,1   | 1.250 $\pm$ 25                   | -              | -              |
| 19,1          | 12,7   | 1.250 $\pm$ 25                   | 2.500 $\pm$ 10 | -              |
| 12,7          | 9,5    | 1.250 $\pm$ 25                   | 2.500 $\pm$ 10 | -              |
| 9,5           | 6,3    | -                                | -              | 2.500 $\pm$ 10 |
| 6,3           | 4,8    | -                                | -              | 2.500 $\pm$ 10 |
| 4,8           | 2,0    | -                                | -              | -              |

Tabela 3.2.5 - Resultado do ensaio de abrasão *Los Angeles* da escória

| Faixa | Nº de esferas | Abrasão <i>Los Angeles</i> (%) |
|-------|---------------|--------------------------------|
| B1*   | 11            | 34                             |
| B2*   | 11            | 37                             |
| C1    | 8             | 36                             |
| C2    | 8             | 38                             |
| D2    | 6             | 73                             |

\* 1 referente ao 1º ensaio e 2 referente ao 2º ensaio

Os resultados encontrados para este ensaio são todos superiores ao limite estabelecido pelo DNER para o uso da escória de aciaria em pavimentação (25,0%). Porém na literatura estudada foram encontrados valores de até 44,0% para perda de peso por abrasão *Los Angeles* (ROHDE, 2002). Para agregados tradicionais o Departamento de Edificações Rodovias e Transportes (DERT, CE) estabelece um limite de até 55,0% (DERT, 1994) e o próprio DNER estabelece um limite de 40,0% para agregados graúdos, inclusive escórias (DNER – ES 313/97).

Avaliou-se a absorção e a densidade dos agregados de escória através das normas DNER – ME 081/98 (Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo) e ASTM C 127/88 (*Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate*). Foram realizados três ensaios e a média dos valores encontrados foi de 3,30 para a densidade real da escória graúda; 2,92 para a

densidade aparente da escória graúda e 4,5% para a absorção d'água. Os valores encontrados para as três amostras ensaiadas, bem como as médias, estão mostrados na Tabela 3.2.6. Nota-se que o valor encontrado para a absorção d'água da escória utilizada neste estudo foi muito elevado, sendo superior ao estabelecido pela norma DNER – ME 262/94. A densidade real da escória miúda (passando na peneira nº 4) também foi determinada (DNER – ME 084/95). O valor encontrado (média de três determinações) foi de 3,51.

Tabela 3.2.6 - Densidades e absorção da escória de aciaria graúda

| Parâmetro                    | Valores  |          |          |
|------------------------------|----------|----------|----------|
| Peso da Amostra Seca (g)     | 947,90   | 961,80   | 972,70   |
| Peso da Amostra Saturada (g) | 1.001,60 | 1.002,30 | 1.007,00 |
| Peso da Amostra Imersa (g)   | 660,70   | 670,20   | 677,50   |
| Densidade Real               | 3,30     | 3,30     | 3,30     |
| Densidade Aparente           | 2,78     | 2,90     | 2,95     |
| Absorção (%)                 | 5,67     | 4,21     | 3,53     |
| Média Densidade Real         |          | 3,30     |          |
| Média Densidade Aparente     |          | 2,88     |          |
| Média Absorção (%)           |          | 4,47     |          |

O ensaio de Equivalente de Areia (EA) realizado segundo o método DNER – ME 054/94 confirmou que a escória de aciaria deste estudo não apresenta material argiloso. Seu EA é de 100,0%. Com relação às impurezas orgânicas, devido a não existência de norma brasileira específica para realização deste ensaio em escórias de aciaria, utilizou-se o método DNER – ME 055/95 para areias. A amostra de escória de aciaria passando na peneira nº 10 foi ensaiada. O material estudado apresentou-se livre de impurezas orgânicas como pode ser visto na Figura 3.2.6. A amostra com escória e solução de hidróxido de sódio, depois de 24 horas de observação, apresentou-se mais clara do que a solução padrão.



Figura 3.2.6 - Comparação entre as amostras de escória de aciaria e padrão

O ensaio de índice de forma foi realizado segundo os procedimentos da norma DNER ME 086/94. A escória utilizada neste estudo se enquadrou na graduação C e a média das três amostras ensaiadas foi de 0,29 (indicando que a escória possui formato cúbico). Este valor está bem abaixo do encontrado na literatura para este tipo de agregado. SILVA *et al.* (2002) encontraram 0,74. A norma DNER – ES 313 (1997) estabelece um limite de 0,50 para agregados graúdos. Porém, a norma DNER – ME 262 (1994) não estabelece limites para este índice.

Os ensaios de lixiviação (separação de certas substâncias contidas nos resíduos industriais por meio de lavagem ou percolação) e solubilização (realização de análise química de amostra representativa do resíduo, depois de dissolvido em água deionizada ou destilada e filtrado) não foram realizados pela autora, devido à impossibilidade de realização dos mesmos no Ceará. A Gerdau Cearense S.A. realiza, a cada seis meses (no laboratório TASQA localizado em Paulínia no estado de São Paulo), a avaliação do rejeito em relação ao seu potencial contaminante. O último relatório recebido em 2003 classifica o material como classe II, isto é, não inerte devendo ser acondicionado de maneira especial (ADERALDO, 2003).

O ensaio de expansibilidade foi realizado segundo o método PTM 130/78 (Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria), adaptado pelo DER-MG. Este estudo utilizou os resultados obtidos por Parente *et al.* (2003). Antes da realização do ensaio de expansibilidade, a amostra de escória de aciaria foi compactada, segundo os procedimentos da norma DNER – ME 049/94 (Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas), para a obtenção da umidade ótima de compactação. O peso do soquete utilizado na compactação foi de 4,50 kg e a altura de queda foi igual a 45,7 cm. A amostra de 6.000 g foi obtida com material dividido da seguinte forma:

- 1.000 g de material retido entre as peneiras com aberturas de 4,8 mm e 2,0 mm;
- 1.000 g de material retido entre as peneiras com aberturas de 2,0 mm e 0,42 mm;
- 1.000 g de material retido entre as peneiras com aberturas de 0,42 mm e 0,18 mm;
- 1.000 g de material passando na peneira com abertura de 0,18 mm;
- 2.000 g de material não fracionado, isto é, no estado bruto.

Esta divisão foi efetuada para que o cp apresentasse coesão, visto que com o material no estado original (sem fracionamento) não foi possível moldar os cps. Foi passada vaselina na parte interna do molde e um papel filtro circular foi colocado na base inferior do mesmo. Os cps foram compactados em três camadas, com a energia modificada (56 golpes). O material foi seco em estufa e adicionou-se água nas seguintes proporções: 3,0%; 2,0%; 2,0%; 2,0% e 2,0%, em relação a massa total de escória (6.000 g). Para cada proporção de água adicionada foi moldado um cp, o conjunto molde + amostra foi pesado após a compactação. Uma amostra do material, restante da moldagem, foi retirada, pesada e colocada em estufa, a 100°C, por aproximadamente 3 horas. Depois de seca, a amostra foi novamente pesada para obtenção do peso seco da amostra e, posteriormente, da umidade.

Algumas tentativas foram realizadas para a obtenção da curva de compactação. Curvas com formatos não característicos foram encontradas (Figura 3.2.7). Outros autores já haviam se deparado com este problema para materiais com Limite de Liquidez (LL) fora do intervalo entre 30,0% e 70,0% (LEE e SUEDKAMP, 1972\* *apud* ROHDE, 2002 e ROHDE, 2002). A escória utilizada neste estudo apresentou-se não plástica e não líquida (DNER - ME 082/94 e 122/94).

---

\*Lee, P. Y. e R.J. Suedkamp. Characteristics of Irregularly Shaped Compaction Curves of Soils. Highway Research Record, Washington, D.C., n.381, p. 1-9, 1972.

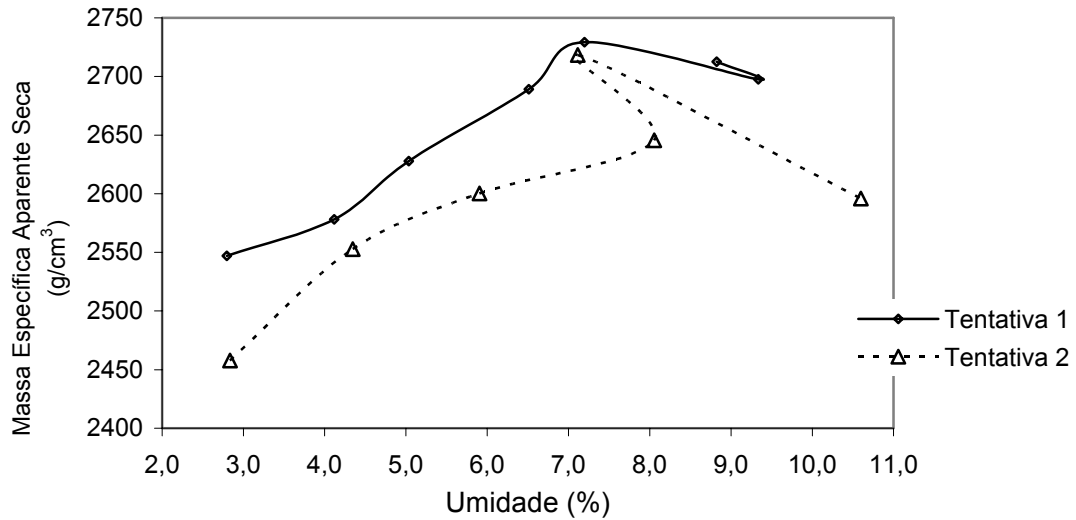


Figura 3.2.7 - Tentativas para obtenção da curva de compactação da escória

Para que a curva de compactação desta amostra de escória de aciaria apresentasse formato característico, os valores obtidos na terceira tentativa foram interpolados. A curva manipulada ficou com um ramo ascendente, outro descendente e um pico bem definido (Figura 3.2.8). A umidade ótima de compactação é aquela correspondente a maior massa específica seca.

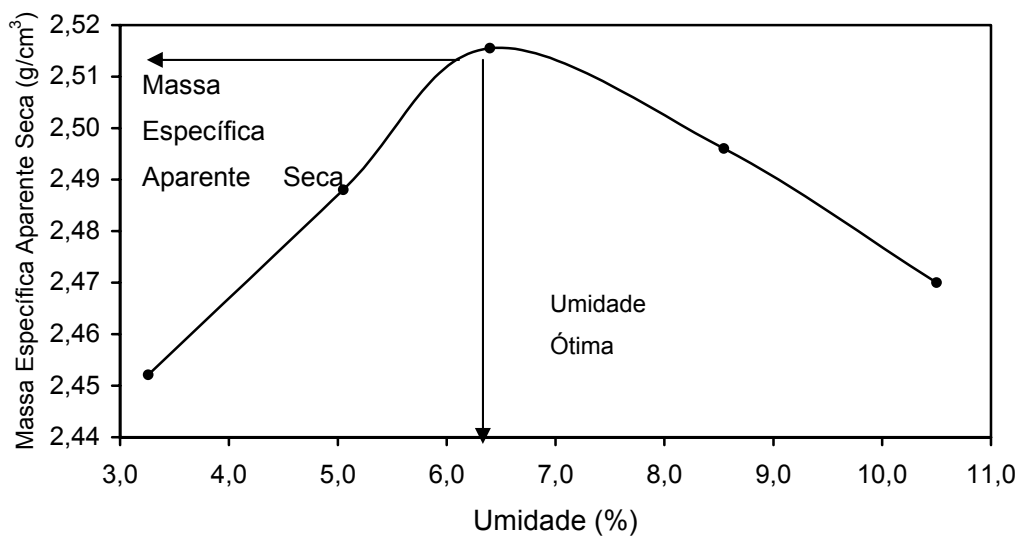


Figura 3.2.8 - Determinação da umidade ótima da escória na energia modificada, com a curva interpolada a partir dos resultados da terceira tentativa

Com a determinação da massa específica aparente seca máxima (2,52 g/cm<sup>3</sup>) e da umidade ótima (6,4%), moldou-se um cp para o ensaio de expansibilidade segundo o

método PTM 130/78. O conjunto, cp, tambor com água para submersão do cp e extensômetro, foi colocado na estufa, a 71°C, no dia 29/04/2003. As etapas deste processo podem ser visualizadas na Figura 3.2.9.



(a) Compactação do cp



(b) Cp + Molde



(c) Imersão do cp em água



(d) Extensômetro

Figura 3.2.9 - Etapas para realização do ensaio de expansão da escória pelo método PTM 130/78

A leitura inicial foi realizada após duas horas. As outras leituras foram realizadas durante quatorze dias, no mesmo horário, para avaliação do potencial expansivo da escória de aciaria. Estas leituras, em milímetros, estão contidas na Tabela 3.2.7, bem como o percentual de expansão e a expansão diária. O gráfico, percentual de expansão diária e expansão acumulada versus tempo de cura (dias), está na Figura 3.2.10. A expansão diária é dada pela Equação (3.2.1) e a expansão total é dada pela Equação (2.6.4), item 2.6, do Capítulo 2.

$$\text{Expansão Diária} = \frac{\text{leitura}_{\text{ext.}} - \text{leitura}_{\text{inicial}}}{h_{\text{amostra}}} \quad (3.2.1)$$

Onde:  $leitura_{ext.}$  = leitura do extensômetro no dia desejado;

$leitura_{inicial}$  = leitura realizada após duas horas de colocação da amostra na estufa;

$h_{amostra}$  = altura inicial da amostra.

Durante os sete primeiros dias, a amostra foi mantida na condição submersa, para o período compreendido entre o 8º e 14º dia a amostra foi mantida na condição saturada (adicionando-se dois litros de água por dia ao molde). Esta mudança é feita para avaliar a diferença entre os potenciais expansivos nas duas condições. A expansão volumétrica total é aquela obtida após quatorze dias de ensaio. Nesta amostra foi de 0,61%. A altura da amostra utilizada neste ensaio foi de 115,5 mm. A norma ASTM D 2940/1992 estabelece um limite máximo de expansão aos sete dias no valor de 0,5% (ROHDE, 2002). Para o material utilizado neste estudo, este valor não foi ultrapassado, visto que nesta data a expansão foi de 0,34%.

Tabela 3.2.7 - Expansão da escória até o 14º dia do ensaio PTM 130/78

| Condição | Dia | Data  | Leitura (mm) | Expansão Diária (%) | % Expansão Acumulada |
|----------|-----|-------|--------------|---------------------|----------------------|
| Submersa | 0   | 29/04 | 0            | 0                   | 0                    |
|          | 1º  | 30/04 | 0,10         | 0,09                | 0,09                 |
|          | 2º  | 01/05 | 0,15         | 0,04                | 0,13                 |
|          | 3º  | 02/05 | 0,20         | 0,04                | 0,17                 |
|          | 4º  | 03/05 | *            | *                   | *                    |
|          | 5º  | 04/05 | *            | *                   | *                    |
|          | 6º  | 05/05 | 0,35         | 0,13                | 0,30                 |
| Saturada | 7º  | 06/05 | 0,39         | 0,04                | 0,34                 |
|          | 8º  | 07/05 | 0,43         | 0,04                | 0,37                 |
|          | 9º  | 08/05 | 0,45         | 0,02                | 0,39                 |
|          | 10º | 09/05 | 0,50         | 0,04                | 0,43                 |
|          | 11º | 10/05 | *            | *                   | *                    |
|          | 12º | 11/05 | *            | *                   | *                    |
|          | 13º | 12/05 | 0,65         | 0,13                | 0,56                 |
|          | 14º | 13/05 | 0,70         | 0,04                | 0,61                 |

\*Leituras não realizadas, final de semana

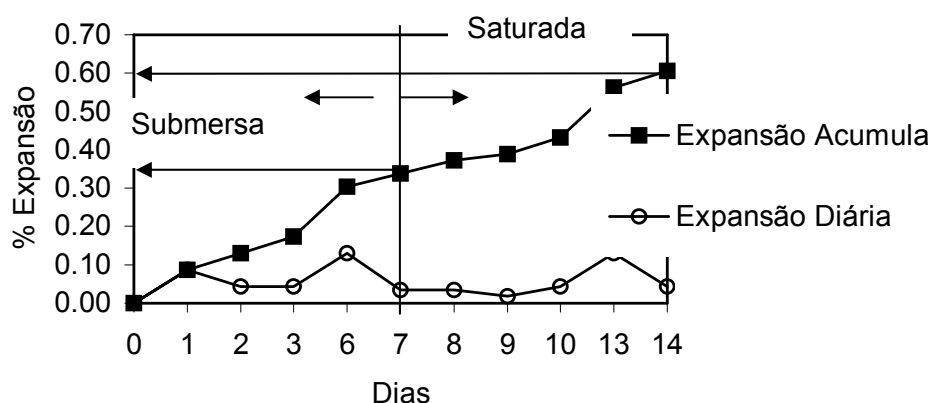


Figura 3.2.10 - Percentuais de expansão diária e acumulada (leitura zero até o 14º dia) da escória no ensaio PTM 130/78

Apesar da norma utilizada neste estudo só exigir que o ensaio seja realizado até o 14º dia, o ensaio foi continuado até o 30º dia (Tabela 3.2.8). Esta decisão foi tomada a fim de verificar como a escória de aciaria se comportaria em relação ao parâmetro expansão em um período superior ao estipulado pela norma.

Tabela 3.2.8 - Expansão da escória após o 14º dia do ensaio PTM 130/78

| Condição | Dia | Data  | Leitura (mm) | Expansão Diária (%) | % Expansão Acumulada |
|----------|-----|-------|--------------|---------------------|----------------------|
| Submersa | 15º | 14/05 | 0,75         | 0,04                | 0,65                 |
|          | 16º | 15/05 | 0,80         | 0,04                | 0,69                 |
|          | 17º | 16/05 | 0,90         | 0,09                | 0,78                 |
|          | 18º | 17/05 | *            | *                   | *                    |
|          | 19º | 18/05 | *            | *                   | *                    |
|          | 20º | 19/05 | 1,00         | 0,09                | 0,87                 |
|          | 21º | 20/05 | 1,10         | 0,09                | 0,95                 |
| Saturada | 22º | 21/05 | 1,11         | 0,01                | 0,96                 |
|          | 23º | 22/05 | 1,17         | 0,05                | 1,01                 |
|          | 24º | 23/05 | 1,21         | 0,03                | 1,05                 |
|          | 25º | 24/05 | *            | *                   | *                    |
|          | 26º | 25/05 | *            | *                   | *                    |
|          | 27º | 26/05 | 1,32         | 0,10                | 1,14                 |
|          | 28º | 27/05 | 1,35         | 0,03                | 1,17                 |
|          | 29º | 28/05 | 1,39         | 0,03                | 1,20                 |
|          | 30º | 29/05 | 1,42         | 0,03                | 1,23                 |

\*Leituras não realizadas, final de semana

A Figura 3.2.11 apresenta o gráfico percentual de expansão diária e expansão acumulada versus tempo de cura (dias) para esta segunda parte do ensaio. Percebe-se que, com a continuação do ensaio, a porcentagem de expansão acumulada continua aumentando. Porém, ao final do ensaio (30º dia) o valor encontrado (1,25%) foi inferior ao estabelecido pelo DNER (1994) (3,0%).

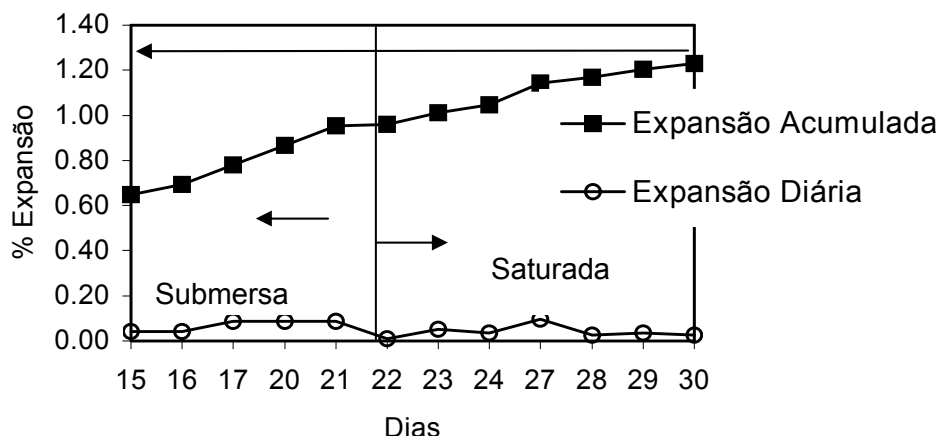


Figura 3.2.11 - Percentuais de expansão diária e acumulada para a escória em continuação ao observado no ensaio PTM 130/98 (14º ao 30º dia)

Percebe-se que, tanto para a primeira parte do ensaio (1º ao 14º dia) quanto para a segunda parte (15º ao 30º dia), a inclinação média da reta dada pela expansão acumulada é igual à média da expansão diária. Para a parte inicial, este valor é de 0,04 e para a segunda parte é de 0,05.

### 3.3 - OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS DEMAIS AGREGADOS

Tanto os agregados utilizados nesta pesquisa, quanto aqueles utilizados na pesquisa que serviu de comparação para este estudo (CTPETRO, 2003) foram coletados na Pedreira Itaitinga. Esta pedreira localiza-se no município de Itaitinga, distante 30 km da capital Fortaleza.

Além da escória de aciaria, este estudo utilizou em suas misturas areia de campo e filer mineral. Os agregados convencionais utilizados na pesquisa comparativa foram: brita ¾" e 3/8" (origem granítica), areia de campo, pó de pedra e filer mineral. Estes materiais foram coletados em meados de Abril de 2003. Uma vista da pedreira, bem como da coleta dos agregados para esta pesquisa estão na Figura 3.3.1.



(a) Vista da pedreira Itaitinga



(b) Coleta dos agregados

Figura 3.3.1 - Vista da pedreira e coleta dos agregados

A granulometria da areia de campo foi determinada segundo a norma DNER – ME 083/98 (Agregados – análise granulométrica) e pode ser visualizada na Figura 3.3.2. A densidade real deste agregado foi determinada seguindo a norma DNER – ME 084/95 (Agregado miúdo – determinação da densidade real). Para facilitar a expulsão das bolhas de ar da amostra, optou-se por substituir a etapa de fervura dos picnômetros por aplicação de -88 kPa de pressão (VASCONCELOS e SOARES, 2003b). Os resultados dos três ensaios realizados, bem como a média desses valores, encontram-se na Tabela 3.3.1. A densidade aparente deste agregado também foi determinada pelo método ASTM C 128-97 (*Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate*). O valor encontrado foi de 2,641.

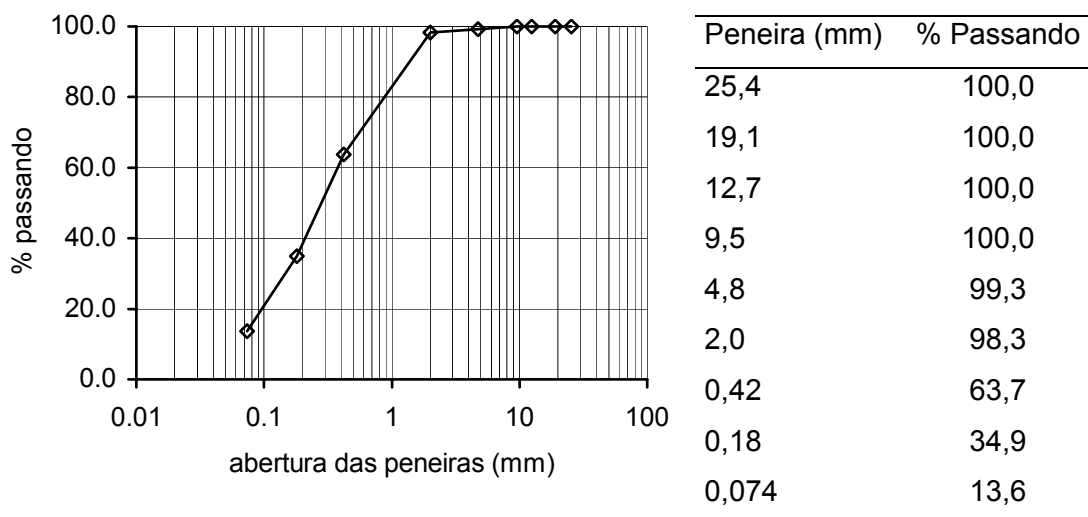


Figura 3.3.2 - Granulometria da areia de campo

Tabela 3.3.1 - Densidade real da areia de campo

| Parâmetros                                  | Valores encontrados |        |        |
|---|---------------------|--------|--------|
| Peso do Picnômetro (g)                      | 158,60              | 158,60 | 158,60 |
| Peso do Picnômetro + Amostra Seca (g)       | 643,00              | 658,00 | 657,50 |
| Peso da Amostra Seca (g)                    | 484,40              | 499,40 | 498,90 |
| Peso do Picnômetro + Amostra + Água (g)     | 954,90              | 964,40 | 964,90 |
| Peso da Água Complementar (g)               | 311,90              | 306,40 | 307,40 |
| Peso do Picnômetro + Água (g)               | 656,40              | 656,40 | 656,40 |
| Peso da Água (g)                            | 497,80              | 497,80 | 497,80 |
| Volume de Água Deslocada (cm <sup>3</sup> ) | 185,90              | 191,40 | 190,40 |
| Densidade Real da Amostra                   | 2,606               | 2,609  | 2,620  |
| Média das Densidades Reais                  |                     | 2,612  |        |

A areia de campo apresentou EA (ME – 054/94) igual a 40,4%. Este valor encontra-se abaixo do recomendado (55,0%) pelas especificações do DNER (1997a) quanto ao EA.

O filer utilizado foi natural, proveniente da areia de campo (apenas passado na peneira de 0,074 mm, n° 200) utilizada como agregado miúdo. A densidade do mesmo foi determinada através do método DNER - ME 367/97 (Material de enchimento para misturas betuminosas). O resultado encontrado foi de 2,640.

### 3.4 - OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CAP

O ligante escolhido para este estudo é classificado por penetração como CAP 50/60. Originado da Fazenda Alegre e fornecido pela Lubnor/Petrobras, o mesmo atendeu às especificações brasileiras regulamentadas pelo Departamento Nacional de Combustíveis (DNC, 1993). Estas especificações e os valores medidos no CAP encontram-se na Tabela 3.4.1. A composição química deste CAP foi realizada no Cenpes/Petrobras e pode ser vista na Tabela 3.4.2.

Tabela 3.4.1 - Especificações e valores medidos para a amostra de CAP 50/60 Fazenda Alegre (Lubnor/Petrobras)

| Característica                | Método      | Especificação | Unidade | Resultados |
|-------------------------------|-------------|---------------|---------|------------|
| Penetração                    | ASTM D 5    | 50 a 60       | 0,1 mm  | 57         |
| ECA – % Penetr. Original      | X 021*      | 50 min        | %       | 72         |
| ECA – Variação de massa       | ASTM D 1754 | 1,0 max       | %       | 0,3        |
| Índice de Susc. Térmica       | X 018       | -1,5 a 1,0    | -       | -0,9       |
| Ponto de fulgor               | ASTM D 92   | 235 min       | °C      | 296        |
| Solubilid. no tricloroetileno | ASTM D 2042 | 99,5 min      | % massa | 100        |
| Visc. Saybolt Furol a 135°C   | ASTM E102   | 110 min       | s       | 222        |
| Aquecimento a 175°C           | X 215       | Não espuma    | -       | Não espuma |

\*Calculado do percentual da penetração original determinada pelo método ASTM D 5

Tabela 3.4.2 - Composição química da amostra de CAP 50/60 Fazenda Alegre (Cenpes/Petrobras)

| Ensaio                           | Método                              | CAP 50/60 |
|----------------------------------|-------------------------------------|-----------|
| Teor de nitrogênio total (%p/p)  | -                                   | 0,65      |
| Teor de nitrogênio básico (%p/p) | -                                   | 0,19      |
| Fracionamento SARA (%)           | IATROSCAN TLC/FID                   |           |
| Saturados                        |                                     | 15        |
| Aromáticos                       | Cromatografia em camada fina com    | 46        |
| Resinas                          | detecção por ionização de chama     | 21        |
| Asfaltenos                       |                                     | 18        |
| Tamanho molecular (%)            |                                     |           |
| Alto (APM > 3700)                | HP-GPC                              | 17,5      |
| Médio (425 < MPM < 3700)         |                                     | 59,5      |
| Baixo (BPM < 425)                |                                     | 23,1      |
| Carbono aromático (%)            | NMR – Ressonância nuclear magnética | 31,3      |
| Teor de asfaltenos (%p/p)        | IP143                               | 11,3      |

Este CAP pode ainda ser classificado, de acordo com as especificações Superpave, como um PG (*Performance Grade* = grau de desempenho) 64-28 (SOARES *et al.*, 1999a). Esta classificação advém de um estudo realizado entre 1987 e 1993 nos Estados Unidos. O programa *Strategic Highway Research Program* (SHRP) inseriu a especificação do CAP a partir do desempenho dos pavimentos. Logo, um PG 64-28 seria adequado para pavimentos com temperaturas máxima de 64°C e mínima de -28°C (SOARES *et al.*, 1999b). A Tabela 3.4.3 apresenta os resultados das análises realizadas no Cenpes/Petrobras relativas às especificações Superpave do CAP utilizado nesta pesquisa (ASTM D 6373-99). A densidade da amostra de CAP 50/60 foi

determinada a 25°C pelo densímetro digital para amostras escuras (ASTM D 5002, 1994). O valor encontrado foi de 1,0252.

Tabela 3.4.3 - Resultados das análises relativas às especificações Superpave da amostra de CAP 50/60 Fazenda Alegre (Cenpes/Petrobras)

| Ensaio                                   | CAP 50/60 |
|--|-----------|
| Viscosidade Brookfield 135°C, 20 rpm, cP | 474       |
| Viscosidade Brookfield 150°C, 20 rpm, cP | 238       |
| Viscosidade Brookfield 175°C, 20 rpm, cP | 89        |
| Ductilidade a 25°C, cm                   | > 150     |
| Cisalhamento $G^*/\text{sen}\delta$ (°C) | 64        |
| Penetração a 35°C, 100g, 5s, dmm         | 143       |
| Penetração a 25°C, 100g, 5s, dmm         | 51        |
| Penetração a 15°C, 100g, 5s, dmm         | 16        |
| Ponto de Amolecimento (°C)               | 51,1      |
| Viscosidade a 60°C, P                    | 3972      |
| PVN                                      | - 0,4     |
| Após RTFOT                               |           |
| Perda em massa, % RTFOT                  | 0,08 (p)  |
| Viscosidade a 60°C, P                    | 10510     |
| Ductilidade a 25°C, cm                   | > 150     |
| Relação viscosidade após/antes RTFOT     | 2,7       |
| Cisalhamento $G^*/\text{sen}\delta$ (°C) | 64        |
| Penetração a 25°C, 100g, 5s, dmm         | 36        |
| Ponto de Amolecimento, °C                | 57        |
| Após RTFOT/PAV                           |           |
| Cisalhamento $G^*/\text{sen}\delta$ (°C) | 19        |
| Fluência – BBR, °C                       | -18       |
| Grau de Desempenho Superpave             | 64-28     |
| Classificação DNC                        | 50/60     |

Na Tabela 3.4.4 está a indicação das temperaturas de interesse para a classificação SHRP para a capital Fortaleza. Nesta tabela,  $T_{\text{máx.}}$  foi calculada a partir da média das máximas temperaturas do ar durante os sete dias mais quentes do ano ( $T_{\text{ar}}$ ) e da latitude local (lat.), através da equação 3.4.1. O PG do CAP é apresentado de duas formas, considerando apenas esta citada  $T_{\text{máx.}}$  e para o caso do tráfego local ser pesado. É possível perceber que o PG 64-28 é adequado para esta localidade.

$$T_{\text{máx.}} = (T_{\text{ar}} - 0,00618l \times \text{lat}^2 + 0,2289 \times \text{lat} + 42,2) \times (0,9545) - 17,7 \quad (3.4.1)$$

Tabela 3.4.4 - Temperatura máxima do pavimento na região de Fortaleza e grau de classificação SHRP do CAP necessário para atender esta condição (SOARES, 2000)

| Local     | Lat. (graus) | T <sub>ar</sub> (°C) | T <sub>máx.</sub> (°C) | PG (T <sub>máx.</sub> ) | PG (T <sub>máx.</sub> , tráfego) |
|-----------|--------------|----------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| Fortaleza | 3,46         | 34,4                 | 56                     | 58-                     | 64-                              |

### 3.5 - OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO DOPE

O DOPE escolhido para ser utilizado foi o CAP-DOP, fornecido pela Petrobras Distribuidora S.A. Este melhorador de adesividade é definido como um composto orgânico derivado do óleo de xisto (PETROBRAS, 2003). O fornecedor afirma que este produto além de melhorar a adesividade, aumenta a durabilidade da mistura asfáltica porque aumenta a resistência à desagregação dos agregados. É um material que pode ser facilmente misturado ao CAP, não afeta as especificações do mesmo e resiste às temperaturas de uso. O DOPE utilizado nesta pesquisa tem como especificações básicas às descritas na Tabela 3.5.1.

Tabela 3.5.1 - Especificações do CAP-DOP (PETROBRAS, 2003)

| Característica                              | Resultado            |
|---|----------------------|
| Aparência visual (aspecto a 25°C)           | Líquido e sem grumos |
| Ponto de fulgor (°C)                        | > 150                |
| Viscosidade a 40°C (sSF)                    | 85                   |
| Densidade a 25°C                            | 0,97 a 1,03          |
| Adesividade (teste de fervura por 1 minuto) | Cobertura > 90%      |

# CAPÍTULO 4

---

---

## 4 DOSAGEM MARSHALL

A intenção inicial deste estudo foi comparar o desempenho mecânico de uma mistura asfáltica utilizando escória de aciaria como agregado com uma outra mistura asfáltica dosada com agregados convencionais (mistura comparativa). A mistura comparativa escolhida foi uma mistura asfáltica do tipo CBUQ dosada no LMP/DET/UFC para o projeto “Estudo de Resíduo de Vácuo de Petróleo Nacional como Matéria Prima para Pavimentação” (CTPETRO, 2003). Os dois tipos de misturas foram dosados segundo a metodologia Marshall. As misturas, experimentais e comparativa, apresentam a mesma curva granulométrica em peso dos agregados, diminuindo assim o número de variáveis a serem avaliadas.

O presente estudo foi iniciado com a utilização da escória de aciaria em uma mistura asfáltica na proporção de 60,0% em peso do agregado mineral (denominada posteriormente de Mistura 2 - M2). Porém, nesta dosagem foi encontrada uma grande variação (até 44,0%) nos parâmetros volumétricos para os cps moldados com escória. Em vez de apenas quinze cps normalmente utilizados para a dosagem Marshall foi necessário moldar sessenta cps. Mesmo assim, a partir de cps moldados no Teor de Projeto (TP) realizou-se a caracterização mecânica desta mistura. Com relação aos ensaios de Resistência à Tração estática por compressão diametral (RT) e Módulo de Resiliência (MR) para cps moldados no TP, foram obtidos valores com pequena variação. Nesta ocasião foi detectado que o material, escória de aciaria, era bastante heterogêneo, isto é, grãos com mesmo tamanho possuíam diferentes características (tanto vítreo quanto poroso). Porém as dosagens continuaram sendo feitas com o material bruto, isto é, sem nenhuma separação de grãos com diferentes aspectos.

Depois de eliminado o risco de erro operacional, partiu-se para a dosagem de mais duas misturas asfálticas com escória, variando-se a proporção deste agregado no peso total, denominadas Mistura 1 (M1) e Mistura 3 (M3). Foram escolhidas proporções de escória abaixo e acima daquela escolhida para a M2, isto é, 75,6% (aproximadamente 80,0%) e 40,0%. Os cps moldados com estes teores de escória de aciaria também apresentaram grande variação no que diz respeito aos parâmetros

volumétricos. Estas misturas foram caracterizadas mecanicamente no TP e também em relação a esta caracterização houve grande variação.

Com a intenção de pesquisar possíveis fatores causadores da variação nos parâmetros volumétricos que vinha sendo encontrada, a compactação foi trocada de mecânica para manual. Esta mudança foi realizada para verificar se as variações encontradas não estavam associadas com problemas no compactador automático. Desta nova maneira, foram dosadas as Misturas 4 (M4) e 5 (M5) com as mesmas proporções de escória utilizadas nas Misturas 1 (M1) e 2 (M2), 40,0% e 60,0% respectivamente. As variações nos parâmetros volumétricos persistiram. Foi, contudo, realizada a caracterização mecânica destas misturas não apenas para o TP, mas para todos os teores utilizados na dosagem a fim de verificar se havia alguma tendência com relação aos demais teores. A grande variação nos valores de MR persistiu. Estas variações, bem como todas as outras já mencionadas, serão discutidas e quantificadas neste capítulo.

Como última tentativa de obter resultados mais homogêneos, o material foi separado manualmente, com a intenção de reduzir a heterogeneidade do rejeito, e a dosagem da Mistura 6 (M6), com 40,0% de escória, foi realizada. O material escolhido para ser utilizado foi aquele de aspecto poroso por ser o mais abundante, descartando-se os agregados de aspecto vítreo. Esta separação também pode ser feita em grande escala, visto que estes dois tipos de escória são vazados em dois momentos distintos do processo siderúrgico, a escória porosa é proveniente do forno de arco elétrico (chamada de escória de refino oxidante) e a escória lisa é proveniente do forno panela (chamada de escória de refino redutor). Além desta separação, as misturas, antes de serem utilizadas para a moldagem dos cps, foram condicionadas durante duas horas em estufa com a temperatura de mistura (aproximadamente 160°C). Este condicionamento foi realizado para que pudesse ocorrer uma melhor interação ligante-agregado, visto que o mesmo é bastante poroso. Depois de tomadas estas precauções a variação nos parâmetros volumétricos diminuiu para um valor considerado aceitável neste estudo (< 10,0%). Foi possível obter-se o TP da maneira convencional. A M6 foi caracterizada mecanicamente, no TP, para verificação da não variação dos resultados dos ensaios mecânicos. Esta última mistura foi caracterizada no LMP/DET/UFC e no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ. Essa decisão foi tomada a fim de verificar a dispersão dos resultados para diferentes equipamentos e operadores.

A variação na preparação da amostra está sintetizada no fluxograma da Figura 4.1. Maiores detalhes em relação à metodologia de pesquisa estão no texto que se segue.

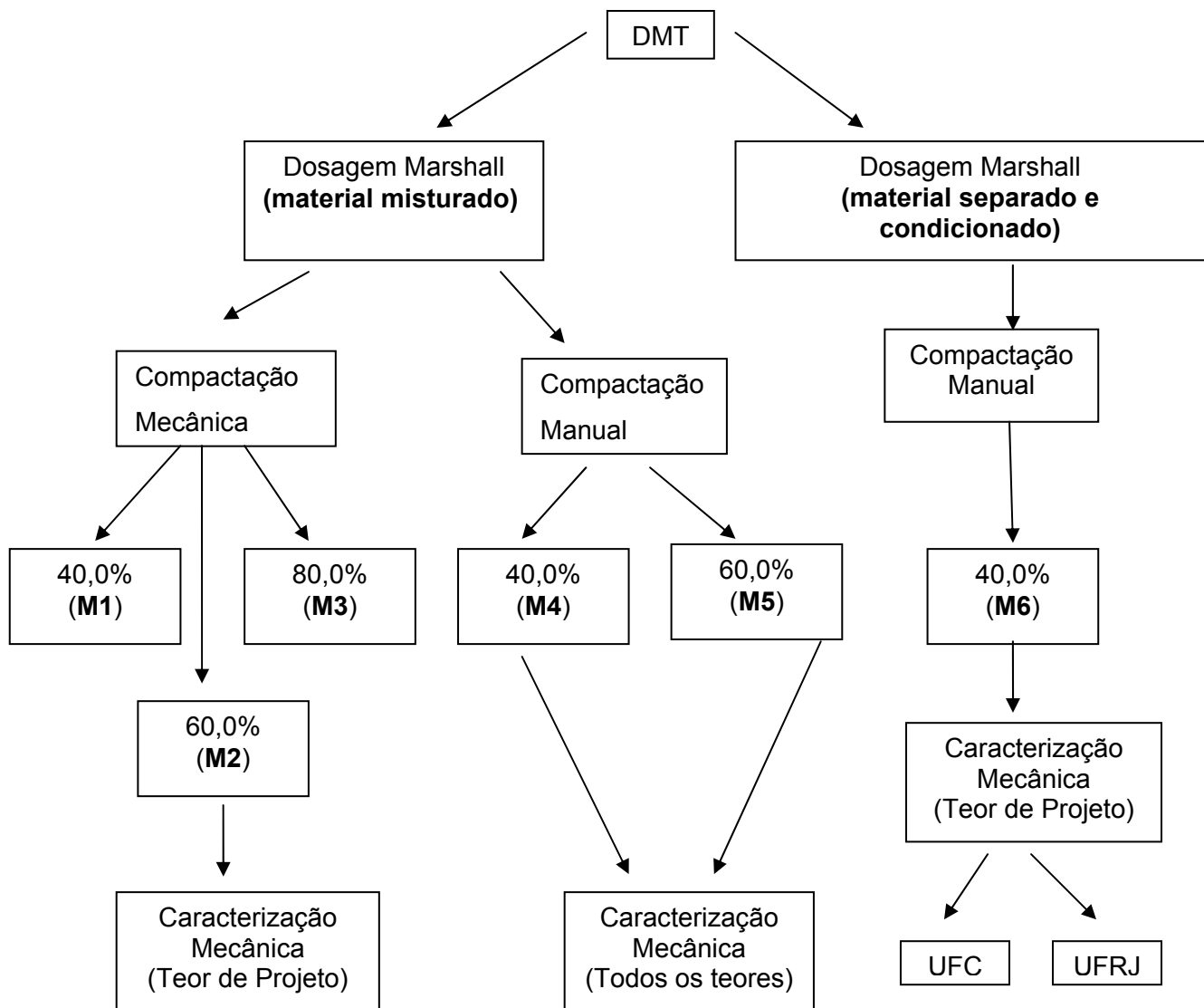


Figura 4.1 - Metodologia adotada nesta pesquisa

#### 4.1 - DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA (DMT)

Encontra-se em ROBERTS *et al.* (1996) a definição de DMT como a razão entre a massa total de agregados e ligante asfáltico e a soma dos volumes de agregados, dos vazios impermeáveis, dos vazios permeáveis não preenchidos com asfalto e do total de asfalto. Este parâmetro é importante, porque é necessário para o cálculo de vários outros, como (VASCONCELOS *et al.*, 2003):

- Densidade efetiva do agregado;

- Absorção de asfalto pelo agregado;
- Teor de asfalto efetivo;
- Volume de vazios (Vv);
- Valores alvo para compactação de misturas asfálticas compactadas com compactador giratório (ASTM D 2041, 2000);
- Massa específica de misturas asfálticas já compactadas em campo.

No Brasil, a DMT costuma ser calculada pela equação 4.1.1:

$$DMT = \frac{P_{CAP} + P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_{CAP}}{D_{CAP}} + \frac{P_1}{D_1} + \frac{P_2}{D_2} + \dots + \frac{P_n}{D_n}} \quad (4.1.1)$$

Onde:  $P_{CAP}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_n$  = proporção dos materiais;

$D_{CAP}$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  e  $D_n$  = densidades reais dos materiais.

Para o presente estudo, a DMT, além de calculada pela expressão 4.1.1, foi medida em laboratório com aplicação de vácuo, segundo os procedimentos da norma ASTM D 2041 (2000) e nesta situação passou a ser chamada de Densidade Máxima Medida (DMM). As vantagens de se usar a DMM são:

- Não precisar determinar as densidades reais individuais dos agregados;
- Descontar os poros preenchidos com ligante e não a absorção total medida com água, que é muito menos viscosa que o ligante.

O ensaio é realizado seguindo os passos abaixo:

- Realizar a mistura de agregados e ligante nas proporções pré-estabelecidas em um recipiente metálico de peso conhecido;
- Preencher o recipiente com água (25°C) suficiente para cobrir a mistura;
- Aplicar, durante 15 minutos, uma pressão residual no manômetro de 30 mm de mercúrio no recipiente contendo a mistura para expulsar os vazios existentes entre os filmes de ligante;
- Restabelecer, no recipiente, a pressão ambiente;
- Colocar o conjunto, recipiente + mistura + água, imerso em água durante 10 minutos;
- Pesquisar o conjunto, recipiente + mistura + água, imerso em água.

A DMM, para este caso, é obtida pela seguinte fórmula:

$$DMM = \frac{A}{A - (C - B)} \quad (4.1.2)$$

Onde A: massa da mistura seca ao ar (g);

B: massa do recipiente metálico imerso em água (g);

C: massa do recipiente + mistura, imersos em água (g).

A Figura 4.1.1 apresenta uma visão geral do equipamento para a realização do ensaio bem como do medidor de pressão, utilizados neste estudo.



(a) Equipamento para medição da densidade máxima



(b) Detalhe do medidor de pressão

Figura 4.1.1 - Equipamento para medição da densidade máxima

As DMMs para as misturas estudadas foram obtidas com a mesma proporção dos materiais utilizados na moldagem dos cps, para as M1, M2 e M3 (com 40,0%; 60,0% e 80,0% de escória, respectivamente), porém com uma massa de 1.600 g. As misturas foram feitas com o material misturado, isto é, da forma que o mesmo foi obtido, apenas fracionado. Para as misturas M4 e M5 utilizaram-se os valores de DMT e DMM das M1 e M2, respectivamente. Essa decisão foi tomada porque a única diferença existente entre as M1 e M3, M2 e M4, é o tipo de compactação. Tanto os valores calculados (DMT), como os medidos (DMM), para os três tipos de misturas com escória de aciaria, estão na Tabela 4.1.1. Para os valores calculados, as densidades reais utilizadas são as médias dos três ensaios realizados para cada material. Em relação aos valores obtidos, foram realizados três ensaios e o valor apresentado na Tabela 4.1.1 é uma média dos resultados encontrados. Os teores de CAP (%) foram escolhidos de acordo com a dosagem das misturas asfálticas. Os valores podem ser melhor visualizados na Figura 4.1.2.

Tabela 4.1.1 - Valores de Densidade Máxima Teórica (DMT) e de Densidade Máxima Medida (DMM) das misturas 1, 2 e 3, com 40,0%; 60,0% e 80,0% de escória respectivamente

| %         | Teor de CAP (%) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | 5,0             |       | 5,5   |       | 6,0   |       | 6,5   |       | 7,0   |       | 7,5   |       | 8,0   |       |
| Escória   | DMT             | DMM   | DMT   | DMM   | DMT   | DMM   | DMT   | DMM   | DMT   | DMM   | DMT   | DMM   | DMT   | DMM   |
| 40,0 (M1) | 2,617           | 2,685 | 2,596 | 2,666 | 2,575 | 2,637 | 2,555 | 2,600 | 2,535 | 2,583 | 2,515 | 2,560 | 2,495 | 2,546 |
| 60,0 (M2) | 2,711           | 2,734 | 2,688 | 2,718 | 2,665 | 2,695 | 2,643 | 2,669 | 2,621 | 2,639 | 2,599 | 2,613 | 2,578 | 2,595 |
| 80,0 (M3) | 2,847           | 2,929 | 2,829 | 2,897 | 2,795 | 2,895 | 2,776 | 2,849 | 2,750 | 2,838 | 2,724 | 2,808 | 2,699 | 2,786 |

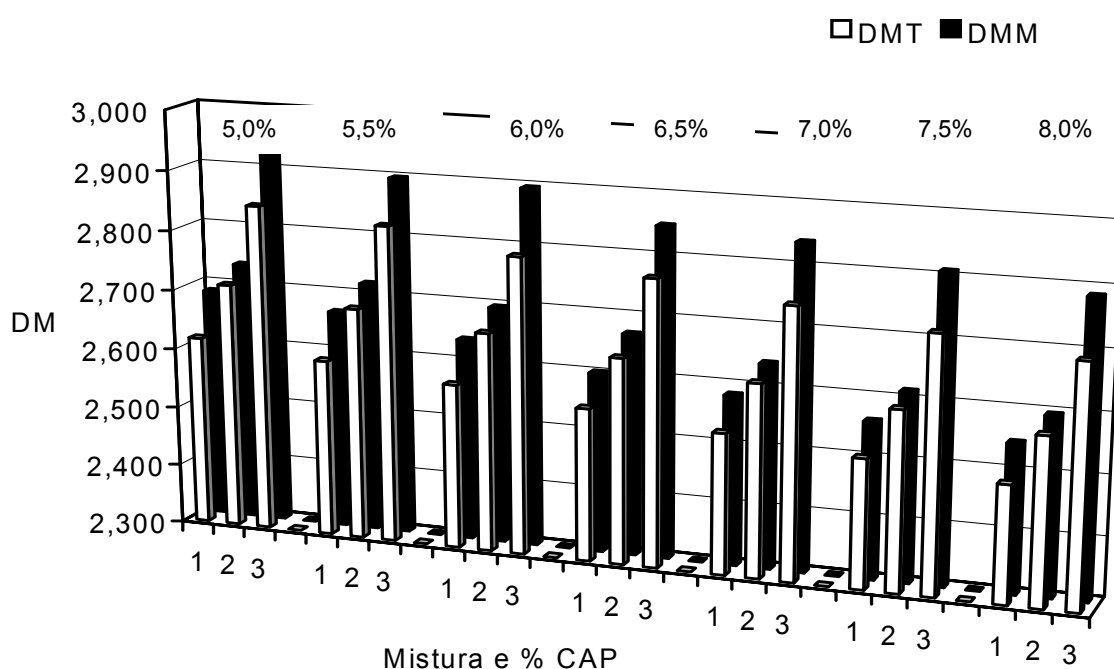


Figura 4.1.2 - Valores de Densidade Máxima Teórica (DMT) e Densidade Máxima Medida (DMM) das misturas 1, 2 e 3 com 40,0%; 60,0% e 80,0% de escória, respectivamente versus teor de CAP

Acreditava-se que um maior valor de DMT seria obtido com a utilização da fórmula, já que desta maneira um menor volume é considerado, conforme encontraram VASCONCELOS *et al.* (2003), porém para este estudo isto não foi constatado. Como é possível perceber, na Figura 4.1.2, para todas as misturas e em todos os teores de CAP, os valores calculados (DMT) são inferiores aos medidos (DMM). Os valores, de DMT e DMM, aumentaram com o aumento do teor de escória de aciaria utilizado nas misturas. Isto era esperado, visto que a escória é mais densa que os outros componentes da mistura.

Alguns valores, tanto calculados quanto medidos, para a mistura com 60,0% de escória podem ser considerados iguais, visto que a repetibilidade do ensaio é de 0,02 (ASTM D 2041). A menor diferença encontrada foi de 0,01 (60,0% de escória e 7,5% de ligante) e a maior de 0,1 (80,0% de escória e 6,0% de ligante). De maneira geral, as diferenças encontradas entre os citados valores foram, em ordem crescente, mistura com 60,0% < mistura com 40,0% < mistura com 80,0%. Acreditava-se que quanto maior fosse a proporção de escória utilizada, maior seriam as diferenças encontradas entre os valores da DMT e DMM, porém a heterogeneidade do rejeito deve ter afetado estes resultados.

As DMMs para a mistura com 40,0% de escória de aciaria como agregado, com material separado e condicionado em estufa por duas horas (M6), também foram medidas. Os valores estão na Tabela 4.1.2, sendo estes uma média dos resultados encontrados em três ensaios. Os teores de CAP (%) foram escolhidos de acordo com a dosagem das misturas asfálticas. Os valores podem ser melhor visualizados na Figura 4.1.3. Percebe-se que os valores de DMM com o material separado (somente poroso) foi superior aos calculados e medidos com o material misturado. Apesar de não terem sido obtidas as densidades reais da escória separada (somente material poroso), é justificável que os valores de DMM encontrados com o uso apenas do material poroso sejam superiores aos valores encontrados para o material misturado. Para o primeiro caso, DMM somente com material poroso, o volume considerado torna-se menor do que aquele considerado com a utilização do material misturado.

Tabela 4.1.2 - Valores de Densidade Máxima Medida (DMM) para a mistura 6 (40,0% de escória)

| % Escória | Teor de CAP (%) |       |       |       |       |       |
|-----------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | 5,0             | 5,5   | 6,0   | 6,5   | 7,0   | 7,5   |
| 40,0 (M6) | 2,702           | 2,679 | 2,663 | 2,628 | 2,595 | 2,579 |

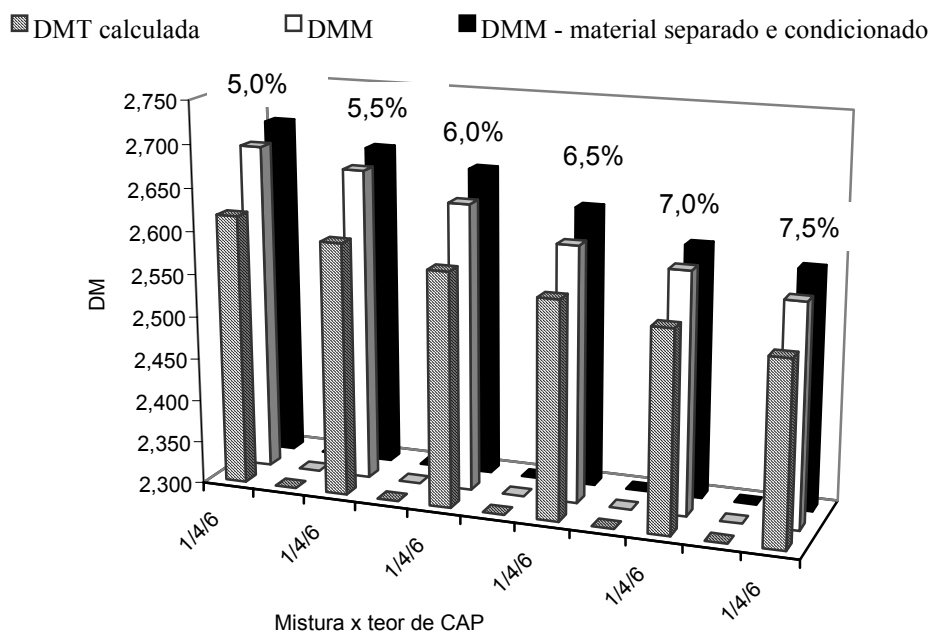


Figura 4.1.3 - Valores de Densidade Máxima Teórica (DMT) e Densidade Máxima Medida (DMM) para a mistura 6 (40,0% de escória), material no estado original (misturado e sem condicionamento) e separado e condicionado versus teor de CAP

Tanto os valores de DMT quanto os de DMM foram testados nas dosagens Marshall a fim de verificar a diferença que seria encontrada quando da determinação dos TPs. Os valores encontrados estão na Tabela 4.1.3. Para algumas misturas, não foi possível obter-se o TP com os cps moldados, visto que os parâmetros volumétricos encontrados estavam fora dos limites estabelecidos pelo método utilizado nesta pesquisa (SOARES *et al.*, 2000). Os valores encontrados, utilizando as duas densidades máximas (calculadas e medidas) para a M2 (60,0% de escória) podem ser considerados iguais segundo a variação admitida em campo de  $\pm 0,3\%$ . Para as outras misturas, os valores podem ser considerados diferentes até 0,6% (caso da M4) (DNER, 1997).

Tabela 4.1.3 - Valores de Teores de Projeto (TP) (%) calculados a partir de valores de Densidade Máxima Teórica (DMT) e Densidade Máxima Medida (DMM) para as misturas experimentais

| TP (%)       | Mistura |     |     |     |     |     |
|--------------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|
|              | 1       | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
| TP (%) - DMT | 6,2     | 6,9 | -   | 5,7 | -   | 6,2 |
| TP (%) - DMM | 6,6     | 7,2 | 6,8 | 6,3 | 6,2 | 6,6 |

Para os casos em que foi necessário moldar cps no TP, as DMTs e DMMs utilizadas foram as que estão na Tabela 4.1.4. Para as M1 e M6 foram utilizados os valores de DMT e para as M2 e M3 foram utilizados os valores de DMM. Os valores para as misturas M4 e M5 não estão reportados nesta Tabela porque para estas misturas não foi necessária a moldagem de cps no TP, porque a caracterização mecânica foi realizada com os mesmos cps da dosagem.

Tabela 4.1.4 - Valores de Densidade Máxima Teórica (DMT) (para as misturas 1 e 6) e Densidade Máxima Medida (para as misturas 2 e 3) para o Teor de Projeto (TP)

| Parâmetros | Mistura |       |       |       |
|------------|---------|-------|-------|-------|
|            | 1       | 2     | 3     | 6     |
| DM         | 2,561   | 2,639 | 2,843 | 2,561 |
| TP (%)     | 6,2     | 7,0   | 6,8   | 6,2   |

Para o caso de materiais pétreos, os valores de DMT devem ser aproximadamente iguais aos valores de DMM. As diferenças encontradas podem ser justificadas pelo fato de que o material em teste é não convencional, poroso e bastante heterogêneo. Além deste fato, a correta interpretação da norma é que a pressão a ser aplicada é a pressão residual  $\Delta = 30$  mm (diferença entre -760 mm e -730 mm). Uma pressão bem abaixo da exigida em norma foi de fato aplicada. A bomba de vácuo utilizada não possui capacidade para aplicação de pressão de vácuo acima de 140 mm de mercúrio. Algumas hipóteses foram levantadas.

A primeira hipótese para as diferenças encontradas foi que a pressão feita pelo equipamento de vácuo, a má adesividade ligante-escória e a alta porosidade da escória tivessem feito com que os vazios tidos como “impermeáveis” nos agregados de escória tivessem sido atingidos e passassem a ser preenchidos com água e/ou ligante. Isto teria levado a um maior valor de DMM se comparada com a DMT. A Figura 4.1.4 apresenta um esquema da interação ligante-agregado durante o ensaio de DMM. Esta hipótese, posteriormente, foi descartada por considerarmos que estes vazios são de fato inatingíveis.

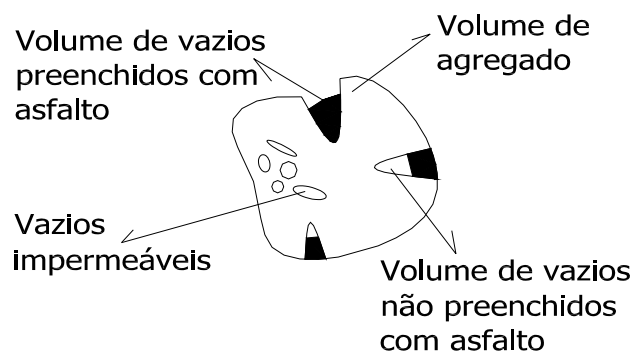


Figura 4.1.4 - Esquema agregado com ligante (VASCONCELOS *et al.*, 2003)

A segunda hipótese levantada foi que as diferenças estariam sendo encontradas devido à diferença entre a obtenção das densidades reais (utilizadas no cálculo da DMT) e da DMM. Isto é, a DMM é obtida com utilização do vácuo enquanto que as densidades reais não. Isto estaria levando a menores valores de densidades reais e conseqüentemente a menores valores de DMT (MARQUES, 2004).

A fim de verificar estes fatos, optou-se por determinar as densidades reais dos agregados com aplicação de vácuo. O procedimento utilizado foi o mesmo para obtenção da DMM, sem a utilização de ligante. Foram feitas três determinações e as diferenças persistiram, os valores de DMT tornaram-se ainda menores se comparados com os valores de DMM. Acredita-se que a perda de finos durante a imersão da mistura de agregados levou a estes resultados.

Optou-se então pela obtenção somente da densidade da escória com aplicação de vácuo. A densidade foi obtida segundo os procedimentos da norma ME 081/98. Para provocar a expulsão do ar da amostra, a mesma foi submetida a uma fervura de aproximadamente 15 minutos e posteriormente a uma pressão de 30 mm de mercúrio no equipamento Rice. O resultado encontrado (média de três determinações) para a densidade real da escória foi de 3,59. Este valor foi 8,0% superior ao encontrado com o procedimento convencional (DNER – ME081/98). Apesar da pressão aplicada ser inferior a recomendada pela norma ASTM D 2041 (2000), conforme mencionado anteriormente, tanto a DMM quanto a densidade real da escória foram obtidas da mesma forma.

Os ensaios para obtenção das densidades reais da escória miúda (passando na peneira nº 4) e da areia também foram refeitos. O procedimento convencional (DNER – ME 084/95) foi adaptado da mesma maneira que o descrito para o ensaio realizado

com a escória graúda. O valor da densidade real da escória miúda passou de 3,51 para 3,67 e da areia de 2,61 para 2,62. Os valores encontrados para as DMTs calculadas com utilização destes valores de densidades reais estão na Tabela 4.1.5.

Tabela 4.1.5 - Valores de Densidade Máxima Teórica com a obtenção das densidades reais de maneira convencional (DMT) e não-convencional (DMT\*) das misturas 1, 2 e 3, com 40,0%; 60,0% e 80,0% de escória respectivamente

| % Escória | Teor de CAP (%) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | 5,0             |       | 5,5   |       | 6,0   |       | 6,5   |       | 7,0   |       | 7,5   |       | 8,0   |       |
|           | DMT             | DMT*  | DMT   | DMT*  | DMT   | DMT*  | DMT   | DMT*  | DMT   | DMT*  | DMT   | DMT*  | DMT   | DMT*  |
| 40,0 (M1) | 2,617           | 2,690 | 2,596 | 2,667 | 2,575 | 2,645 | 2,555 | 2,623 | 2,535 | 2,602 | 2,515 | 2,580 | 2,495 | 2,560 |
| 60,0 (M2) | 2,711           | 2,816 | 2,688 | 2,790 | 2,665 | 2,765 | 2,643 | 2,741 | 2,621 | 2,717 | 2,599 | 2,693 | 2,578 | 2,670 |
| 80,0 (M3) | 2,847           | 2,980 | 2,829 | 2,966 | 2,795 | 2,922 | 2,776 | 2,906 | 2,750 | 2,876 | 2,724 | 2,847 | 2,699 | 2,819 |

Como era de se esperar, as DMTs calculadas com o valor de densidade real da escória com o procedimento adaptado (utilização de fervura e vácuo) foram superiores às calculadas com a densidade real obtida de maneira convencional (DNER – ME 081/98). Os valores calculados foram ainda superiores aos obtidos (DMM), como era esperado e compatível com o encontrado na literatura (VASCONCELOS e SOARES, 2003). Estas diferenças podem ser melhor visualizadas nas Figuras 4.1.5 e 4.1.6.

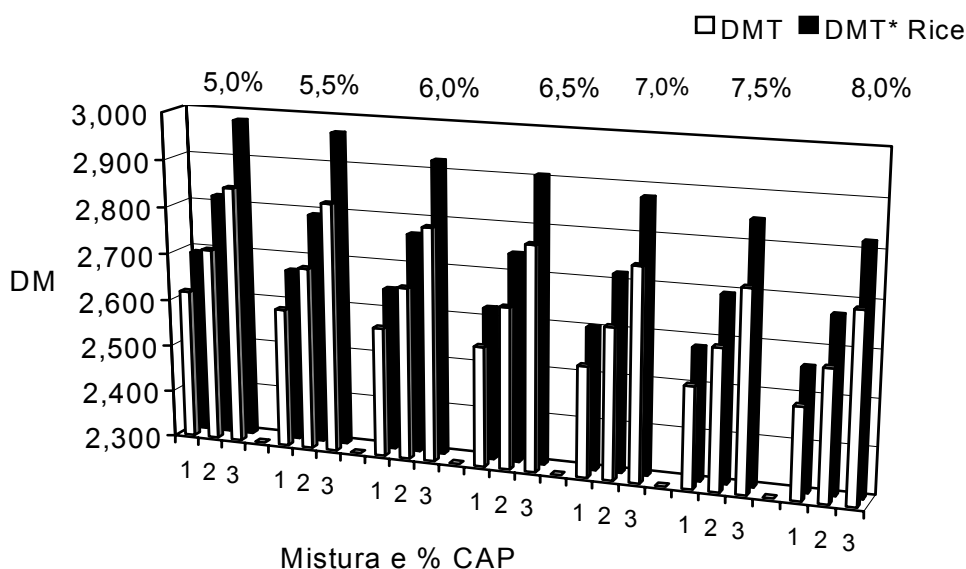


Figura 4.1.5 - Valores de Densidade Máxima Teórica (DMT) e Densidade Máxima Teórica Rice (DMT\*) para as misturas 1, 2 e 3 com 40,0%; 60,0% e 80,0% de escória, respectivamente versus teor de CAP

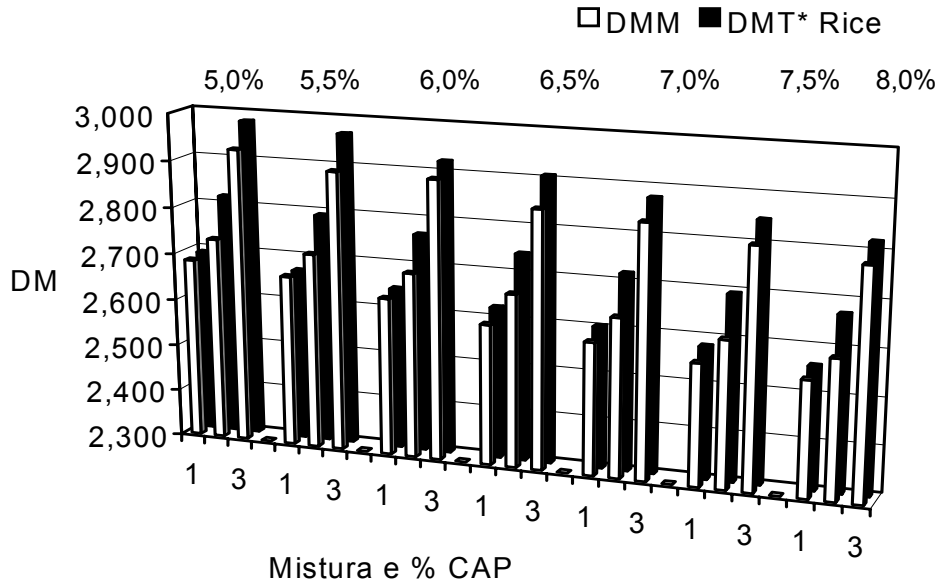


Figura 4.1.6 - Valores de Densidade Máxima Medida (DMM) e Densidade Máxima Teórica Rice (DMT\*) para as misturas 1, 2 e 3, com 40,0%; 60,0% e 80,0% de escória, respectivamente versus teor de CAP

Apesar das diferenças, optou-se por utilizar os valores de DMM, ao invés dos calculados, por acreditar-se que estes são mais realistas. Para as misturas com 40,0% de escória, foi utilizada a DMT (convencional, sem o procedimento para a obtenção da densidade real adaptado). Isto ocorreu devido à quebra do equipamento de medida da densidade no período em que as dosagens destas misturas estavam sendo realizadas e porque a decisão por obter as densidades reais com o procedimento adaptado só foi tomada no final da pesquisa. Nesta época as dosagens e a caracterização das misturas já haviam sido feitas, logo não havia tempo hábil para a realização desta mudança. Acredita-se que estes fatos não serão relevantes para este estudo devido à grande dispersão encontrada para os parâmetros volumétricos, como será discutido a seguir.

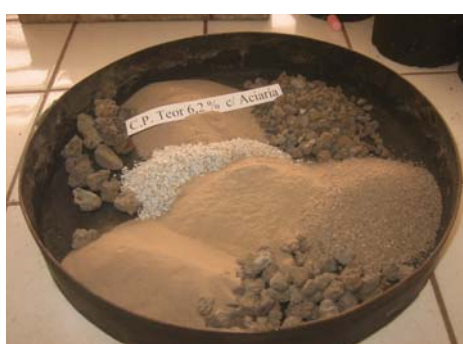
## 4.2 - AGREGADOS

A mistura comparativa escolhida foi um CBUQ convencional tendo como agregados brita ¾" e 3/8" (origem granítica), areia de campo, pó de pedra e filer mineral. A granulometria desta mistura, bem como os limites da faixa C do DNER para CBUQ, podem ser vistos na Tabela 4.2.1 (CTPETRO, 2003).

Tabela 4.2.1 - Granulometria da mistura comparativa e limites da faixa C do DNER para CBUQ

| Peneira | Abertura<br>(mm) | Granulometria<br>Comparativa | Faixa C - % passando, em peso |                 | Tolerâncias fixas<br>de projeto<br>(%) |
|---------|------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------|--|
|         |                  |                              | Limite inferior               | Limite superior |  |
| ¾"      | 19,1             | 100,0                        | 100,0                         | 100,0           | ± 7,0                                  |
| ½"      | 12,7             | 89,4                         | 85,0                          | 100,0           | ± 7,0                                  |
| 3/8"    | 9,5              | 75,6                         | 75,0                          | 100,0           | ± 7,0                                  |
| Nº 4    | 4,8              | 58,4                         | 50,0                          | 85,0            | ± 5,0                                  |
| Nº 10   | 2,0              | 47,2                         | 30,0                          | 75,0            | ± 5,0                                  |
| Nº 40   | 0,42             | 28,3                         | 15,0                          | 40,0            | ± 5,0                                  |
| Nº 80   | 0,18             | 15,4                         | 8,0                           | 30,0            | ± 2,0                                  |
| Nº 200  | 0,074            | 7,2                          | 5,0                           | 10,0            | ± 2,0                                  |

O estudo teve início com uma mistura asfáltica do tipo CBUQ que utilizou escória de aciaria (60,0%) e areia de campo, como agregados (M2), como é ilustrado na Figura 4.2.1(a). No decorrer da pesquisa mais duas proporções de escória foram testadas, 40,0% e 80,0%, aproximadamente. As porcentagens de uso dos agregados para as três proporções de escória estão na Tabela 4.2.2. Neste trabalho optou-se por utilizar a faixa C do DNER para revestimentos do tipo CBUQ por ser a mais usada no estado do Ceará. Caso fosse feita a opção pelas faixas A ou B do DNER seria necessária uma correção granulométrica das misturas de escória e agregados utilizados. O fracionamento da escória pode ser visualizado na Figura 4.2.1(b).



(a) Mistura de agregados naturais e escória



(b) Fracionamento escória de aciaria

Figura 4.2.1 - Proporção de agregados e fracionamento da escória

Percebe-se, na Figura 4.2.2 que as misturas experimentais (com escória) e comparativa (com brita de origem granítica) se enquadram nos limites da faixa C do

DNER para revestimentos do tipo CBUQ, aproximando-se do limite inferior para peneiras com abertura igual ou acima de 10 mm. Com a intenção de diminuir o número de variáveis nas misturas, optou-se por fazer com que as curvas granulométricas das misturas com escória coincidisse com a curva da mistura de referência (em peso dos agregados, mas não em volume). A semelhança das quatro curvas é verificada, visto que a norma DNER – ES 313/97 estabelece tolerâncias fixas de projeto.

Tabela 4.2.2 - Porcentagem de uso dos agregados nas misturas experimentais com escória

| Misturas                    |      |                         |      |                       |      |
|-----------------------------|------|-------------------------|------|-----------------------|------|
| 40,0% escória (M1, M4 e M6) |      | 60,0% escória (M2 e M5) |      | 80,0% escória (M3)    |      |
| Material                    | %    | Material                | %    | Material              | %    |
| Escória (3/4" e 1/2")       | 10,6 | Escória (3/4" e 1/2")   | 10,6 | Escória (3/4" e 1/2") | 10,6 |
| Escória (1/2" e 3/8")       | 13,8 | Escória (1/2" e 3/8")   | 13,8 | Escória (1/2" e 3/8") | 13,8 |
| Escória (3/8" e Nº 4)       | 15,6 | Escória (3/8" e Nº 4)   | 16,9 | Escória (3/8" e Nº 4) | 17,0 |
| A. Campo (Nº 4 e 10)        | 13,0 | Escória (Nº 4 e 10)     | 10,8 | Escória (Nº 4 e 10)   | 11,0 |
| A. Campo (Nº 10 e 40)       | 15,0 | Escória (Nº 10 e 40)    | 4,8  | Escória (Nº 10 e 40)  | 12,1 |
| A. Campo (Nº 40 e 80)       | 15,0 | Areia de Campo          | 43,2 | Escória (Nº 40 e 80)  | 7,1  |
| A. Campo (Nº 80 e 200)      | 10,0 | -                       | -    | Escória (Nº 80 e 200) | 4,0  |
| Fíler mineral               | 7,0  | -                       | -    | Areia de Campo        | 20,0 |

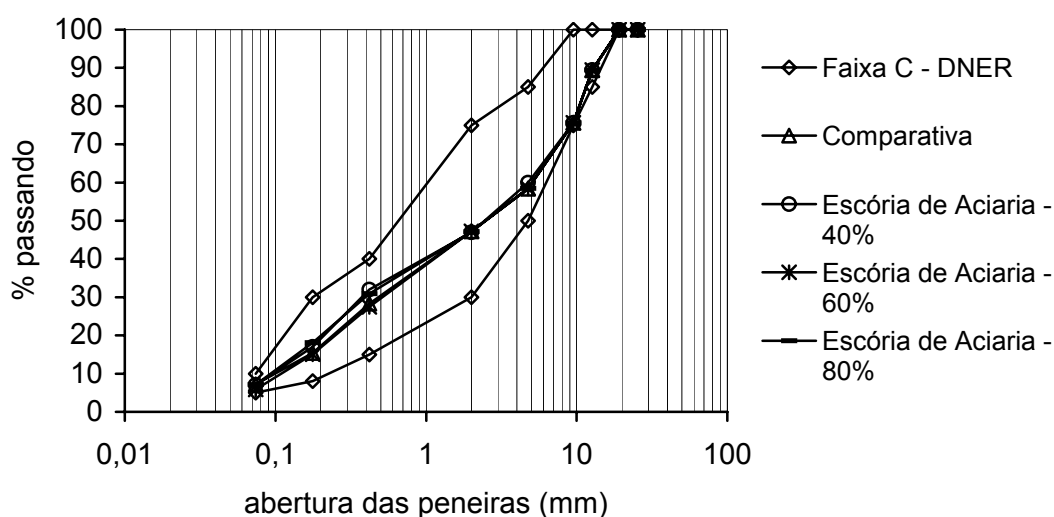


Figura 4.2.2 - Enquadramento das misturas de agregados (experimentais e comparativa) na faixa C do DNER

Apesar da não utilização da dosagem Superpave nesta pesquisa, a título de curiosidade, as granulometrias das misturas experimentais e comparativa foram avaliadas em relação a esta metodologia. Percebe-se na Figura 4.2.3 que as mesmas atendem aos requisitos propostos no que diz respeito aos pontos de controle e a zona de restrição (MOTTA *et al.*, 1994).

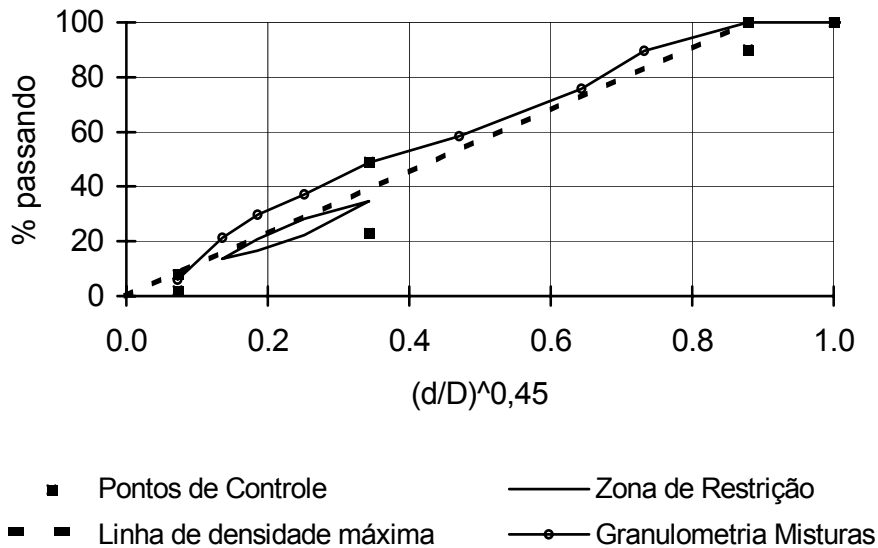


Figura 4.2.3 - Granulometria Superpave das misturas

#### 4.3 - TEOR DE PROJETO (TP)

Os TP's foram baseados num valor selecionado a partir dos teores obtidos para atender os limites do DNER de Volume de vazios ( $V_v$  entre 3,0% a 5,0%) e Relação Betume-Vazios (RBV entre 75,0% a 82,0%) para CBUQ. O  $V_v$  e o RBV são obtidos por meio das Equações 4.3.1 e 4.3.2, respectivamente.

$$V_v = \frac{DM - D_a}{DM} \times 100\% \quad (4.3.1)$$

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \quad (4.3.2)$$

Onde: DM = Densidade Máxima (a depender da mistura, DMT ou DMM)

$D_a$  = densidade aparente da mistura;

VCB = Vazios Com Betume;

VAM = Vazios no Agregado Mineral.

$$D_a = \frac{P_{ar}}{P_{ar} - P_{imerso}} \quad (4.3.3)$$

$$VCB = \frac{D_a \times P_{CAP}}{D_{CAP}} \quad (4.3.4)$$

$$VAM = Vv + VCB \quad (4.3.5)$$

Onde:  $P_{CAP}$  = teor de CAP;

$D_{CAP}$  = densidade do CAP.

Para obtenção do TP foram moldados cinco grupos de cps com diferentes teores de ligante, três cps para cada grupo. O TP foi estimado e com incrementos de 0,5% foram moldados dois grupos acima e dois grupos abaixo do teor estimado. Com os valores de Vv e RBV encontrados para estes quinze cps foi obtido o gráfico Vv e RBV versus teor de CAP (%). A partir dos quatro limites especificados, são obtidos quatro valores de CAP. O TP é a média dos dois valores centrais. Este método é adotado DNER e foi descrito em SOARES *et al.* (2000). Por exemplo, no caso representado pela Figura 4.3.1, o TP será a média dos valores centrais (6,9 e 7,2), isto é, 7,1 aproximadamente.

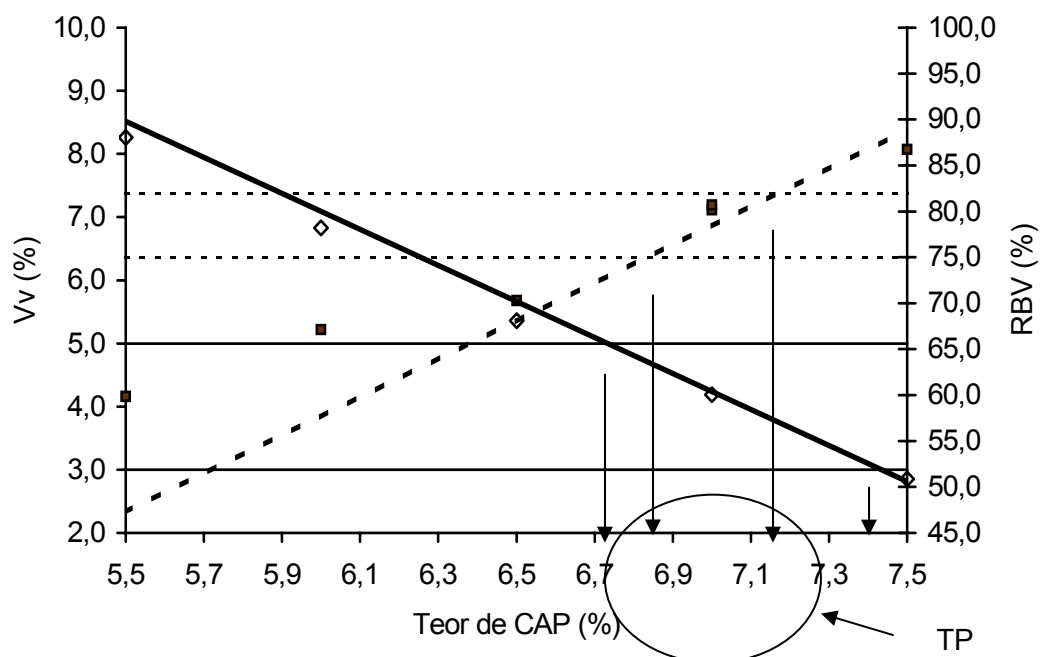


Figura 4.3.1 - Exemplo de obtenção do Teor de Projeto (TP)

Os cps foram compactados com um esforço de 50 golpes por camada, igual ao que se utilizou para a mistura comparativa simulando um tráfego médio. A temperatura do ligante para a realização da mistura ficou entre 155 e 162°C e a temperatura de

compactação entre 144 e 149°C. Estas temperaturas foram determinadas a partir da viscosidade do CAP utilizado (DNER, 1995a) (Figura 4.3.2).

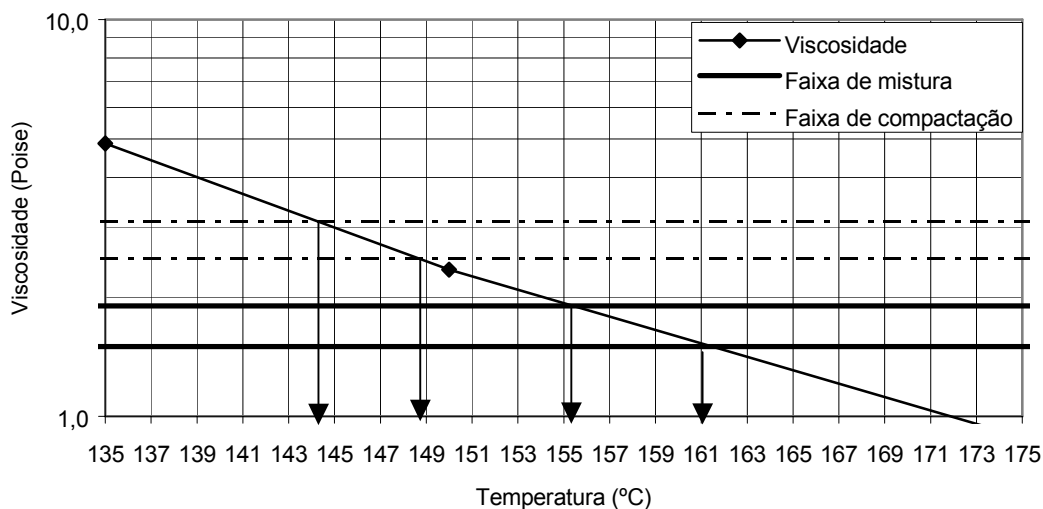
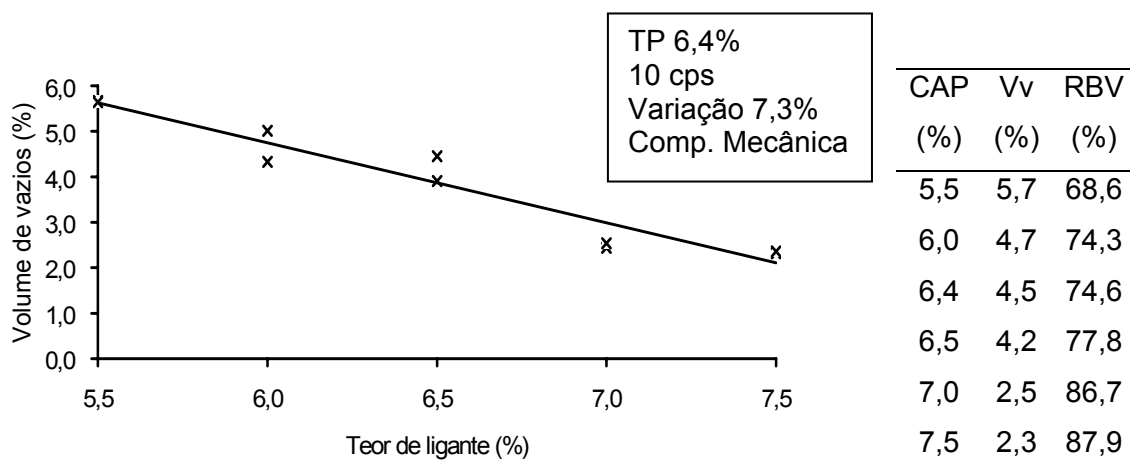


Figura 4.3.2 - Viscosidade (Poise) da amostra de CAP 50/60 Fazenda Alegre versus temperatura (°C)

A mistura comparativa, utilizada como referência neste estudo apresentou os parâmetros volumétricos mostrados na Figura 4.3.3. O TP encontrado foi de 6,4% de CAP e a maior variação no Vv foi de 7,3% para o teor de 6,0% de CAP.



(a) Variação do Vv com o teor de ligante

(b) Vv e RBV médios por teor de ligante

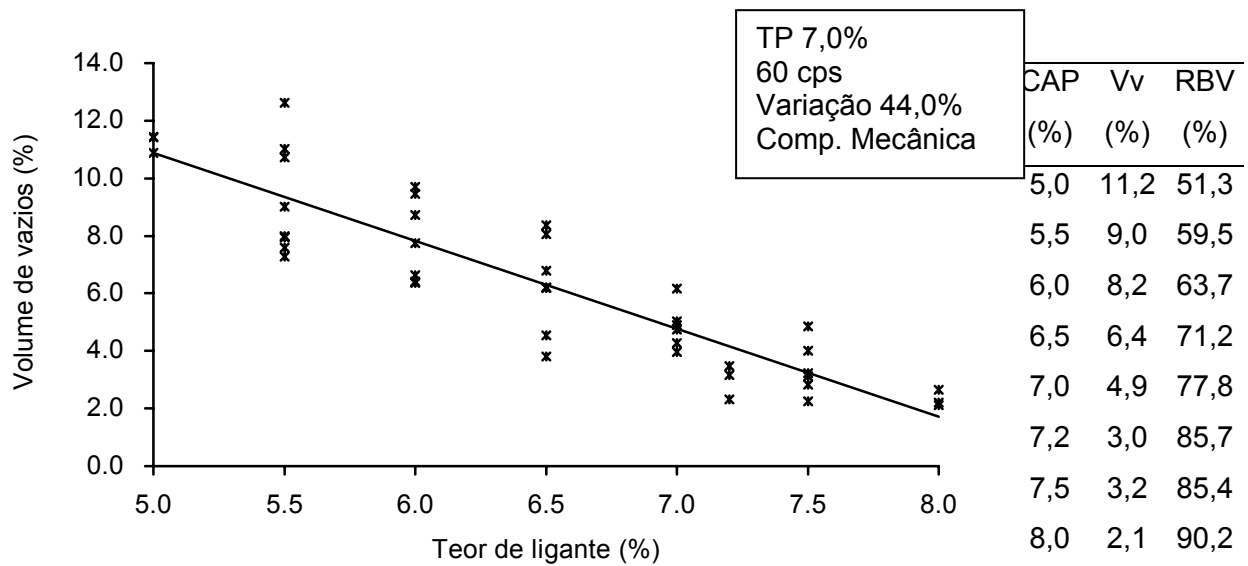
Figura 4.3.3 - Variação dos parâmetros volumétricos (Vv e RBV) para a mistura comparativa

A M2 (60,0% de escória) foi compactada mecanicamente. Primeiramente, os cps foram moldados com 1.200 g, porém os mesmos não atingiram a altura especificada

(63,5 mm  $\pm$  1,3 mm) pela norma DNER – ME 043/95 (Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall). Optou-se então por moldá-los com 1.300 g. De certa forma isto já era esperado, porque a densidade da escória é maior do que a da brita, logo um menor volume foi utilizado na confecção dos cps com 1.200 g. As médias dos valores de Vv e RBV encontrados estão na Figura 4.3.4. O valor do TP encontrado foi de 7,2%. Optou-se por utilizar o teor de 7,0% de ligante, visto que com este teor os parâmetros Vv e RBV estão dentro dos limites estabelecidos pelo DNER e os cps não apresentaram exsudação, o que foi observado com o teor de 7,2%. Destaca-se novamente que por tratar-se de uma mistura não convencional, a metodologia teve que ser adaptada.

Percebe-se que, o Vv e o RBV diminuem e aumentam, respectivamente, com o aumento do teor de ligante, exceto para o teor de 7,2%. Em relação ao Vv, somente as misturas com teores de ligante de 7,0%; 7,2% e 7,5% encontram-se dentro dos limites estabelecidos pelo DNER para CBUQ. Para o RBV, somente a mistura com 7,0% de ligante apresentou valores dentro da faixa recomendada pelo DNER.

Inicialmente, a intenção era moldar três cps para cada um dos teores de 5,0%; 5,5%; 6,0%; 6,5% e 7,0% de ligante. Todavia, os valores encontrados para Vv e RBV foram muito discrepantes, apesar de terem sido mantidas todas as variáveis do ensaio. Foram encontradas diferenças de até 44,0% para o teor de 7,5% de CAP, conforme Figura 4.3.4(a). Um total de sessenta cps foi moldado. Aqueles que apresentaram diferenças acima de 10,0% em relação à média dos parâmetros volumétricos foram descartados. Esta tolerância em relação à variação de Vv e RBV foi estabelecida visto que a variação permitida do teor de ligante é de  $\pm$  0,3% (DNER, 1997a) e da densidade dos agregados é de, no máximo,  $\pm$  3,2% (ASTM, 1988). Estas variações admissíveis induzem a variações dos valores de Vv e RBV maiores do que a adotada neste estudo. A fim de estabelecer um critério rigoroso e tornar ainda menor a variação permitida para os parâmetros volumétricos deste estudo, optou-se por estabelecer a tolerância de 10,0%. Esta tolerância, em relação à variação nos parâmetros volumétricos, foi estabelecida também para as outras misturas experimentais.



(a) Variação do Vv com o teor de ligante

(b) Vv e RBV médios por teor de ligante

Figura 4.3.4 - Variação dos parâmetros volumétricos (Vv e RBV) para a mistura 2 (60,0% de escória)

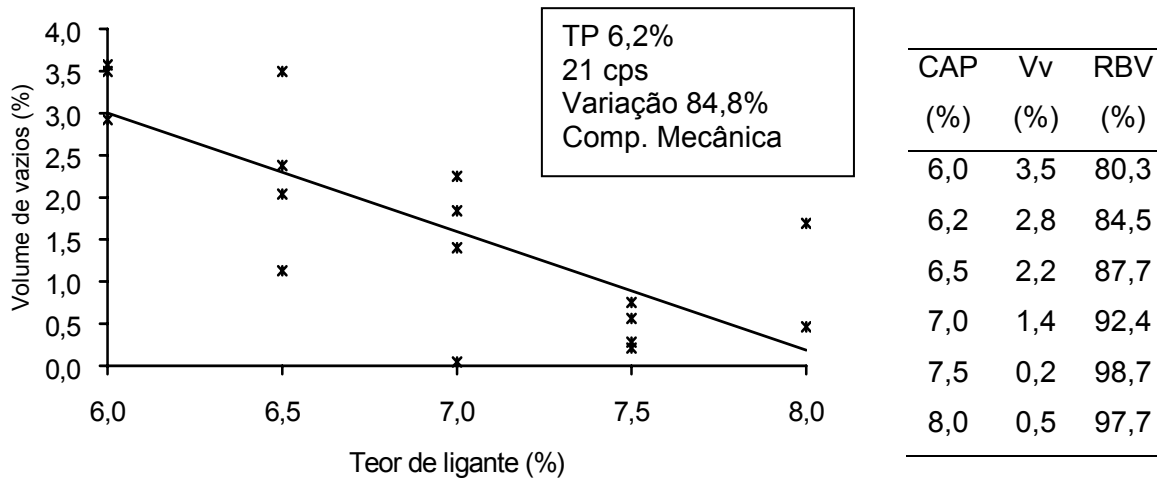
Primeiramente, as diferenças encontradas na dosagem foram atribuídas a erros operacionais, porém observou-se que a escória de aciaria utilizada neste estudo é muito heterogênea, como é possível verificar na Figura 4.3.5. Os grãos, de mesmo tamanho, apresentam diferentes texturas, tanto lisa e vítrea, quanto quebradiça e porosa.



Figura 4.3.5 - Diferenças entre os aspectos da escória utilizada

Partiu-se então para a dosagem das misturas asfálticas chamadas de M1 (40,0% de escória) e M3 (80,0% de escória). As médias dos valores de Vv e RBV encontrados para a M1 estão na Figura 4.3.6 e para a M3 estão na Figura 4.3.7. Os cps tiveram

que ser moldados com 1.280 g e 1.400g, respectivamente, para que os mesmos atingissem a altura especificada (DNER ME 043/95). O TP encontrado para a M1 foi 0,8% inferior ao teor de 7,0% utilizado na M2 (60,0% de escória). O TP encontrado para a M3 (6,7%) pode ser considerado igual ao adotado para a M2 (DNER, 1997).



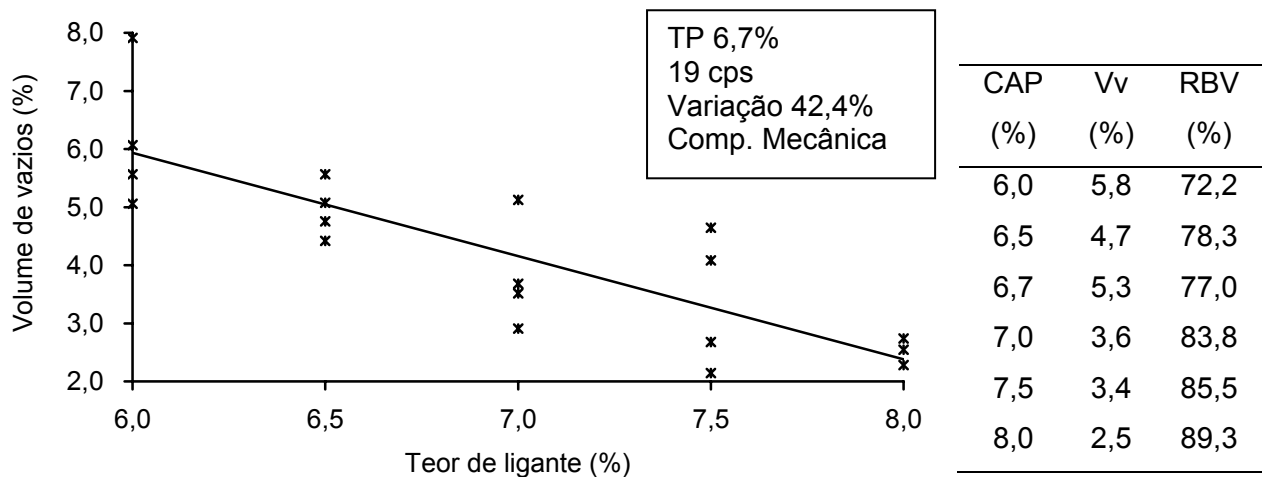
(a) Variação do Vv com o teor de ligante

(b) Vv e RBV médios por teor de ligante

Figura 4.3.6 - Variação dos parâmetros volumétricos (Vv e RBV) para a mistura 1 (40,0% de escória)

Considerando um mesmo teor de CAP, a variação encontrada entre os Vv para a M1 foi bastante elevada (84,8% para o teor de 7,0% de CAP). Os cps foram moldados nos teores contidos na Figura 4.3.6(b) porque era esperado que o teor de ligante para a mistura com Vv igual a 4,0% estivesse entre eles, como aconteceu para a M2. Nota-se que isto não ocorreu. A confecção de outros cps poderia indicar um TP ainda inferior ao encontrado. Optou-se por não confeccioná-los devido à grande variação encontrada nos parâmetros volumétricos iniciais.

Depois que os valores de Vv e RBV discrepantes foram eliminados, percebeu-se coerência nos resultados: Vv diminuiu com o aumento do teor de ligante (exceto para 7,5% e 8,0%) e o RBV aumentou (exceto para os teores de 7,5% e 8,0%). Apenas para o teor de 6,0% de CAP os parâmetros volumétricos encontram-se dentro dos limites estabelecidos pelo DNER. Os parâmetros volumétricos para o TP estão fora dos limites estabelecidos pelo DNER, porém estes foram os valores encontrados, quando foram moldados cps neste teor para caracterização mecânica.



(a) Variação do Vv com o teor de ligante

(b) Vv e RBV médios por teor de ligante

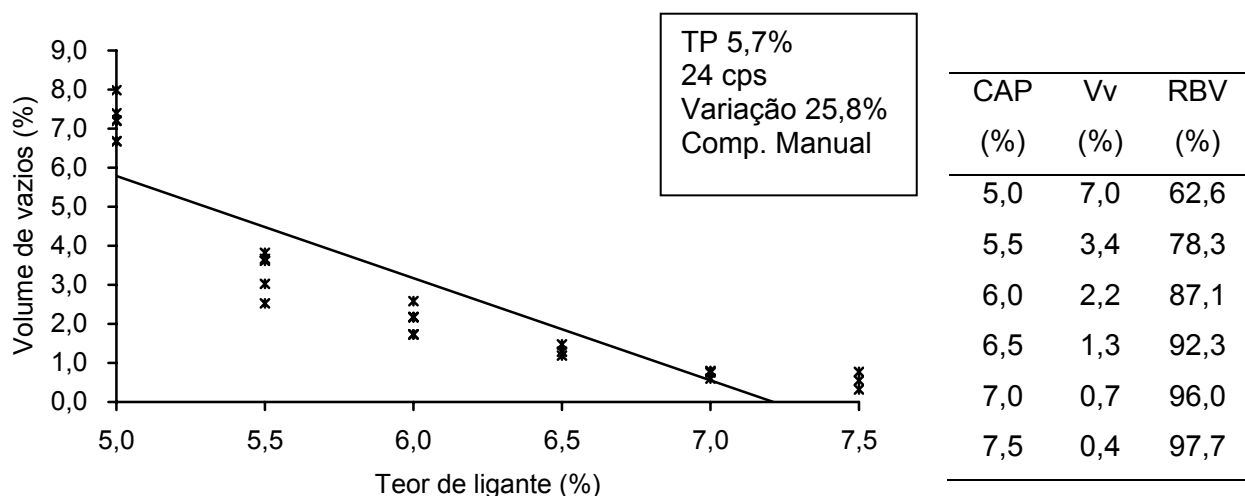
Figura 4.3.7 - Variação dos parâmetros volumétricos (Vv e RBV) para a mistura 3 (80,0% de escória)

Comparativamente às M1 e M2, a M3 apresentou menor variação entre os Vv (máximo de 42,4% para o teor de 7,0% de CAP). Para esta mistura, a escolha dos teores de ligante que seriam utilizados foi baseada na escolha para a M2. Diferentemente do que aconteceu com a M1, para a M3 o teor de ligante para a mistura com Vv igual a 4,0% está entre os teores escolhidos na dosagem.

Os valores de Vv e RBV apresentaram-se coerentes para a M3: o Vv diminuiu com o aumento do teor de ligante e o RBV aumentou (exceto para o TP). Em relação ao Vv, somente as misturas com teores de ligante de 6,5%, 7,0% e 7,5% encontraram-se dentro dos limites estabelecidos pelo DNER. Para o RBV, somente a mistura com 6,5% e 6,7% de ligante apresentou valores dentro destes citados limites. Apesar da M3 utilizar uma maior porcentagem de escória (80,0%) comparativamente com a M1 (40,0%), a M3 apresentou dados mais coerentes do que a M1. Deve-se levar em consideração que o material é bastante heterogêneo e isto pode ter influenciado os resultados.

O estudo prosseguiu com as dosagens de mais duas misturas, chamadas de M4 (40,0% de escória) e M5 (60,0% de escória). Os valores médios de Vv e RBV encontrados para a M4 estão nas Figuras 4.3.8 e para a M5 estão na Figura 4.3.9. Os cps tiveram que ser moldados com as mesmas quantidades de material das M1 e M2, respectivamente. O TP encontrado para a M4 foi inferior aos encontrados para as M5

e M1 (DNER, 1997). Acredita-se que a proporção menor de escória utilizada na M4 acarretou em um menor teor de ligante requerido.



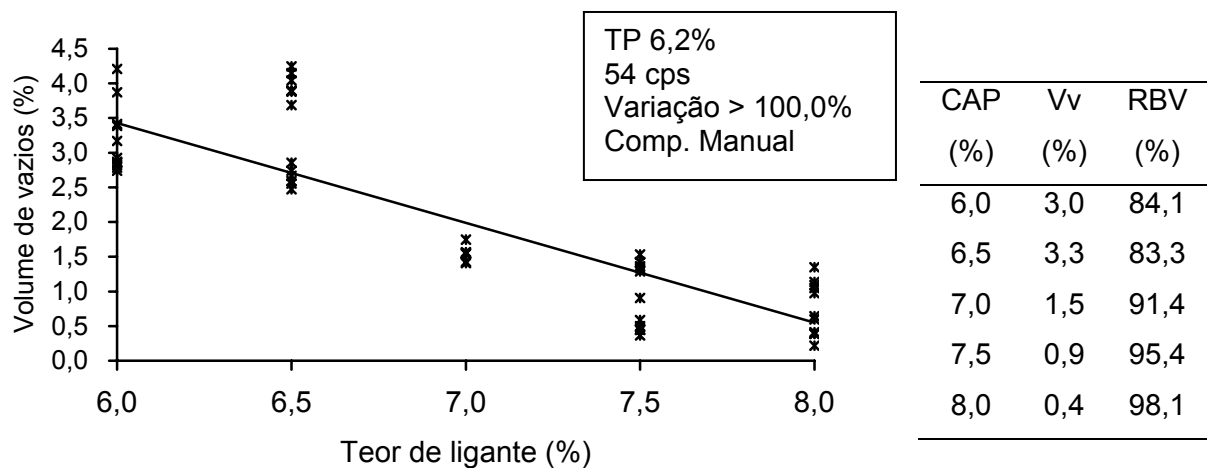
(a) Variação do Vv com o teor de ligante

(b) Vv e RBV médios por teor de ligante

Figura 4.3.8 - Variação dos parâmetros volumétricos (Vv e RBV) para a mistura 4 (40,0% de escória)

A M4 apresentou uma variação nos parâmetros volumétricos relativamente baixa (até 25,8% para o teor de 6,0% de CAP) e próxima da admissível para este estudo. Para esta mistura, optou-se por aumentar os teores de ligante utilizados na dosagem dos cps, devido à experiência adquirida com a M1. Como era de se esperar, o teor de ligante utilizado na mistura que produziria um Vv igual a 4,0% está abaixo de 6,0%.

Com relação aos valores encontrados para Vv e RBV na M4, os mesmos apresentaram-se inconsistentes. Um aumento de 0,5% no teor de ligante acarretou uma diminuição de 47,0% no Vv, para os teores de 5,0% e 5,5% de CAP. Para os teores de 5,5% a 7,5% os valores de Vv e RBV diminuíram e aumentaram com o aumento do teor de CAP, respectivamente. Somente para o teor de 5,5%, os valores de Vv e RBV encontraram-se dentro dos limites estabelecidos pelo DNER. Apesar da determinação do TP, para esta mistura, não foram moldados cps neste teor porque a caracterização mecânica desta mistura foi feita ainda na dosagem.



(a) Variação do Vv com o teor de ligante

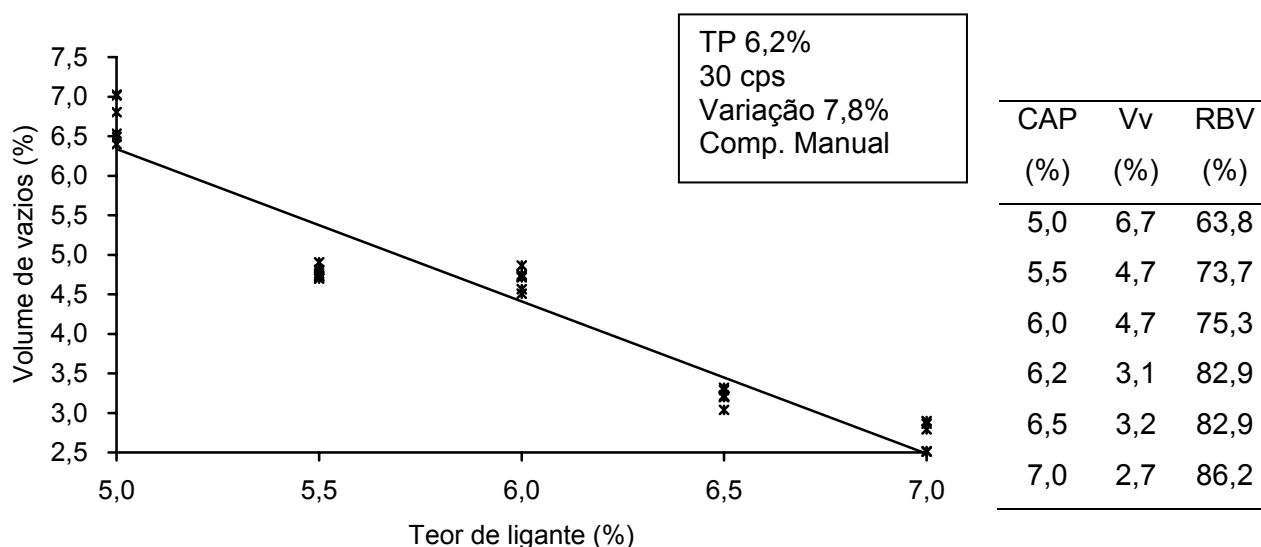
(b) Vv e RBV médios por teor de ligante

Figura 4.3.9 - Variação dos parâmetros volumétricos (Vv e RBV) para a mistura 5 (60,0% de escória)

A variação encontrada entre os Vv para a M5 (> 100,0% para o teor de 8,0% de CAP) foi bastante superior a da M4. Para esta mistura, os teores de ligante escolhidos para serem utilizados na dosagem foram baseados naqueles utilizados para a M2. Acreditava-se que, como estas duas misturas (M2 e M5) foram dosadas com a mesma proporção de escória, os seus TPs seriam próximos. Isto não foi constatado. Como é possível perceber, o TP que seria utilizado na mistura que produziria um Vv igual a 4,0% não está entre os escolhidos. Para os teores de 7,0%, 7,5% e 8,0% foram encontrados valores de Vv muito abaixo de 4,0%. Apenas para os teores de 6,0% e 6,5% o Vv está dentro dos limites estabelecidos para o DNER, enquanto que para o RBV nenhum teor de ligante testado levou a valores dentro da faixa especificada. O Vv e o RBV para o TP não foram obtidos porque, assim como na M4, a caracterização mecânica desta mistura foi realizada ainda na dosagem, não sendo necessária a moldagem destes cps.

A M6 foi a única mistura experimental que se comportou como uma mistura convencional, isto é, os parâmetros volumétricos encontrados não variaram além de 10,0% em relação à média dos mesmos (Figura 4.3.10). A maior variação encontrada foi de 7,8% para o teor de 5,5% de CAP. O TP encontrado para esta mistura foi superior aos das M1 e M4 (DNER, 1997). Para os teores de 5,0% e 7,0% de ligante os valores de Vv estão fora dos limites estabelecidos pelo DNER. Para o RBV, isto só não ocorreu para o teor de 6,0%. Percebe-se que apesar desta mistura ter utilizado

somente agregados porosos, o TP (6,2%) foi inferior ao encontrado para a M2 (7,0%) que utilizou agregados brutos, isto é misturados. Porém, o percentual de escória porosa na siderúrgica e, acredita-se, no laboratório também, é de 80,0% (percentual de escória de refino oxidante). Logo, a M2 (com 60,0% de escória misturada) contém 48,0% de escória porosa e 12,0% de escória lisa. Sendo assim, é justificável que o TP para a M2 seja superior ao encontrado para a M6.



(a) Variação do Vv com o teor de ligante

(b) Vv e RBV médios por teor de ligante

Figura 4.3.10 - Variação dos parâmetros volumétricos (Vv e RBV) para a mistura 6 (40,0% de escória)

A consistência nos resultados encontrados para esta mistura reforça o que já era imaginado. O fato desta mistura ter sido dosada com material separado (somente partículas porosas, para a escória graúda, ver Figura 4.3.11) diminuiu a heterogeneidade do rejeito e, conseqüentemente, as variações nos parâmetros volumétricos das misturas. Outro fato que deve ter contribuído para os valores encontrados foi o condicionamento ao qual esta mistura foi submetida antes da compactação. A permanência da massa asfáltica em estufa (160°C) durante duas horas deve ter aumentado a interação ligante-agregado e contribuído para redução das variações encontradas para as outras misturas.



Figura 4.3.11 - Ilustração da separação da escória de aciaria em dois grupos pela aparência dos grãos para compor a mistura 6 (40,0% de escória)

#### 4.4 - ABSORÇÃO DE LIGANTE

Devido à alta porosidade da escória de aciaria utilizada, optou-se por avaliar o percentual de ligante absorvido pelos agregados. A metodologia escolhida foi a proposta por ROBERTS *et al.* (1996). A M2 (60,0% de escória) foi utilizada para realização deste ensaio.

Para a obtenção do percentual de ligante absorvido, outros parâmetros são necessários:

- Densidade aparente da mistura asfáltica (DNER ME 117/87): a média dos seis ensaios realizados foi de 2,51;
- Densidade efetiva dos agregados ( $D_{ef}$ ) (ROBERTS *et al.*, 1996) (Equação 4.4.1): o valor encontrado foi de 2,99;

$$D_{ef} = \frac{1 - \%_{CAP}}{1 - \frac{\%_{CAP}}{DMM}} \cdot D_{CAP} \quad (4.4.1)$$

Onde:  $\%_{CAP}$  = teor de ligante utilizado;

DMM = Densidade Máxima Medida para a M2, para o teor de 7,0% de CAP.

- Densidade aparente dos agregados (DNER ME 081/98 e ASTM C 128-97) ( $D_{ap.ag.}$ ): as médias dos três ensaios realizados foram de 2,92 e 2,64 para agregados graúdo e miúdo, respectivamente. A densidade aparente da mistura dos agregados foi calculada através de uma ponderação dos resultados encontrados para agregados graúdos e miúdos. O valor encontrado foi de 2,76. A densidade

aparente do agregado miúdo foi realizada como descrito em VASCONCELOS e SOARES (2003).

O percentual de ligante absorvido ( $\%CAP_{abs}$ ) encontrado foi 2,9%, obtido através da Equação 4.4.2. Logo, parte do ligante que imaginava-se que estivesse sendo utilizado na mistura para impermeabilizar e unir os agregados está sendo absorvido pela escória. Esta absorção pode ser considerada alta visto que a variação admissível em relação ao teor de ligante em campo é de  $\pm 0,3\%$  (DNER, 1997). Apesar disso, este valor já era esperado porque o valor da absorção d'água encontrada para a escória de aciaria (4,5%) foi superior ao estabelecido pela norma do (DNER, 1994j) (1,0% a 2,0% em peso). Este rejeito, além de bastante poroso, apresenta reentrâncias e até mesmo vazios internos.

$$\%CAP_{abs} = 100D_{CAP} \frac{D_{ef} - D_{ap.ag.}}{D_{ap.ag.} D_{ef}} \quad (4.4.2)$$

Com a intenção de melhor avaliar a porosidade do agregado de escória foram realizadas tomografias computadorizadas no próprio grão do material e em cps moldados com escória em diferentes proporções (M1, M2 e M3) e sem escória (mistura comparativa).

Segundo BRAZ (1993): “a tomografia computadorizada é um processo que, utiliza a radiação para obter a reconstrução, de uma seção transversal de um corpo, quando um certo número de projeções unidimensionais, em diversos ângulos são processadas; e desta forma, obtêm-se uma imagem bidimensional ou tridimensional da seção transversal do corpo”. Para este estudo, as tomografias foram realizadas em um Sistema Tomográfico Auxiliado por Computador (STAC) ou equipamento de feixe paralelo, do laboratório de engenharia nuclear da COPPE/UFRJ.

Os resultados estão nas Figuras 4.4.1 e 4.4.2 para o grão de escória e para os cps, respectivamente. É possível perceber através da tomografia realizada no grão da escória que a mesma é bastante porosa e possui até vazios internos. Percebe-se, para as tomografias realizadas nos cps, que existe diferença de cores nos mesmos. Esta diferença de cores é o chamado coeficiente de atenuação que está relacionado com a facilidade ou a dificuldade que o feixe de fótons emitido teve para passar através do corpo analisado. Este coeficiente é correlacionado com a densidade do

material. Logo, os pontos mais claros representam maiores densidades, enquanto que os mais escuros, menores densidades. Como era de se esperar, quanto maior o percentual de escória, maior a quantidade de pontos claros devido a maior densidade dos grãos de escória de aciaria.

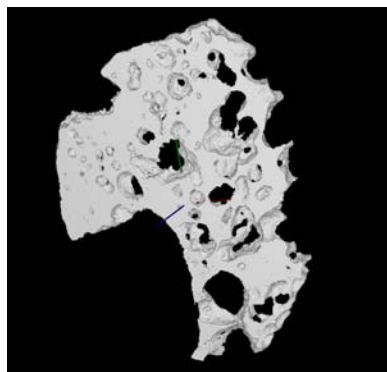


Figura 4.4.1: Tomografia computadorizada do grão da escória utilizada neste estudo

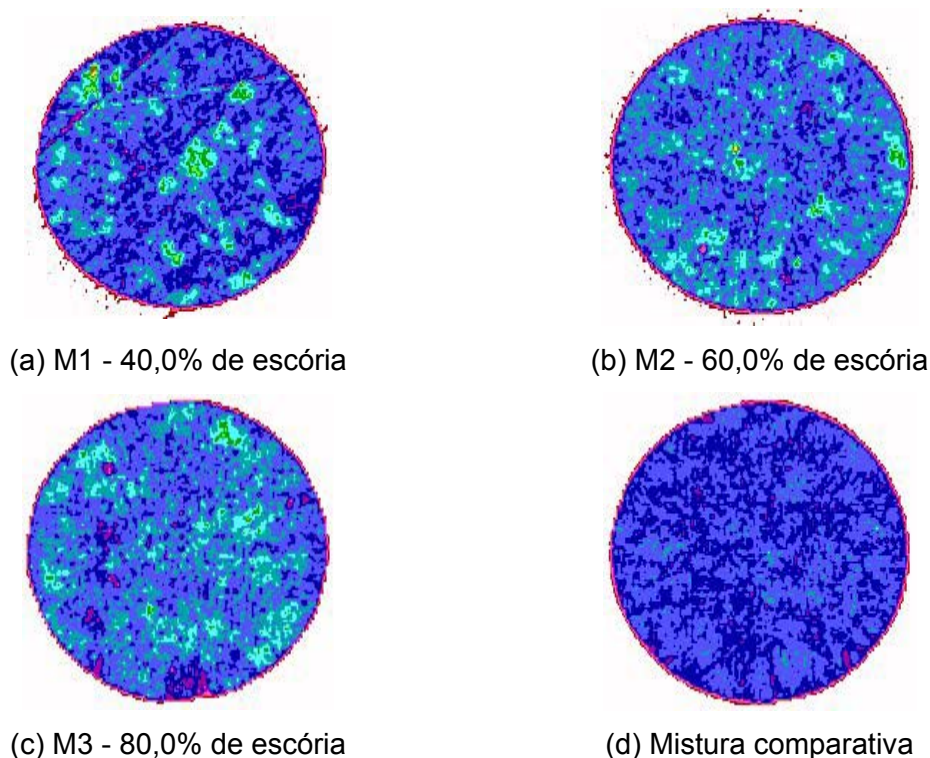


Figura 4.4.2: Tomografias computadorizadas dos corpos de prova moldados com e sem a utilização de escória de aciaria como agregado

Percebe-se com os resultados obtidos que a dosagem de misturas asfálticas com utilização de escória deve ser reavaliada. A maneira tradicional de obtenção do TP para este tipo de mistura deve ser repensada devido à heterogeneidade e a absorção do rejeito. Embora não tenha sido realizada uma comparação de custos, parte do que

se economizaria com a redução do preço do agregado seria perdido com o aumento do teor de ligante. Há de se computar, porém, o ganho ambiental não quantificado. Este ganho é justificado por atividades que provavelmente serão canceladas com a utilização deste rejeito na pavimentação rodoviária, são elas: disposição da escória de aciaria, aumento da degradação ambiental provocada pelas pedreiras, etc.

Apesar dos resultados encontrados terem sido bastante dispersos, para a maioria das misturas investigadas, as dosagens realizadas serviram como aprendizado para uma visão crítica dos resultados encontrados. Os resultados indicam que, para este tipo de mistura a preocupação deva estar concentrada nos parâmetros mecânicos e não nos volumétricos. A caracterização mecânica destas misturas é o foco da discussão no próximo capítulo. Outro fato que deve ser levado em consideração é que a densidade aparente dos cps foi obtida da maneira tradicional (DNER – ME 117/87), isto é, com a superfície apenas seca e não com a superfície seca e saturada (ASTM D 2726 – 00). Este fato tem influência direta na obtenção dos parâmetros volumétricos e talvez na variação dos mesmos.

## CAPÍTULO 5

---

---

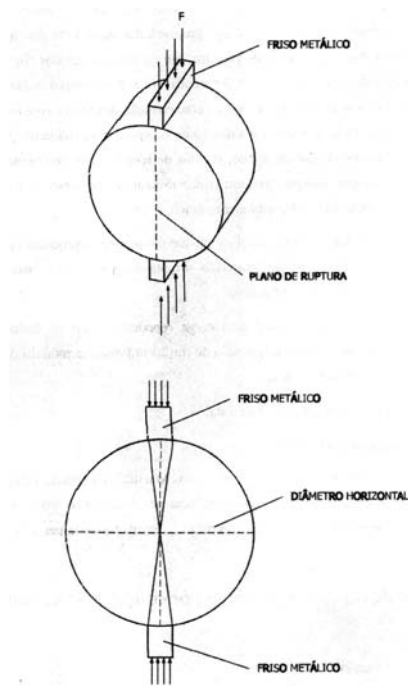
### 5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

A partir de 1970, o dimensionamento de pavimentos deixou de ser unicamente por métodos empíricos, surgindo as primeiras análises do comportamento estrutural dos pavimentos baseados no cálculo de tensões e deformações por meio da utilização de programas computacionais que facilitaram a análise mecânica dos sistemas em camadas (as fórmulas e ábacos já existiam antes da década de 70). O método correntemente utilizado no Brasil, introduzido pelo professor Murilo Lopes de Souza, desde 1966 para o dimensionamento de pavimentos é baseado no ensaio *California Bearing Ratio* (CBR). O CBR é um ensaio de capacidade de carga estático que compara os valores obtidos para os materiais em uso com um material padrão (brita graduada oriunda da Califórnia). O comportamento estrutural dos pavimentos é melhor avaliado a partir dos estudos sobre a deformabilidade elástica ou resiliência dos materiais. Estes estudos foram motivados pela vontade de se obter um dimensionamento mais racional a partir do entendimento do pavimento como uma estrutura e um sistema de camadas (MEDINA, 1997; SOARES, 2000; MOTTA, 2002).

A caracterização mecânica das misturas asfálticas utilizadas no presente estudo foi feita através dos ensaios de Resistência à Tração estática por compressão diametral (RT), Módulo de Resiliência (MR), fadiga por compressão diametral a tensão controlada e resistência à tração retida por umidade induzida. As M1, M2, M3 e M6, com 40,0%; 60,0%; 80,0% e 40,0% de escória, respectivamente, foram caracterizadas mecanicamente com cps moldados no TP. As M4 e M5 (com 40,0% e 60,0% de escória, respectivamente) foram caracterizadas mecanicamente com cps moldados nos teores utilizados para a dosagem Marshall, conforme mencionado no Capítulo 4. A M6 foi ainda caracterizada através do ensaio de resistência à tração retida por umidade induzida, para avaliação da adesividade.

## 5.1 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ESTÁTICA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (DNER – ME 138/94)

O ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral (RT) foi desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro, em 1943 (CARNEIRO, 1943), para avaliar misturas de concreto-cimento e posteriormente passou a ser utilizado também para misturas asfálticas (MEDINA, 1997). Apesar deste ensaio não medir diretamente a resistência à tração, o mesmo é de fácil execução. Duas forças concentradas diametralmente opostas são aplicadas no cp e geram (perpendicular ao diâmetro) tensões de tração (MEDINA, 1997; FALCÃO e SOARES, 2002) (Figura 5.1.1(a)). A prensa para realização deste ensaio é uma prensa Marshall adaptada para tal, conforme Figura 5.1.1(b).



(a) Esquema do ensaio de RT (DNER, 1994g)



(b) Prensa utilizada para o ensaio de RT

Figura 5.1.1 - Esquema do ensaio de Resistência à Tração indireta (RT) e equipamento usado nesta pesquisa

Para realização do ensaio de RT, geralmente o cp é posicionado entre dois frisos metálicos de 1,27 cm de largura (para o caso de haver desvios no contato cp-prato da prensa) e com curvatura para melhor acomodação do mesmo. FALCÃO e SOARES (2002) discutiram a influência do friso e da temperatura no resultado deste ensaio. Avaliaram, dentre outras, misturas asfálticas, e utilizaram quatro tipos diferentes de

friso e duas temperaturas para a realização do ensaio. Concluíram que os ensaios realizados com frisos de diferentes larguras e em diferentes temperaturas apresentaram valores de RT variáveis. Porém, para misturas asfálticas, a variação encontrada pode ser considerada muito pequena (inferior a 10,0%). Para este estudo, isto não deve ser levado em consideração, visto que se trata de uma comparação entre misturas ensaiadas com frisos idênticos e na mesma temperatura (25°C).

A aparelhagem necessária para a realização deste ensaio é (DNER, 1994i):

- Prensa mecânica com sensibilidade inferior ou igual a 19,60 N (2 kgf) e velocidade do êmbolo de  $0,80 \pm 0,1$  mm/s;
- Estufa para condicionamento dos cps;
- Sistema de refrigeração capaz de manter a temperatura de ensaio (25°C);
- Paquímetro para medição das dimensões dos cps.

O ensaio é realizado da seguinte forma:

- Medir a altura (H) (média de quatro determinações) e o diâmetro (D) (média de três determinações) do cp com o paquímetro;
- Submeter o cp a um condicionamento em estufa, por duas horas, a 25°C;
- Colocar o cp entre os dois frisos metálicos;
- Ajustar os pratos da prensa para manter a posição do cp;
- Aplicar a carga progressivamente ( $0,80 \pm 0,1$  mm/s) até que ocorra a ruptura do cp;
- Realizar a leitura no extensômetro (L);
- Multiplicar o valor da leitura pela constante do anel dinamométrico da prensa utilizada para obtenção da carga de ruptura (F). Para este estudo a prensa utilizada possui um anel com constante igual a 1,8633.

O valor de RT é dado pelas Equações 5.1.1:

$$RT = \frac{2F}{\pi DH} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (5.1.1)$$

Onde: F é dada em unidade de força;

D e H são dados em unidade de distância.

No presente estudo, os ensaios de RT foram realizados com cps moldados em laboratório (altura de  $6,35 \text{ cm} \pm 0,13 \text{ cm}$  e diâmetro de  $10 \text{ cm} \pm 0,02 \text{ cm}$ ) e

condicionados a 25°C. Estes cps foram submetidos a este ensaio ainda “virgens”, isto é, não passaram antes pelo ensaio de MR. Para as M1, M2 e M3, os cps moldados com os teores de 6,0%, 7,0% e 6,8% de ligante, respectivamente, foram submetidos aos ensaios. A média aritmética e o desvio padrão dos resultados de três cps para os ensaios de RT, tanto das misturas com escória em estudo quanto da mistura comparativa, nos TPs, estão na Tabela 5.1.1. Estes resultados podem ser melhor visualizados na Figura 5.1.2.

Tabela 5.1.1 - Resultados de Resistência à Tração indireta (RT) para as misturas 1, 2 e 3 (40,0%, 60,0% e 80,0% de escória, respectivamente) e comparativa

| RT (MPa, 25°C) | Mistura |      |      |             |
|----------------|---------|------|------|-------------|
|                | M1      | M2   | M3   | Comparativa |
| Média          | 0,77    | 0,62 | 0,76 | 0,75        |
| Desvio Padrão  | 0,02    | 0,01 | 0,03 | 0,07        |

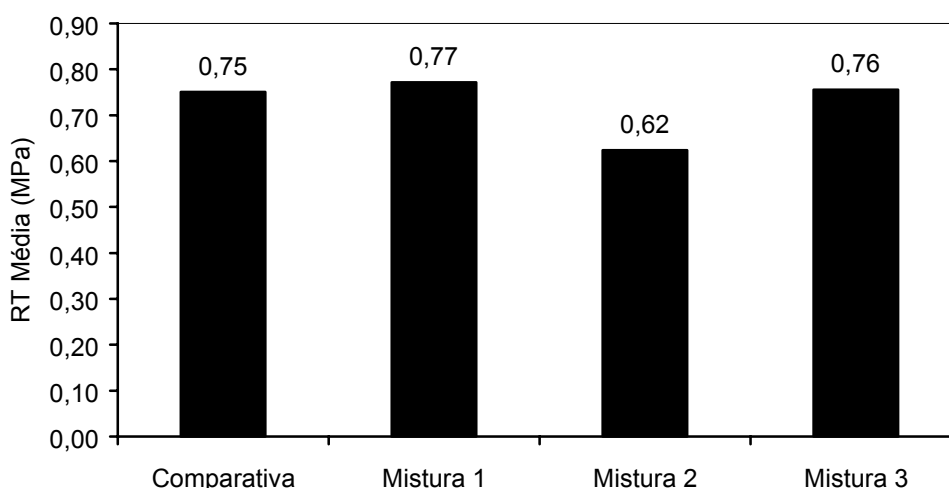


Figura 5.1.2 - Valores de Resistência à Tração indireta (RT) para as misturas 1, 2, 3 (40,0%, 60,0% e 80,0% de escória, respectivamente) e comparativa

Com relação aos valores de RT, em ordem decrescente, para as três misturas, os valores encontrados para a M1 > M3 > M2. As M1 e M3 apresentaram valores superiores ao da mistura comparativa e a M2 apresentou valor inferior ao da referida mistura. Os valores dos desvios padrões encontrados para os resultados dos ensaios de RT das misturas com escória foram inferiores àquele encontrado para a mistura comparativa, na seguinte ordem desvio padrão M2 < M1 < M3 < mistura comparativa. A comparação dos valores de RT não pode ser dissociada dos teores de ligante. De

certa forma é esperado que misturas com teores de ligante maiores, como é o caso da M2, apresentem menor resistência estática, uma vez que o ligante lubrifica o intertravamento entre os agregados.

Para as M4 e M5 (40,0% e 60,0%, respectivamente) os cps moldados nos cinco teores adotados na dosagem Marshall foram submetidos aos ensaios de RT. O número de cps (n) utilizados nestes ensaios foi variável devido a grande dispersão encontrada nos resultados. Para alguns teores chegaram a ser ensaiados nove cps. A média aritmética e o desvio padrão dos resultados para os ensaios de RT das M4 e M5, bem como da comparativa, estão nas Tabelas 5.1.2 e 5.1.3, respectivamente. Estes resultados podem ser melhor visualizados nas Figuras 5.1.3 e 5.1.4 para as duas misturas, respectivamente.

Tabela 5.1.2 - Resultados de Resistência à Tração indireta (RT) para a mistura 4 (40,0% de escória) e comparativa

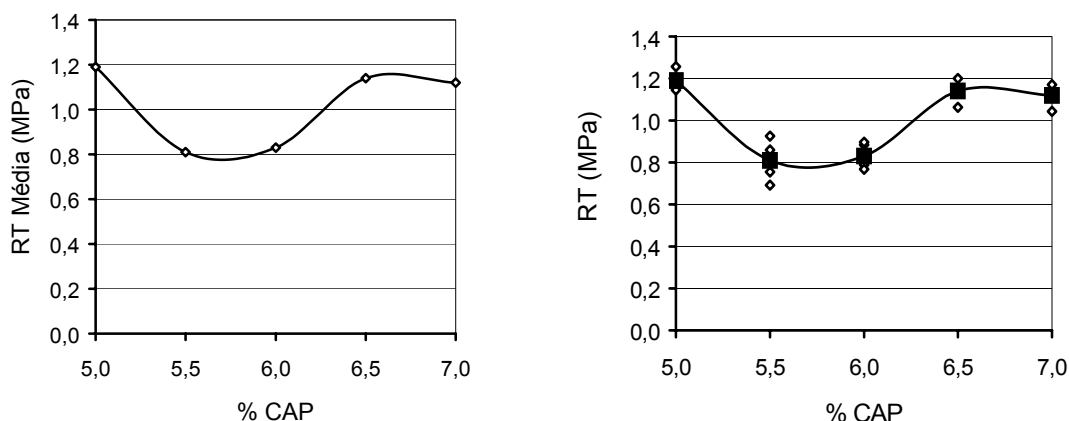
| RT (MPa, 25°C) | Teor de CAP (%) |      |      |      |      |             |
|----------------|-----------------|------|------|------|------|-------------|
|                | Mistura 4       |      |      |      |      | Comparativa |
|                | 5,0             | 5,5  | 6,0  | 6,5  | 7,0  | 6,4         |
| Média          | 1,19            | 0,81 | 0,83 | 1,14 | 1,12 | 0,75        |
| Desvio Padrão  | 0,06            | 0,10 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07        |
| N              | 3               | 4    | 4    | 3    | 3    | 3           |

Tabela 5.1.3 - Resultados de Resistência à Tração indireta (RT) para a mistura 5 (60,0% de escória) e comparativa

| RT (MPa, 25°C) | Teor de CAP (%) |      |      |      |      |             |
|----------------|-----------------|------|------|------|------|-------------|
|                | Mistura 5       |      |      |      |      | Comparativa |
|                | 6,0             | 6,5  | 7,0  | 7,5  | 8,0  | 6,4         |
| Média          | 0,79            | 0,72 | 0,78 | 0,60 | 0,48 | 0,75        |
| Desvio Padrão  | 0,12            | 0,14 | 0,07 | 0,12 | 0,07 | 0,07        |
| n              | 9               | 9    | 6    | 9    | 9    | 3           |

Com relação aos resultados de RT da M4, para todos os teores de CAP foram encontrados valores superiores ao da mistura comparativa. O maior valor de RT encontrado foi para a mistura com 5,0% de CAP. Os desvios padrões para os valores de RT foram todos inferiores ao encontrado para a mistura comparativa. Para a M4 há diminuição do valor de RT com o aumento do teor de CAP de 5,0% para 5,5% e

posterior aumento deste valor para os teores acima de 5,5% de CAP, sendo que para os teores de 6,5% e 7,0% os valores de RT são praticamente iguais. As variações nas médias dos valores de RT para os diferentes teores de CAP e a dispersão dos valores podem ser melhor visualizados nas Figuras 5.1.3(a) e (b), respectivamente. Para esta mistura (M4), observou-se que a grande dispersão nos parâmetros volumétricos não se estendeu para este tipo de caracterização.

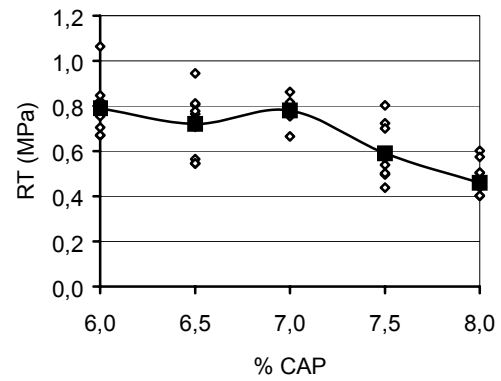
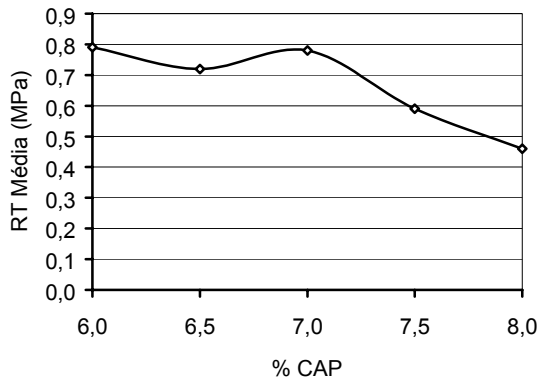


(a) RT médio  $\times$  % CAP para a M4

(b) Variação dos valores de RT para a M4

Figura 5.1.3 - Variação dos valores de Resistência à Tração indireta (RT) versus teores de CAP para a mistura 4 (40,0% de escória)

Com relação aos resultados de RT da M5, para as misturas com os teores de CAP de 6,0% e 7,0% os valores encontrados foram superiores ao da mistura comparativa, o mesmo não ocorrendo para as misturas com os teores de 6,5%, 7,5% e 8,0% de CAP. Os desvios padrões para os valores de RT foram inferiores ao encontrado para a mistura comparativa para os valores de 7,0% e 8,0% de CAP e superiores (porém próximos) para os teores restantes. Para a M5, o valor de RT diminuiu com o aumento do teor de CAP de 6,0% para 6,5%. Com a continuação da caracterização mecânica, o aumento do teor de CAP de 6,5% para 7,0% levou a um aumento do valor de RT. A partir deste teor (7,0% de CAP) o valor de RT tendeu a diminuição com o aumento do teor de CAP. As variações nas médias dos valores de RT para os diferentes teores de CAP e a dispersão dos valores podem ser melhor visualizados nas Figuras 5.1.4(a) e (b), respectivamente.



(a) RT médio  $\times$  % CAP para a M5

(b) Variação dos valores de RT para a M5

Figura 5.1.4 - Variação dos valores de Resistência à Tração indireta (RT) versus teores de CAP para a mistura 5 (60,0% de escória)

Os ensaios de RT para a M6 (60,0% de escória) foram realizados no LMP/DET/UFC e na COPPE/UFRJ. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.1.4 e ilustrados na Figura 5.1.5. O tamanho das amostras (n) foi variável, três determinações na UFC e quinze determinações na COPPE/UFRJ. O número de determinações na COPPE foi muito superior ao da UFC porque foram realizados ensaios também com cps após o ensaio de MR.

Tabela 5.1.4 - Resultados de Resistência à Tração indireta (RT) para a mistura 6 (40,0% de escória), ensaiada na UFC e na COPPE, e comparativa

| Mistura     | RT (MPa, 25°C) |               | n  |
|-------------|----------------|---------------|----|
|             | Média          | Desvio Padrão |    |
| M6 (UFC)    | 1,42           | 0,20          | 3  |
| M6 (COPPE)  | 1,29           | 0,19          | 15 |
| Comparativa | 0,75           | 0,07          | 3  |

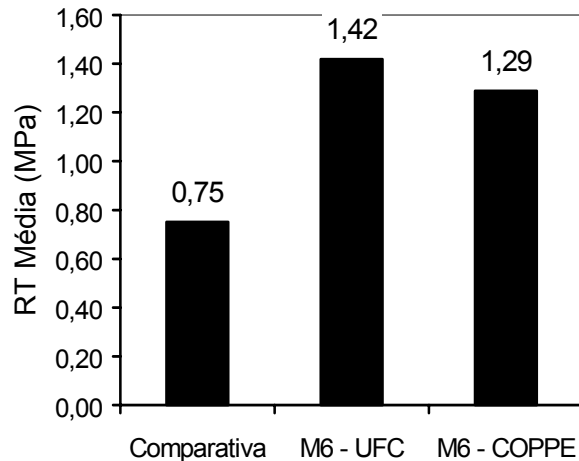


Figura 5.1.5 - Valores de Resistência à Tração indireta (RT) para mistura 6 (40,0% de escória), ensaiada na UFC e na COPPE, e comparativa

Esta mistura (M6) apresentou os maiores valores de RT e também de desvios padrões, se comparada com as outras misturas experimentais e com a mistura comparativa (exceto para o teor de 5,0% de CAP da M4). A mesma mistura (M6) apresentou diferentes valores de RT para equipamentos e operadores diferentes, porém próximos. Os resultados obtidos na UFC foram apenas 9,0% superiores aos obtidos na COPPE/UFRJ. O valor do desvio padrão para a M6 para os ensaios realizados na UFC também foi superior ao encontrado para os ensaios realizados na COPPE/UFRJ. O fato dos tamanhos das amostras serem diferentes tem que ser levado em consideração, principalmente porque esta mistura foi confeccionada com rejeito. O menor desvio padrão para as determinações realizadas na COPPE/UFRJ reforça a hipótese de que os cps não estão sendo danificados durante o ensaio de MR, apesar da não limitação da carga em 30,0% do valor de RT (como será discutido no próximo item deste capítulo).

Já era esperado que a M6 apresentasse maiores valores de RT, se comparada com as outras misturas experimentais, porque a mesma contém o menor teor de ligante. Quanto menor o teor de ligante, maior o efeito do intertravamento dos agregados. Este efeito é ainda mais significativo para esta mistura que utilizou apenas agregados de escória porosos, que também são os mais rugosos. Por se tratar de uma mistura com utilização de rejeito, o tamanho da amostragem tem que ser repensado, um maior número de cps precisa ser ensaiado para que comparações possam ser mais fundamentadas.

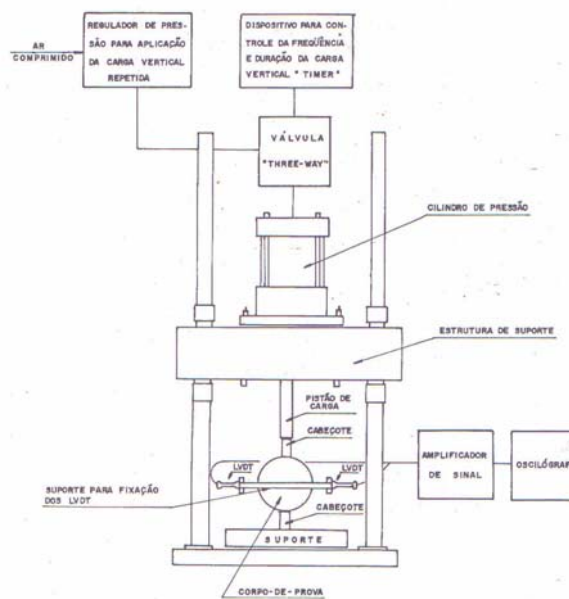
## 5.2 - MÓDULO DE RESILIÊNCIA (DNER - ME 133/94)

O Módulo de Resiliência (MR) é o módulo elástico das misturas asfálticas medido sob carga repetida e em Compressão Diametral (CD) (Figura 5.2.1). Este ensaio é realizado por compressão diametral com frisos de carga, com aplicação de carga durante 0,1 s e repouso de 0,9 s. O MR para misturas asfálticas é dado pela relação entre a tensão de tração ( $\sigma_t$ ) e a deformação específica recuperável total correspondente à tensão aplicada ( $\epsilon_t$ ), para este caso a 25°C (Equação 5.2.1). A norma brasileira não distingue deformação específica instantânea de deformação específica total, como é feito na norma americana (ASTM D 4123, 1982). A importância da realização deste ensaio reside no fato de que o mesmo é utilizado, no Brasil, para o cálculo de tensões e deformações nos pavimentos e posterior dimensionamento dos mesmos.

$$MR = \left( \frac{\sigma_t}{\epsilon_t} \right)_T \quad (5.2.1)$$



(a) Equipamento CD usado nesta pesquisa (LMP/DET/UFC)



(b) Esquema equipamento CD (DNER, 1994h)

Figura 5.2.1 - Equipamento para ensaio de Módulo de Resiliência (MR) de misturas asfálticas usado nesta pesquisa

A aparelhagem necessária para realização deste ensaio é a seguinte:

- Sistema pneumático de carregamento;
- Sistema de medição de deformação da amostra;
- Estrutura de suporte com acessórios.

O ensaio é realizado da seguinte forma (DNER, 1994h):

- Posicionar o cp;
- Ajustar o *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT). Para este estudo o LVDT foi ajustado em 1 volt;
- Assentar o pistão de carga;
- Condicionar o cp;
- Registrar as deformações para 300, 400 e 500 aplicações da carga vertical repetida.

O MR é determinado pela Equação (5.2.2):

$$MR = \frac{F}{\Delta H} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (5.2.2)$$

Onde: F = carga vertical repetida aplicada diametralmente no cp (kgf);

$\Delta$  = deformação elástica ou resiliente registrada para 300, 400 e 500 aplicações da carga F, (cm);

H = altura do cp (cm);

$\mu$  = coeficiente de Poisson (0,30 é o valor recomendado).

Apesar de saber que o MR varia com o tempo de carregamento e com a temperatura de ensaio, além de não ser um parâmetro puramente elástico (SOUZA e SOARES, 2003), estes fatos não foram levados em consideração. Para este estudo foi feita uma comparação entre misturas experimentais (com escória de aciaria) e uma mistura comparativa (com agregados convencionais) sendo que os dois tipos de mistura foram ensaiados sob as mesmas condições.

Os ensaios de MR foram realizados com cps moldados em laboratório (altura de 6,35 cm  $\pm$  0,13 cm e diâmetro de 10 cm  $\pm$  0,02 cm) e condicionados a 25°C. Estes ensaios foram realizados sem considerar o valor de RT. Esta decisão foi tomada devido à alta variação encontrada nos valores de RT e à baixa sensibilidade dos LVDTs (0,006 mm) do equipamento de compressão diametral do LMP/DET/UFC. Para que o LVDT fosse sensibilizado era necessária uma carga superior a 30,0% do valor de RT,

recomendado pela norma (DNER – ME 133/94). Esse procedimento é comumente adotado na COPPE/UFRJ. Outras normas, como a ASTM D 4123 (1982) estabelece este limite de carga em função da espessura do cp. Para as M1, M2 e M3 (com 40,0%, 60,0% e 80,0% de escória, respectivamente), os cps moldados com os teores de 6,0%, 7,0% e 6,8% de ligante (TPs), respectivamente, foram submetidos aos ensaios. A média aritmética e o desvio padrão dos resultados de três cps para os ensaios de MR, tanto das misturas em estudo quanto da comparativa, estão na Tabela 5.2.1, que também apresenta os valores de MR/RT. Estes resultados podem ser melhor visualizados na Figura 5.2.2.

Tabela 5.2.1 - Valores de Módulo de Resiliência (MR) para as misturas 1, 2 e 3 (40,0%, 60,0% e 80,0% de escória, respectivamente) e comparativa

| Mistura     | MR (MPa, 25°C) |               | MR/RT |
|-------------|----------------|---------------|-------|
|             | Média          | Desvio Padrão |       |
| M1          | 2.276          | 220           | 2.520 |
| M2          | 1.836          | 34            | 2.944 |
| M3          | 2.188          | 607           | 2.977 |
| Comparativa | 2.051          | 264           | 2.728 |

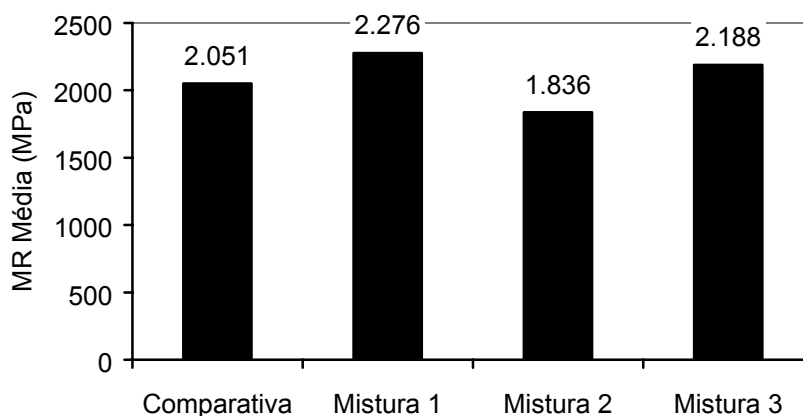


Figura 5.2.2 - Valores de Módulo de Resiliência (MR) para as misturas 1, 2 e 3 (40,0%, 60,0% e 80,0% de escória, respectivamente) e comparativa

Com relação aos resultados dos ensaios de MR, os valores encontrados foram: M1 > M3 > M2. Estes resultados já eram, de certa forma, esperados devido a maior quantidade de ligante na M2. As M1 e M3 apresentaram valores superiores, mas próximos, ao da mistura comparativa e a M2 apresentou valor inferior. Com relação aos desvios padrões desses ensaios, as M1 e M2 apresentaram valores inferiores ao

da comparativa, enquanto o valor encontrado para a M3 foi superior, indicando que maior percentual de escória acarreta maior variabilidade nos resultados deste ensaio. Os desvios padrões apresentaram-se na seguinte ordem: M2 < M1 < mistura comparativa < M3.

Para verificar se havia alguma variação nos valores de MR quando o cp é colocado em diferentes posições, para a M3 os ensaios de MR foram realizados a 0° e a 90°. Os valores encontrados foram bastante próximos nos dois casos (Tabela 5.2.2). A maior diferença encontrada entre os valores foi de 1,5%. Isto indica que a carga aplicada durante o ensaio não provocou fissuras no cp capazes de comprometer os valores de MR.

Tabela 5.2.2 - Valores de Módulo de Resiliência (MR) obtidos em corpos de prova ensaiados em duas posições (0° e 90°) para a mistura 3 (80,0% de escória)

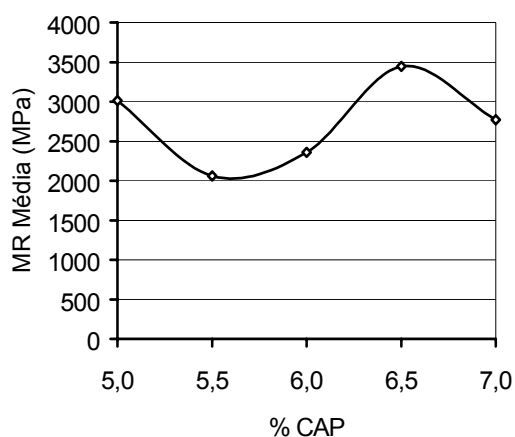
| CP N° | MR (MPa, 25°C) |       |
|-------|----------------|-------|
|       | 0°             | 90°   |
| 01    | 2.617          | 2.656 |
| 02    | 1.759          | 1.780 |

As relações MR/RT para as M2 e M3 foram superiores a da comparativa, indicando um valor de MR cerca de 3.000 vezes superior ao de RT. Esta relação ficou bem próxima da variação (de 3.000 a 3.500) para misturas na faixa C do DNER para CBUQ que utilizam o CAP 50/60 oriundo do petróleo Bachaquero (SOARES *et al.*, 2002). Já para a M1, o valor da relação MR/RT encontrado foi inferior ao da mistura comparativa, cerca de 7,5%. Apesar desta pesquisa utilizar petróleo de origem Fazenda Alegre, a comparação é válida visto que o petróleo Bachaquero foi utilizado com sucesso em várias pesquisas realizadas no LMP/DET/UFC, e possui características semelhantes.

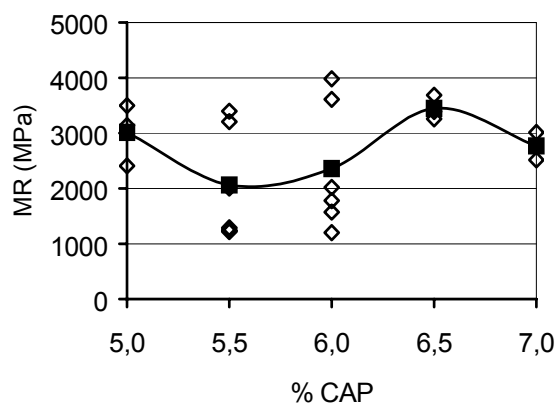
Para as M4 e M5, os cps moldados nos teores utilizados para a dosagem Marshall foram submetidos aos ensaios de MR. O número de cps (n) utilizados para estes ensaios foi superior a três (para alguns teores chegou-se a realizar seis ensaios), sendo variável conforme a dispersão encontrada nos resultados. A média aritmética e o desvio padrão dos resultados dos cps para os ensaios de MR, das duas misturas estão nas Tabelas 5.2.3 e 5.2.4, respectivamente. Os valores de MR/RT também estão nestas referidas tabelas. Estes resultados são apresentados nas Figuras 5.2.3 e 5.2.4 para as duas misturas.

Tabela 5.2.3 - Valores de Módulo de Resiliência (MR) para a mistura 4 (40,0% de escória)

| Teor de CAP (%) | MR (MPa, 25°C) |               | MR/RT | n |
|-----------------|----------------|---------------|-------|---|
|                 | Média          | Desvio Padrão |       |   |
| 5,0             | 3.014          | 556           | 2.520 | 3 |
| 5,5             | 2.062          | 1.005         | 1.447 | 6 |
| 6,0             | 2.361          | 1.147         | 1.891 | 6 |
| 6,5             | 3.445          | 220           | 3.039 | 3 |
| 7,0             | 2.770          | 249           | 2.482 | 3 |



(a) MR médio por teor de CAP



(b) Todos os valores de MR por teor de CAP

Figura 5.2.3 - Variação dos valores de Módulo de Resiliência (MR) para a mistura 4 (40,0% de escória)

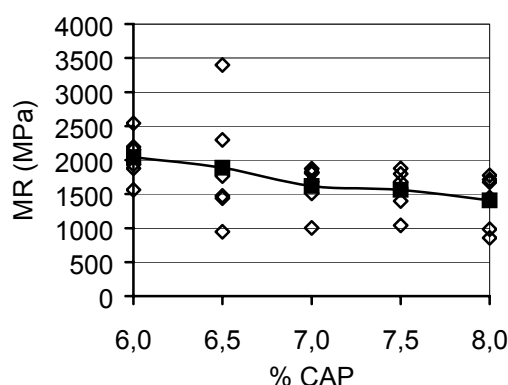
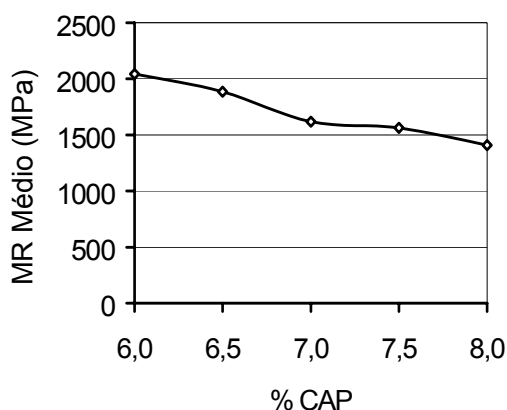
Com relação aos resultados de MR para a M4, para todos os teores de CAP foram superiores ao da mistura comparativa (2.051 MPa). O maior valor foi para a mistura com 6,5% de CAP. Os desvios padrões para os valores de MR foram inferiores ao da comparativa (264) para as misturas com os teores de 6,5% e 7,0% de CAP e superiores ao da comparativa para as misturas com os teores de 5,0%, 5,5% e 6,0% de CAP. Os valores da relação MR/RT apresentaram-se na seguinte ordem: mistura com 5,5% < mistura com 6,0% < mistura 7,0% < mistura 5,0% < mistura comparativa (2.728) < mistura 6,5%. A mistura que se apresentou mais próxima da variação (de 3.000 a 3.500) para misturas na faixa C do DNER para CBUQ que utilizam o CAP 50/60 oriundo do petróleo Bachaquero (SOARES *et al.*, 2002) foi aquela com 6,5% de CAP.

Com relação às médias dos valores de MR encontradas para a M4, o aumento do teor de CAP de 5,0% para 5,5% levou a uma diminuição do valor de MR (31,5%), sendo este o menor valor de MR encontrado. O aumento do teor de CAP de 5,5% para 6,0% e de 6,0% para 6,5% acarretou um aumento do valor de MR. A mistura com 6,5% de CAP apresentou o maior valor de MR e este por sua vez voltou a cair com o aumento do teor de CAP de 6,5% para 7,0% (Figura 5.2.3 (a)).

Apesar do tamanho das amostras (n) serem diferentes para os diferentes percentuais de CAP é possível ter idéia da variação dos valores de MR encontrados para a M4, como é possível observar na Figura 5.2.3 (b). A mistura com teor de ligante de 6,0% apresentou as maiores variações, sendo encontrada uma diferença de até 69,0%, em relação à média dos valores. A mistura com teor de 6,5% foi a que apresentou menor variação em relação à média.

Tabela 5.2.4 - Valores de Módulo de Resiliência (MR) para a mistura 5 (60,0% de escória)

| Teor de CAP (%) | MR (MPa, 25°C) |               | MR/RT | n |
|-----------------|----------------|---------------|-------|---|
|                 | Média          | Desvio Padrão |       |   |
| 6,0             | 2.044          | 331           | 2.712 | 6 |
| 6,5             | 1.886          | 863           | 3.142 | 6 |
| 7,0             | 1.617          | 328           | 2.269 | 6 |
| 7,5             | 1.564          | 306           | 3.566 | 6 |
| 8,0             | 1.408          | 397           | 3.688 | 6 |



(a) MR médio por teor de CAP

(b) Todos os valores de MR por teor de CAP

Figura 5.2.4 - Variação dos valores de Módulo de Resiliência (MR) para a mistura 5 (60,0% de escória)

Para a M5, os valores de MR para todos os teores de CAP apresentaram valores inferiores ao da mistura comparativa (2.051 MPa), sendo que para o teor de 6,0% são praticamente iguais. Vale ressaltar que para esta dosagem, os valores encontrados para a mistura com 7,0% de CAP foram diferentes dos encontrados para a M2. Os desvios padrões para os valores de MR foram todos superiores ao encontrado para a mistura comparativa (264). Os valores da relação MR/RT apresentaram-se na seguinte ordem crescente: mistura com 7,0% < mistura com 6,0% < mistura comparativa (2.728) < mistura 6,5% < mistura 7,5% < mistura 8,0%. A mistura que se apresentou mais próxima da variação (de 3.000 a 3.500) para misturas na faixa C do DNER para CBUQ que utilizam o CAP 50/60 oriundo do petróleo Bachaquero (SOARES *et al.*, 2002), anteriormente utilizado nas pesquisas do LMP/DET/UFC, foi aquela com 6,5% de CAP.

Com relação às médias dos valores de MR encontradas para a M5, o aumento do teor de CAP levou a uma diminuição do valor de MR. O maior valor de MR encontrado foi para a mistura com 6,0% de CAP e o menor para a mistura com 8,0% de CAP (Figura 5.2.4(a)). Isto pode ser considerado razoável, uma vez que o ligante torna a mistura menos rígida. Os valores de MR mostraram-se bastante variáveis, como é possível observar na Figura 5.2.4(b). A mistura com teor de ligante de 6,5% apresentou as maiores variações, sendo encontrada uma diferença de até 80,0%, em relação à média dos valores. A mistura com teor de 6,0% foi a que apresentou menor variação.

O que foi observado para as misturas onde o ensaio de MR foi feito com cps ainda na dosagem Marshall (M4 e M5) é que existe uma zona onde a dispersão dos valores é maior. Para a M4 entre os teores de 5,5% e 6,0% de CAP e para a M5 entre os teores de 6,0% e 6,5% de CAP. Os TPs para esta duas misturas estão localizados entre estes teores. Para a M4 o TP foi de 5,7% e para a M5 o TP foi de 6,2%. Isto sugere que para um teor baixo de ligante o mesmo penetra os poros da escória graúda (Figura 5.2.5(a)), sobrando pouco ligante para o recobrimento total dos agregados. O aumento do teor de ligante, mas em pequena quantidade (0,5% por exemplo) conduz ao preenchimento dos poros da escória, porém ainda em quantidade insuficiente para compensar a heterogeneidade deste rejeito (Figura 5.2.5(b)). Com a continuação do aumento do teor de ligante, a heterogeneidade deixa de ser relevante e a dispersão dos valores, conseqüentemente, diminui (Figura 5.2.5(c)). Este fato é um indicativo de que, a fim de minimizar a dispersão nos resultados, o TP poderia ser aumentado.

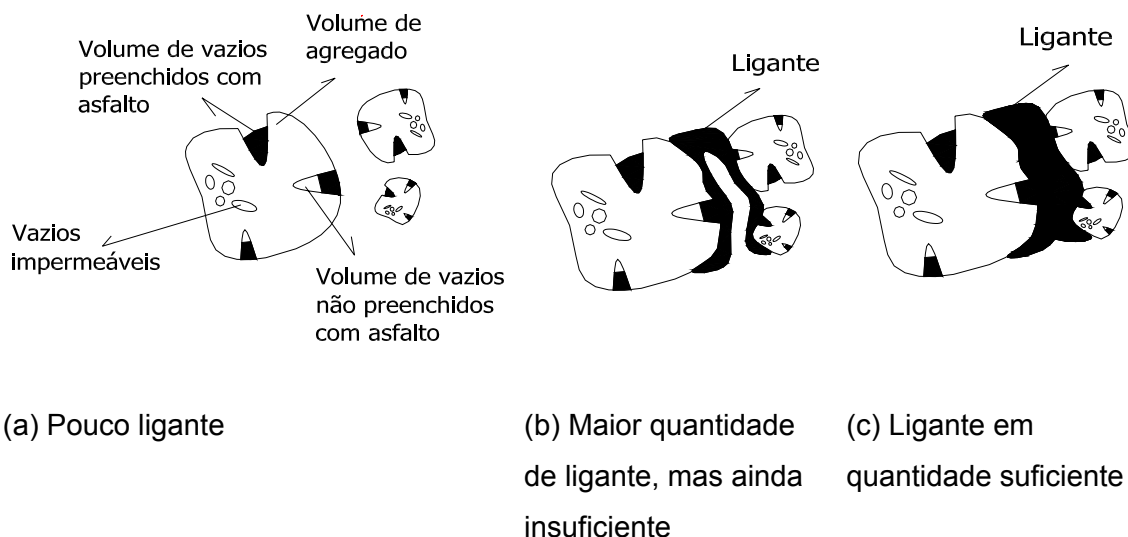


Figura 5.2.5 Esquema da interação ligante-agregados para a compensação da heterogeneidade do material

Caso os TPs fossem acrescidos do valor de ligante absorvido pelos agregados, os novos valores ficariam os contidos na Tabela 5.2.5. Percebe-se que os TPs ficariam bem superiores ao obtido para a mistura comparativa (6,4%), porém bastante próximos do obtido para a mistura do projeto COPPETEC (1996) (9,0%) que utilizou escória proveniente da CSN e CAP 20. Os resultados obtidos no projeto COPPETEC (1996) serão discutidos adiante no item 5.5 deste Capítulo.

Tabela 5.2.5 - Valores de Teor de Projeto (TP) convencional e acrescido do percentual de ligante absorvido, para as misturas experimentais com escória de aciaria

| TP (%)                         | Misturas |     |     |     |     |     |
|--------------------------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                | M1       | M2  | M3  | M4  | M5  | M6  |
| TP convencional                | 6,2      | 7,0 | 6,7 | 5,7 | 6,2 | 6,2 |
| TP conv. + % ligante absorvido | 9,1      | 9,9 | 9,6 | 8,6 | 9,1 | 9,1 |

Os ensaios de MR para a M6 (40,0% de escória) foram realizados no LMP/DET/UFC e na COPPE/UFRJ para verificar a dispersão dos resultados para diferentes equipamentos e operadores. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.2.6 e podem ser visualizados na Figura 5.2.6.

Tabela 5.2.6 - Valores de Módulo de Resiliência (MR) para a mistura 6 (40,0% de escória), ensaios realizados na UFC e na UFRJ, e comparativa

| Mistura          | MR (MPa, 25°C) |               | MR/RT | n  |
|------------------|----------------|---------------|-------|----|
|                  | Média          | Desvio Padrão |       |    |
| M6 (LMP/DET/UFC) | 4.715          | 1.293         | 3.322 | 3  |
| M6 (COPPE/UFRJ)  | 4.626          | 1.136         | 4.177 | 10 |
| Comparativa      | 2.051          | 264           | 2.728 | 3  |

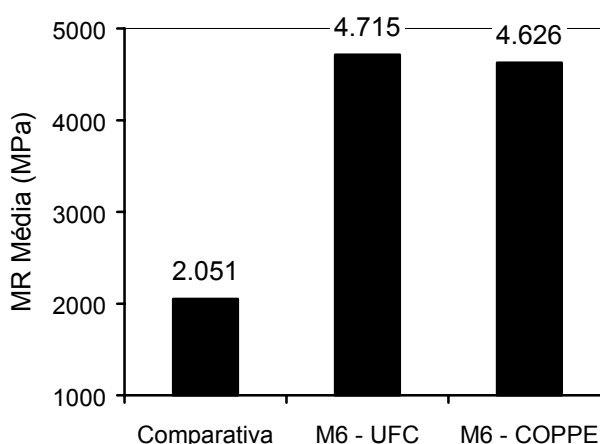


Figura 5.2.6 - Valores de Módulo de Resiliência (MR) para as misturas comparativa e 6 (40,0% de escória), ensaiada na UFC e na UFRJ

A M6 (40,0% de escória) apresentou valores de MR superiores a todas as outras misturas experimentais e também à comparativa. Já era esperado, devido aos valores encontrados nos ensaios de RT, que os valores de MR também fossem mais altos para esta mistura. Os valores obtidos para os ensaios realizados na UFC e na COPPE mostraram-se bastante próximos, apesar do tamanho da amostra ter sido diferente para estes dois locais. Esperava-se que para esta mistura os valores de MR fossem menos dispersos, devido à pequena dispersão encontrada nos parâmetros volumétricos, porém os valores dos desvios padrões não indicam isso. Esta mistura apresentou os maiores valores de desvios padrões, se comparada com as outras misturas experimentais e com a comparativa. A relação MR/RT para os ensaios realizados no LMP/DET/UFC foi inferior (cerca de 20,0%) à encontrada para os ensaios realizados na COPPE/UFRJ. Isto já era esperado visto que o valor de RT encontrado no LMP/DET/UFC foi superior ao encontrado na COPPE/UFRJ.

Para verificar a correta execução do ensaio e também se o procedimento adotado (não limitação do valor de carga a ser aplicada em 30,0% do valor de RT), o ensaio foi realizado para o mesmo cp em três posições diferentes. Os resultados podem ser observados na Tabela 5.2.7. O baixo desvio padrão encontrado indica que para um mesmo cp os resultados são muito próximos.

Tabela 5.2.7 - Valores de Módulo de Resiliência (MR) obtidos em um corpo de prova ensaiado em três posições (0°, 90° e 180°) para a mistura 6 (40,0% de escória)

| CP N° | MR (MPa, 25°C) |       |       |       |               |
|-------|----------------|-------|-------|-------|---------------|
|       | 0°             | 90°   | 180°  | Média | Desvio padrão |
| 01    | 5.532          | 5.493 | 5.401 | 5.475 | 67            |

Os altos valores de MR encontrados para a M6 podem ter sido influenciados pelo condicionamento de curto prazo (duas horas em estufa) ao qual esta mistura foi submetida. Outros autores já constataram que misturas utilizando escória de aciaria como agregado têm seus valores de MR aumentados quando submetidas a condicionamentos de curto e longo prazo (COPPETEC, 1996).

Apesar dos valores de MR para esta mistura em questão serem altos, não é correto afirmar que quanto maior o valor do MR melhor será esta mistura. O ideal é que a mistura tenha flexibilidade para suportar as solicitações do tráfego e resistência para combater o trincamento precoce. Um dos prováveis fatores causadores da grande dispersão encontrada é que acredita-se que os grãos devem apresentar além de forma e textura, resistências diferentes. Outro fato deve ainda ser levado em consideração, uma vez que percebeu-se, apesar da separação manual feita para esta mistura, o material apresenta grãos mistos (porosos e lisos) o que tornou quase impossível a completa separação dos grãos da escória. A presença deste tipo de grão pode ter influenciado estes resultados.

### 5.3 - FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL A TENSÃO CONTROLADA

A vida de fadiga a tensão controlada é o número de aplicações de um certo valor de carga necessário para levar a amostra à ruptura (PINTO, 1991; MEDINA, 1997). Este ensaio pode ser realizado no mesmo equipamento utilizado para o ensaio de MR, também com temperatura controlada. O ensaio de fadiga pode ser realizado a tensão ou a deformação controlada. O primeiro caso é mais comum no Brasil e não necessita da utilização do LVDT e nem do suporte para fixação do mesmo. A carga aplicada

deve induzir tensões normais horizontais de 10,0% a 50,0% do valor de RT (MEDINA, 1997). Esta carga é aplicada com duração de 0,1 s e descanso de 0,9 s. A deformação aumenta até o rompimento completo da amostra. Para o caso da deformação controlada, a deformação é mantida constante e a tensão inicial é diminuída até o final do ensaio, que é convencionado por alguns autores como a diminuição do módulo de rigidez ( $S_0$ ) em 50,0% do valor inicial (EPPS e MONISMITH, 1969<sup>\*</sup>; PRONK e HPMAN, 1990<sup>\*\*</sup>; TAYEBALI *et al.*, 1993<sup>\*\*\*</sup> *apud* LOUREIRO, 2003).

O objetivo deste ensaio é simular a passagem de roda de um veículo no pavimento e é de fundamental importância, visto que a maioria dos defeitos encontrados nos pavimentos brasileiros é devido ao fenômeno da fadiga (PINTO, 1991; MEDINA, 1997). A vida de fadiga pode ser expressa pelas Equações 5.3.1 e 5.3.2. A Figura 5.3.1 mostra um esquema da diferença de tensões no centro da amostra e o posicionamento do cp para a realização do ensaio na prensa de compressão diametral de ensaios dinâmicos.

$$N = K \left( \frac{1}{\sigma_t} \right)^n \quad (5.3.1)$$

$$N = K \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^n \quad (5.3.2)$$

Onde: N = vida de fadiga;

$\sigma_t$  = tensão de tração repetida atuante;

$\Delta\sigma$  = diferença entre as tensões de compressão e tração no centro da amostra;

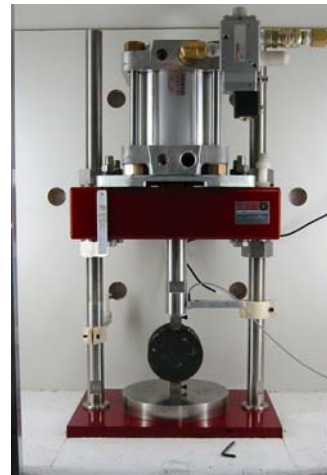
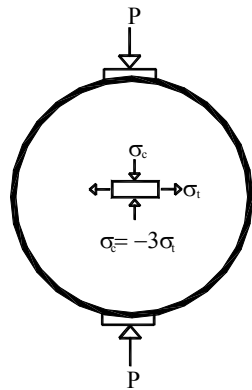
K, n = constantes determinadas a partir dos resultados de laboratório, em escalas logarítmicas.

---

<sup>\*</sup>EPPS, J.A. e C.L. MONISMITH, 1969, Influence of Mixture Variables on the Flexural Fatigue Properties of Asphalt Concrete. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, Volume 38.

<sup>\*\*</sup>PRONK, A.C. e P.C. HPMAN, 1990, Energy Dissipation: The Leading Factor of Fatigue. In *Highway Research: Sharing the Benefits. Proceedings of a Conference of the United States Strategic Highway Research Program*, London, p. 255-267.

<sup>\*\*\*</sup>TAYEBALI, A.A.; J.A. DEACON; J.S. COPLANTZ e C.L. MONISMITH, 1993, Modeling Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixtures. *Proceedings Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT, v. 62, p. 285-421.



(a) Esquema  $\Delta\sigma$  no centro da amostra (b) Posicionamento cp para o ensaio de vida de fadiga (LOUREIRO, 2003)

Figura 5.3.1 - Esquema da diferença de tensões e do equipamento utilizado para o ensaio de vida de fadiga

O ideal seria realizar o ensaio a deformação controlada a fim de avaliar a evolução do dano sofrida no material durante o ensaio de fadiga (PINTO, 1991; MEDINA, 1997). Porém, este tipo de ensaio é mais difícil de ser executado devido à necessidade de se ajustar a força aplicada com os desvios da deformação (MEDINA, 1997). PINTO (1991) determinou o MR nas primeiras aplicações de carregamento, para cada nível de tensão. Com isso, expressou a vida de fadiga em função da deformação resiliente inicial. LOUREIRO (2003) propôs o estabelecimento de um critério de ruptura no ensaio realizado a tensão controlada que não fosse a ruptura total do cp. Este critério foi a observação da formação das primeiras trincas (através da medida de deformações no ensaio a tensão controlada) no cp capazes de gerar um decréscimo na rigidez. Para o presente estudo, os ensaios foram realizados de maneira convencional a tensão controlada devido à disponibilidade de execução no laboratório utilizado para realização desta pesquisa.

Para as M2 (60,0% de escória) e M6 (40,0% de escória), os cps moldados com o teor de 7,0% e 6,2% de ligante, respectivamente, foram submetidos aos ensaios de fadiga por compressão diametral a tensão controlada. Os valores de K e n para as três misturas estão na Tabela 5.3.1. Os resultados do ensaio de fadiga das três misturas (M2, M6 e mistura comparativa) estão na Figura 5.3.2. Os ensaios foram realizados para tensões de tração equivalentes de 10,0%, 20,0%, 30,0% e 40,0% do valor de RT para as misturas M2 e comparativa e 20,0%; 30,0%; 40,0% e 50,0% para a M6. Para a M2, foram ensaiados quatro cps para cada nível de tensão, exceto para a menor

diferença de tensões devido à longa duração do ensaio (48 horas) foi realizado apenas um ensaio. Este único ponto para a tensão mais baixa pode ter sido responsável pela maior inclinação da reta no gráfico log-log, fazendo com que a diferença em relação a reta da mistura comparativa fique maior. Para a M6 foram ensaiados dois cps para cada nível de tensão, assim como para a mistura comparativa.

Tabela 5.3.1 - Constantes (MPa) do ensaio de fadiga para as misturas 2 e 6 (60,0% e 40,0% de escória, respectivamente) e comparativa

| Mistura     | K      | n    |
|-------------|--------|------|
| M2          | 672    | -4,0 |
| M6          | 64.407 | -5,1 |
| Comparativa | 688    | -2,1 |

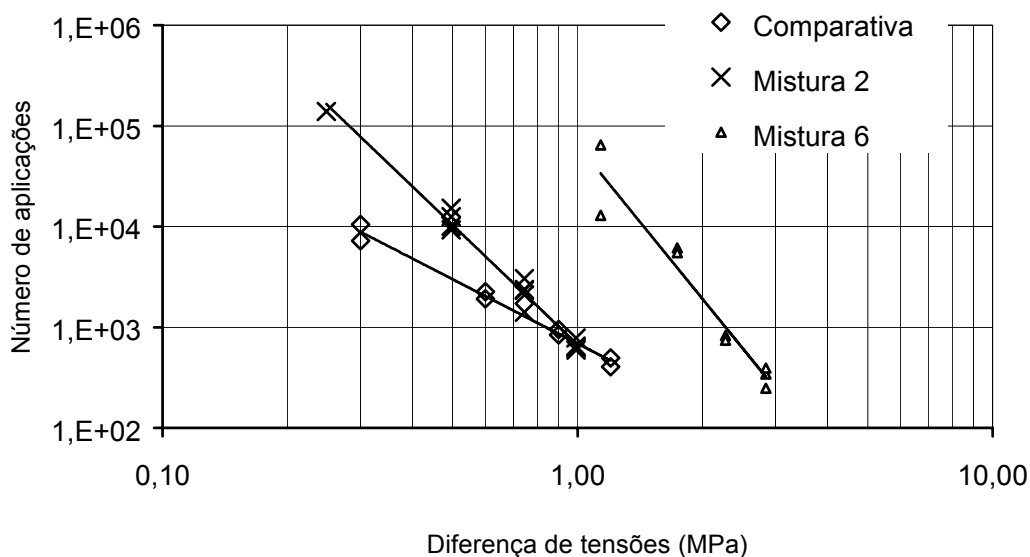


Figura 5.3.2 - Vida de fadiga a tensão controlada (25°C) para as misturas 2 e 6 (60,0% e 40,0% de escória, respectivamente) e comparativa

Percebe-se que para baixas tensões a M2 (60,0% de escória) apresenta uma tendência a maior vida de fadiga, se comparada com a mistura convencional. Já para altas tensões, estas duas misturas (M2 e comparativa) apresentaram vidas de fadiga praticamente iguais. A M6 (40,0% de escória) apresentou uma tendência de maior vida de fadiga para todas as diferenças de tensões, se comparada com as outras duas misturas (M2 e comparativa). A comparação entre as vidas de fadiga para este tipo de ensaio é limitada porque o desempenho das misturas em serviço estará associado às tensões na estrutura do sistema de camadas como um todo (CTPETRO, 2003). O

ideal é fazer um projeto e verificar a posição da curva de fadiga a partir das tensões geradas num sistema de camadas. A partir daí, estabelecendo-se uma mesma espessura de pavimento, as curvas podem ser comparadas e será possível estimar para qual mistura seria esperada maior vida de fadiga, como se verá no próximo capítulo.

Percebe-se que os Ks para a M2 e a comparativa não são muito diferentes, o mesmo não sendo verificado para o expoente n da curva com aciaria que é quase o dobro do expoente da curva de comparação. Apesar dos valores de MR das misturas M2 e comparativa terem a mesma ordem de grandeza, esperava-se que a mistura com maior valor de MR (mistura convencional) apresentasse uma curva de fadiga acima daquele com menor valor de MR (M2). Para estas misturas isto não foi constatado, apesar dos ensaios terem sido realizados por compressão diametral a tensão controlada. Deve-se atentar, porém que a mistura utilizada não é convencional. O agregado, escória de aciaria, pode ter formado um esqueleto mineral mais intertravado do que aquele formado pelo agregado convencional. O K para a M6 mostrou-se bastante superior aos outros dois. Com relação ao expoente n para esta mistura (M6), apresentou-se ainda maior do que o da M2. Para este caso, a mistura que apresentou os maiores valores de RT e MR (M6) também apresentou uma tendência de maior vida de fadiga.

É importante também observar que como em campo o número de aplicações é bem maior do que ocorre no ensaio, a inclinação das retas torna-se mais importante do que o fato de uma estar ou não sobre a outra. Desta forma, a M6 apresenta-se com maior inclinação, se comparada com as misturas M2 e comparativa, e com isso tende a apresentar também uma melhor vida de fadiga. Deve-se atentar que para baixas tensões (equivalentes a 20,0% do valor de RT) só foram realizados dois ensaios o que pode ter aumentado a inclinação da reta obtida para a M6.

#### **5.4 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO RETIDA POR UMIDADE INDUZIDA (AASHTO T-283/89)**

O dano causado pela umidade nas misturas asfálticas afeta diretamente o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos. Com o intuito de melhor avaliar a adesividade, capacidade do ligante de aderir aos agregados (MOURA, 2001), foi realizado o ensaio de resistência à tração retida por umidade induzida.

A importância deste ensaio é devida ao fato do mesmo associar resultados laboratoriais com o desempenho das misturas asfálticas em campo. O método utilizado neste estudo, AASHTO T-283/89, é uma junção de dois outros métodos: TUNNICLIFF e ROOT NCHRP-274/84 (ASTM-D 4867/88) e o Ensaio de *Lottman* NCHRP-246/82 (MOURA, 2001). Este método avalia o efeito danoso da água em cps com Vv entre 6,0% e 8,0%. O ensaio de RT é realizado em dois grupos de cps. O primeiro sem condicionamento e o segundo com o mesmo condicionamento do grupo III do Ensaio de *Lottman*, isto é:

- Saturação: submeter os cps (imersos em água a 25°C) a uma pressão de 254 mm - 660 mm de coluna de mercúrio por aproximadamente 5 minutos para garantir a completa saturação dos mesmos (entre 55,0% e 80,0%);
- Aquecimento: imergir os cps durante  $24 \pm 1$  hora em água a temperatura de  $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ;
- Congelamento: depois de envolver os cps em filme plástico e colocá-los em um saco plástico com 10 ml de água (25°C), refrigerar os mesmos a  $-18^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  por no mínimo 16 horas;
- Descongelamento: submergir os cps em água ( $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ) por 24 horas ainda com o filme e o saco e posteriormente, depois de retiradas as proteções (filme e saco plástico) submergir-los e em água (25°C) por duas horas.

Apesar deste ensaio utilizar o mesmo tipo de condicionamento severo do ensaio *Lottman*, este processo não simula as condições climáticas ocorridas em campo. Este ensaio (AASHTO T-283, 1989) se compromete unicamente a avaliar o comportamento de misturas asfálticas diante da ação deletéria da água (MOURA, 2001).

O ensaio foi realizado na COPPE/UFRJ apenas para a M6 (40,0% de escória), no TP. Optou-se por realizar este ensaio devido à falta de recobrimento nos agregados pelo ligante durante a moldagem dos cps, apesar da utilização do CAP-DOP, como pode ser observado na Figura 5.4.1.



(a) Interação ligante-agregado

(b) Adesividade não satisfatória no cp

Figura 5.4.1 - Ilustração de falta de recobrimento dos agregados pelo ligante durante a moldagem Marshall dos corpos de prova

Para a realização deste ensaio, os cps têm que possuir um Vv entre 6,0% e 8,0% no TP. Para obtenção de tal Vv, o número de golpes para compactação dos cps foi sendo diminuído até alcançar o objetivo desejado. Iniciou-se com 50 golpes e diminuiu-se o número de golpes de 10 em 10. O valor considerado ideal para a realização do ensaio foi de 15 golpes. O gráfico número de golpes versus Vv (%) pode ser visualizado na Figura 5.4.2.

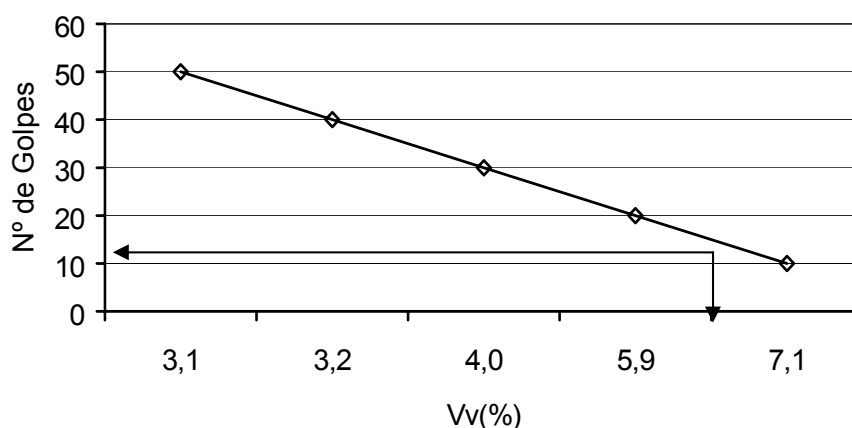


Figura 5.4.2 - Variação do Vv (%) com o número de golpes para a mistura 6 (40,0% de escória) no Teor de Projeto (TP)

Percebe-se que, como era de se esperar, a diminuição do número de golpes gerou um aumento do Vv nos cps. A diminuição do número de golpes de 50 para 40, 40 para 30, 30 para 20 e 20 para 10 levou a um aumento de 0,1%; 0,8%; 1,9% e 1,2% no Vv, respectivamente.

Optou-se por moldar quatro grupos de cps. Os dois primeiros foram confeccionados com o uso do CAP-DOP, sendo um para realização do ensaio com condicionamento e o outro para realização do ensaio sem o condicionamento. Os outros dois grupos de cps foram confeccionados com a utilização de 1,0% de CAP-DOP e os ensaios foram realizados da mesma maneira descrita para os dois primeiros grupos. Os cps moldados com 15 golpes apresentaram um Vv médio de 6,9%, dentro do exigido pela norma. Os cps moldados com DOPE apresentaram um Vv médio igual a 7,6%, enquanto que aqueles que foram moldados sem DOPE apresentaram Vv médio igual a 6,1%, para o mesmo teor de ligante (6,2%).

Os resultados encontrados para ensaios de RT com e sem adição de CAP-DOP para a M6 e comparativa estão na Tabela 5.4.1, para cps sem condicionamento e na Tabela 5.4.2, para cps com condicionamento. As médias são resultados de três determinações.

Tabela 5.4.1 - Valores de Resistência à Tração Indireta (RT) para a mistura 6 (40,0% de escória) com utilização de DOPE, sem DOPE e mistura comparativa - corpos de prova sem condicionamento

| Mistura     | RT (MPa, 25°C) com DOPE |               | RT (MPa, 25°C) sem DOPE |               |
|-------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
|             | Média                   | Desvio Padrão | Média                   | Desvio Padrão |
| M6 (COPPE)  | 1,16                    | 0,06          | 1,18                    | 0,13          |
| Comparativa | -                       | -             | 0,75                    | 0,07          |

Tabela 5.4.2 - Valores de Resistência à Tração Indireta (RT) para a mistura 6 (40,0% de escória) com utilização de DOPE, sem DOPE e mistura comparativa - corpos de prova com condicionamento

| Mistura    | RT (MPa, 25°C) com DOPE |               | RT (MPa, 25°C) sem DOPE |               |
|------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
|            | Média                   | Desvio Padrão | Média                   | Desvio Padrão |
| M6 (COPPE) | 0,96                    | 0,06          | 0,98                    | 0,15          |

A Razão de Resistência à Tração por compressão diametral (RRT) é obtida dividindo-se o valor da RT com condicionamento dos cps (média de três determinações) pelo valor da RT sem condicionamento dos cps. Este percentual deve ser maior ou igual a 80,0% para que a amostra seja aprovada (MOURA, 2001). A mistura com utilização de DOPE apresentou uma RRT de 83,0%, ou seja, uma perda de resistência de 17,0%. Enquanto que a mistura sem utilização de DOPE apresentou uma RRT de 82,6%, ou

seja, uma perda de resistência de 17,4%. As duas misturas (com e sem utilização de DOPE) apresentaram RRT maior do que o mínimo admissível (80,0%).

Percebe-se que os valores encontrados para as duas misturas avaliadas neste ensaio são bastante próximos. A diferença encontrada entre os valores de RRT foi de 0,4%. Este fato indica que, com relação à ação deletéria da água, a utilização do DOPE nas misturas não foi relevante, apesar do ensaio empírico do DNER ME – 078 (1994) ter apontado a necessidade de utilização de 1,0% de DOPE.

## **5.5 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS**

Diante da grande dispersão encontrada nos resultados dos ensaios mecânicos, procurou-se comparar os resultados encontrados com outros estudos realizados com utilização de escória de aciaria. Apesar da revisão bibliográfica realizada para este estudo, a grande maioria dos trabalhos consultados não havia utilizado este rejeito na camada de revestimento ou realizado os mesmos ensaios utilizados nesta pesquisa. Este fato dificultou a comparação com outros trabalhos, embora confirmando relativa originalidade deste estudo.

O único trabalho consultado que reportou os valores de RT, MR e vida de fadiga foi o projeto: “Pavimento econômico a partir de carboquímicos e escórias de aciaria da CSN” (COPPETEC, 1996). Este projeto tinha como objetivo caracterizar misturas asfálticas com utilização de escória de aciaria (proveniente da CSN), pó de pedra, fíler de cimento Portland e ligante CSN (75,0% de CAP e 25,0% de alcatrão). Os resultados encontrados para os ensaios de RT e MR, bem como a relação MR/RT, estão na Tabela 5.5.1. A mistura 1 utilizou CAP 20 (9,0%) e a mistura 2 utilizou CAP CSN (7,0%). Estas duas misturas utilizaram aproximadamente a proporção de 70,0% de escória de aciaria, em peso do agregado mineral.

Tabela 5.5.1 - Resultados dos ensaios mecânicos para as misturas testadas no projeto COPPETEC (1996)

| Mistura                 | Condicionamento                        | RT (MPa), 25°C |               | MR (MPa), 25°C |               | MR/RT |
|-------------------------|--|----------------|---------------|----------------|---------------|-------|
|                         |  | Média          | Desvio Padrão | Média          | Desvio Padrão |       |
| Mistura 1<br>(COPPETEC) | Sem condicionamento                    | 0,62           | 0,02          | 2.330          | 128           | 3.758 |
|                         | SHRP - 4 horas/135°C                   | 1,40           | 0,09          | 4.700          | 815           | 3.357 |
|                         | SHRP - 4 horas/135°C +<br>2 dias/100°C | 0,75           | 0,03          | 2.763          | 221           | 3.684 |
|                         | SHRP - 4 horas/135°C +<br>5 dias/85°C  | 0,99           | 0,08          | 3.857          | 592           | 3.896 |
| Mistura 2<br>(COPPETEC) | Sem condicionamento                    | 0,58           | 0,01          | 1.840          | 53            | 3.172 |
|                         | SHRP - 4 horas/135°C                   | 0,80           | 0,02          | 3.933          | 320           | 4.916 |
|                         | SHRP - 4 horas/135°C +<br>2 dias/100°C | 0,80           | 0,04          | 3.780          | 544           | 4.725 |
|                         | SHRP - 4 horas/135°C +<br>5 dias/85°C  | 0,96           | 0,12          | 4.120          | 298           | 4.292 |

Os valores de RT (sem condicionamento) encontrados para as misturas testadas no projeto COPPETEC (1996), foram inferiores aos valores encontrados para as misturas experimentais deste estudo (exceto para a M2 e para os teores de 7,5% e 8,0% de CAP da M5). Os desvios padrões encontrados foram inferiores aos encontrados para as misturas M3, M4, M5 e M6 e superiores aos das M1 e M2, testadas nesta pesquisa.

Para os valores de MR (sem condicionamento), o valor encontrado para a mistura 1 (COPPETEC, 1996) foi superior aos encontrados para as M1, M2, M3 e para o teor de 5,5% de CAP da M4. Já o valor encontrado para a mistura 2 (COPPETEC) só foi superior aos encontrados para a M2 e para os teores de 7,0%; 7,5% e 8,0% de CAP para a M5. Os desvios padrões para estas misturas (COPPETEC) foram inferiores a todos encontrados para as misturas experimentais investigadas nesta pesquisa (exceto para a M2).

Para os ensaios de RT e MR, realizados após os condicionamentos, percebe-se que os valores encontrados foram superiores aos encontrados sem o condicionamento. A mistura 1 (COPPETEC, 1996) apresentou um valor de MR próximo do encontrado

para a M6 quando o ensaio foi realizado com condicionamento de curto prazo (SHRP - 4 horas/ 135°C). Já a mistura 2 (COPPETEC, 1996) só apresentou um valor de MR próximo do encontrado para a M6 quando o ensaio foi realizado após o condicionamento de longo prazo (SHRP - 4 horas/135°C + 5 dias/85°C). Apesar dos condicionamentos para este projeto (COPPETEC, 1996) terem sido diferentes do realizado para esta pesquisa, percebe-se que de maneira geral o envelhecimento do ligante faz com que os valores de RT e MR se elevem.

As misturas que utilizaram escória de aciaria (COPPETEC, 1996) apresentaram curvas de fadiga com os valores de K e n contidos na Tabela 5.5.2. Os resultados do ensaio de fadiga por compressão diametral a tensão controlada podem ser visualizados na Figura 5.5.1 para a mistura 1 do projeto COPPETEC e para as três misturas deste estudo (comparativa, M2 e M6). Para a mistura do projeto COPPETEC o ensaio foi realizado para tensões de tração equivalente a 10,0%; 20,0%; 30,0% e 40,0% do valor de RT e sem condicionamento em estufa. Foram ensaiados dois cps para cada nível de tensão (exceto para a menor diferença de tensão, onde foram ensaiados três cps). Os valores necessários para a confecção do gráfico de vida de fadiga versus diferença de tensões a 25°C, para a mistura 2, não estão no documento consultado, o que impossibilitou esta comparação. Pode-se perceber que a mistura 1 (COPPETEC) apresentou vida de fadiga praticamente coincidente com a mistura comparativa deste estudo.

Tabela 5.5.2 - Constantes (MPa) do ensaio de fadiga para as misturas do projeto COPPETEC (1996)

| Mistura              | K   | n     |
|----------------------|-----|-------|
| Mistura 1 (COPPETEC) | 540 | -2,28 |
| Mistura 2 (COPPETEC) | 114 | -2,40 |

Os resultados encontrados para as misturas confeccionadas pela COPPE/UFRJ apresentaram menor dispersão. Porém, deve-se levar em consideração que os materiais utilizados neste projeto são diferentes daqueles utilizados nesta pesquisa, tanto o CAP (tanto o tipo quanto o teor) quanto a escória (para o projeto COPPETEC, os grãos eram todos porosos). Acredita-se que a origem da escória é um fator determinante nas características da mesma.

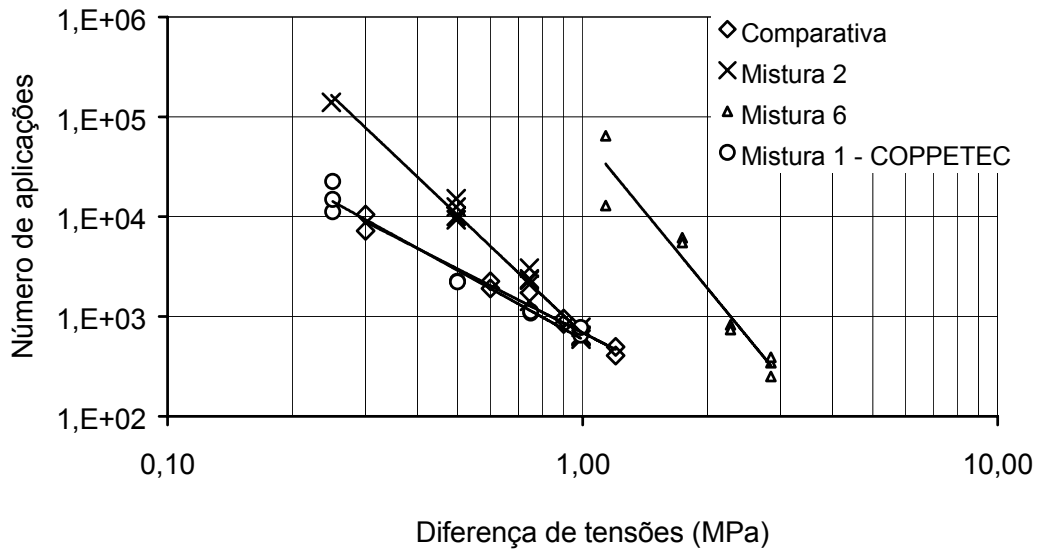


Figura 5.5.1 - Vida de fadiga a tensão controlada (25°C) para as misturas comparativa, 2 e 6 (60,0% e 40,0% de escória, respectivamente) e para a mistura 1 do projeto COPPETEC (1996)



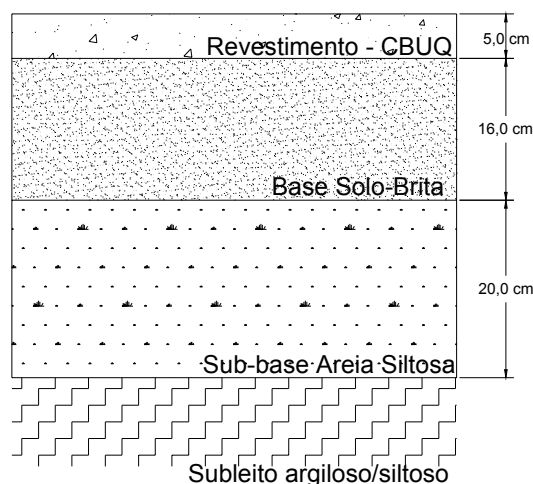


Figura 6.1.2 - Estrutura do trecho Pajuçara-Pacatuba

As características das diversas camadas, obtidas na fase de projeto, do trecho Pajuçara-Pacatuba estão nas Tabelas 6.1.1 a 6.1.4. A fim de verificar estas características, os ensaios foram refeitos em laboratório por BENEVIDES (2000) e os resultados também estão nestas Tabelas. Para a camada de revestimento (R), foram obtidos os valores de estabilidade (Est.), fluência (Fl.) e peso específico (P). Para as camadas granulares (base, sub-base e subleito) a caracterização foi baseada na energia de compactação (En.), podendo ser: modificada (M), intermodificada (IM), intermediária (I) ou normal (N). Ainda para estas camadas, Ex. = expansão e Hot. = umidade ótima. Com relação ao Limite de Liquidez (LL) e ao Índice de Plasticidade (IP), as camadas granulares são não líquidas e não plásticas.

Tabela 6.1.1 - Características físicas de projeto e obtidas em laboratório por BENEVIDES (2000) da camada de revestimento do trecho Pajuçara-Pacatuba

| Caract. | R    | Faixa | CAP (%) | Vv (%) | RBV (%) | Est. (kgf) | Fl. (1/100") | P (kgf/m <sup>3</sup> ) |
|---------|------|-------|---------|--------|---------|------------|--------------|-------------------------|
| Projeto | CBUQ | C     | 5,4     | 4,2    | 70      | 430        | 13           | 2.326                   |
| Lab.    | CBUQ | C     | 5,4     | 4,4    | 73      | 580        | 13           | 2.336                   |

Tabela 6.1.2 - Características físicas de projeto e obtidas em laboratório por BENEVIDES (2000) da camada de base do trecho Pajuçara-Pacatuba

| Caract. | Composição          | Faixa | CBR (%) | En. | P (kgf/m <sup>3</sup> ) | Ex. (%) | Hot. (%) |
|---------|---------------------|-------|---------|-----|-------------------------|---------|----------|
| Projeto | Solo-Brita (60-40)% | D     | 84,5    | IM  | 2.048                   | -       | 4,40     |
| Lab.    | Solo-Brita (60-40)% | D     | 84,5    | IM  | 2.195                   | -       | 4,40     |

Tabela 6.1.3 - Características físicas de projeto e obtidas em laboratório por BENEVIDES (2000) da camada de sub-base do trecho Pajuçara-Pacatuba

| Caract. | Composição | CBR (%) | En. | P (kgf/m <sup>3</sup> ) | Ex. (%) | Hot. (%) |
|---------|------------|---------|-----|-------------------------|---------|----------|
| Projeto | S/ mistura | 54,0    | I   | 2.080                   | 0,10    | 5,50     |
| Lab.    | S/ mistura | 57,0    | I   | 2.164                   | 0,10    | 5,50     |

Tabela 6.1.4 - Características físicas de projeto e obtidas em laboratório por BENEVIDES (2000) do material de subleito do trecho Pajuçara-Pacatuba

| Caract. | CBR (%) | En. | P (kgf/m <sup>3</sup> ) | Ex. (%) | Hot. (%) |
|---------|---------|-----|-------------------------|---------|----------|
| Projeto | 9,0     | N   | 1.803                   | 0,70    | 10,80    |
| Lab.    | 8,0     | N   | 2.113                   | 0,30    | 8,50     |

Para as camadas granulares, os resultados dos ensaios triaxiais dinâmicos estão na Tabela 6.1.5, para os dois valores de umidade ensaiados (Hot. e Hot. - 1,0%). Para a camada de revestimento, os resultados reportados na Tabela 6.1.6 são referentes às misturas avaliadas neste estudo, já que as mesmas serão utilizadas nesta análise em substituição à camada de revestimento original do trecho. Os resultados dos ensaios de RT e MR, além da relação MR/RT estão na citada Tabela. Para a M6, ensaiada na UFC e na UFRJ, os resultados são uma média dos valores encontrados nas duas instituições. As equações obtidas no ensaio de fadiga em função da diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ ) para as misturas comparativa, M2 (60,0% de escória) e M6 (40,0% de escória) estão na Tabela 6.1.7.

Tabela 6.1.5 - Equações do Módulo de Resiliência (MR) e correlações para as camadas granulares do trecho Pajuçara-Pacatuba (BENEVIDES, 2000)

| Camada   | Umidade (%)        | MR (MPa)                   | MR (kgf/cm <sup>2</sup> )    | R <sup>2</sup> |
|----------|--------------------|----------------------------|------------------------------|----------------|
| Base     | Hot. = 4,40        | 968,6 $\sigma_3^{0,3021}$  | 4.893,4 $\sigma_3^{0,3021}$  | 0,62           |
|          | Hot. - 1,0% = 3,40 | 1671,7 $\sigma_3^{0,5147}$ | 5.163,2 $\sigma_3^{0,5147}$  | 0,89           |
| Sub-base | Hot. = 5,50        | 1198,0 $\sigma_3^{0,4688}$ | 4.114,1 $\sigma_3^{0,4688}$  | 0,79           |
|          | Hot. - 1,0% = 4,50 | 916,5 $\sigma_3^{0,1304}$  | 6.907,8 $\sigma_3^{0,1304}$  | 0,45           |
| Subleito | Hot. = 10,80       | 237,4 $\sigma_d^{-0,2131}$ | 3.966,2 $\sigma_d^{-0,2131}$ | 0,56           |

Tabela 6.1.6 - Resistência à Tração (RT), Módulo de Resiliência (MR) e relação MR/RT para as misturas comparativa, M2 (60,0% de escória) e M6 (40,0% de escória), utilizadas como revestimento nas análises deste estudo

| Mistura     | RT (kgf/cm <sup>2</sup> , 25°C) |      | MR (kgf/cm <sup>2</sup> , 25°C) |        | MR/RT |
|-------------|---------------------------------|------|---------------------------------|--------|-------|
|             | Média                           | DP   | Média                           | DP     |       |
| Comparativa | 7,50                            | 0,74 | 20.510                          | 2.640  | 2.728 |
| M2          | 6,20                            | 0,06 | 18.360                          | 340    | 2.944 |
| M6          | 13,60                           | 1,97 | 46.710                          | 12.150 | 3.750 |

Tabela 6.1.7 – Constantes (MPa) do ensaio de fadiga a tensão controlada, em função da diferença de tensões, para as misturas comparativa, M2 (60,0% de escória) e M6 (40,0% de escória), utilizadas como revestimento nas análises deste estudo

| Mistura     | K      | n    |
|-------------|--------|------|
| Comparativa | 688    | -2,1 |
| M2          | 672    | -4,0 |
| M6          | 64.407 | -5,1 |

## 6.2 - ANÁLISES UTILIZANDO O FEPAVE2

As análises foram feitas utilizando o programa computacional FEPAVE2 (MOTTA, 1991\* e SILVA, 1995\*\* *apud* BENEVIDES, 2000), usando o modelo elástico linear para a camada de revestimento e elástico não-linear para as outras camadas. A partir de alguns dados de entrada, é feita a análise de tensões e deformações no pavimento e como resultados o programa fornece: deflexão máxima admissível na superfície, deformação específica de tração, diferença de tensão no revestimento, tensão vertical no subleito e tensão de tração no revestimento. Estes resultados são então comparados com os critérios de aceitação estabelecidos pelo projetista. Caso algum destes critérios não seja aceito, a estrutura ou até mesmo alguma camada do pavimento é modificada e os cálculos são refeitos.

Os dados de entrada utilizadas nesta análise foram os seguintes:

- Raio da área de carregamento: 10,80 cm;
- Pressão na área de carregamento: 5,60 kgf/cm<sup>2</sup>;

\*MOTTA, L.M.G., 1991, *Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis: Critério de Confiabilidade e Ensaio de Carga Repetida*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

\*\*SILVA, P.D.E.A., 1995, *Contribuições para o Aperfeiçoamento do Emprego do Programa FEPAVE2 em Estudos e Projetos de Pavimentos Flexíveis*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- Número de camadas: 4;
- Espessura das camadas: determinadas a partir das alternativas estabelecidas. Estas alternativas serão discutidas adiante;
- Peso específico das camadas: os valores adotados para as camadas granulares foram os descritos anteriormente, obtidos em laboratório por BENEVIDES (2000). Para as misturas que utilizaram escória de aciaria em seus revestimentos, o valor de  $2.500 \text{ kgf/m}^3$  foi considerado baseado nos valores obtidos em laboratório na presente pesquisa;
- Módulo de resiliência: os valores de MR foram também os descritos anteriormente, sendo que somente para a camada de revestimento foi considerado o desvio padrão;
- Parâmetros  $K_1$  e  $K_2$ : os valores para as camadas granulares estão na Tabela 6.2.1;
- Código dos materiais: os códigos adotados foram: 3 (para materiais com MR constante), 1 (para solos granulares), 1 (para solos granulares) e 6 (para solos coesivos – função da  $\sigma_d$ ), para as camadas de revestimento, base, sub-base e subleito respectivamente;
- Coeficiente de Poisson: foram assumidos os seguintes valores: 0,25; 0,35; 0,35 e 0,40 para as camadas de revestimento, base, sub-base e subleito respectivamente.

Tabela 6.2.1 - Parâmetros  $K_1$  e  $K_2$  para dimensionamento das camadas granulares do trecho Pajuçara-Pacatuba (BENEVIDES, 2000)

| Camada/Código | Coeficiente |         |
|---------------|-------------|---------|
|               | $K_1$       | $K_2$   |
| Base (1)      | 5.028       | 0,4084  |
| Sub-base (1)  | 5.511       | 0,2996  |
| Subleito (6)  | 3.966       | -0,2131 |

Os critérios de aceitação adotados foram (BENEVIDES, 2000):

- Deflexão máxima admissível (D) (0,01 mm): adotada como  $\log D_{adm.} = 3,148 - 0,188 \log N_p$  (DNER PRO 269/94) (PREUSSLER, 1983\* *apud* BENEVIDES, 2000);
- Diferença de tensões no revestimento ( $\Delta\sigma$ ) ( $\text{kgf/cm}^2$ ): a partir das equações obtidas no ensaio de fadiga, o número N e considerando 0,0% de área trincada ao final do período de projeto. A fim de considerar a heterogeneidade da escória de aciaria

\* PREUSSLER, E.S., 1983, *Estudo da Deformação Resiliente de Pavimentos Flexíveis e Aplicação ao Projeto de Camadas de Reforço*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

usada nas misturas que utilizaram escória de aciaria como agregado (M2 e M6), foi considerado um Fator Campo Laboratório (FCL) igual a  $10^3$ . Este fator é menor do que o considerado por PINTO, 1991 *apud* BENEVIDES, 2000 ( $10^4$ ), porém recomendado para áreas urbanas (RAMOS, 2003). Para a mistura comparativa (confeccionada com agregados convencionais) o FCL considerado foi o mesmo que BENEVIDES (2000);

- Tensão vertical admissível no subleito ( $\sigma_{\text{vadm.}}$ ) (kgf/cm<sup>2</sup>): obtida através da equação:  $\sigma_{\text{vadm.}} = 0,006 MR_{\text{médio}} / (1 + 0,7 \log N)$ .

Foram testadas três alternativas:

- Alternativa 1 - considerando as espessuras iniciais projetadas no método empírico do DNER para as camadas granulares e aumentando a espessura do revestimento de 5,0 cm para 6,0 cm;
- Alternativa 2 - considerando as espessuras iniciais projetadas no método empírico do DNER (semelhante à alternativa dois proposta por BENEVIDES, 2000);
- Alternativa 3 - considerando as espessuras iniciais projetadas no método empírico do DNER para as camadas granulares e diminuindo a espessura do revestimento de 5,0 cm para 4,0 cm.

Foram adotados níveis de confiabilidade de 75,0% a 99,9% (TRIOLA, 1999), recomendados para rodovias estaduais (BENEVIDES, 2000). Os resultados encontrados considerando como revestimento as misturas investigadas na presente pesquisa, ou seja, comparativa, M2 (60,0% de escória) e M6 (40,0% de escória), estão nas Tabelas 6.2.2, 6.2.3 e 6.2.4, respectivamente.

Tabela 6.2.2 - Resultados das análises feitas com utilização do FEPAVE2, utilizando a mistura comparativa como revestimento, para o trecho Pajuçara-Pacatuba

| Mistura     | Alt. | Parâmetros Calculados                 | Média | Desvio Padrão | Nível de Confiabilidade (%) |       |       |       | Critérios de aceitação |
|-------------|------|---------------------------------------|-------|---------------|-----------------------------|-------|-------|-------|------------------------|
|             |      |                                       |       |               | 75,0                        | 85,0  | 95,0  | 99,9  |                        |
| Comparativa | 1    | D (mm)                                | 32    | 1             | 33,15                       | 33,44 | 33,96 | 35,09 | 82                     |
|             |      | $\sigma_v$ (kgf/cm <sup>2</sup> )     | 0,51  | 0,01          | 0,52                        | 0,52  | 0,53  | 0,54  | 2,28                   |
|             |      | $\Delta\sigma$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 9,48  | 0,55          | 10,11                       | 10,27 | 10,56 | 11,18 | 13,33                  |
|             | 2    | D (mm)                                | 33    | 0             | 33                          | 33    | 33    | 33    | 82                     |
|             |      | $\sigma_v$ (kgf/cm <sup>2</sup> )     | 0,33  | 0,01          | 0,34                        | 0,34  | 0,35  | 0,36  | 2,28                   |
|             |      | $\Delta\sigma$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 10,70 | 0,34          | 11,09                       | 11,19 | 11,37 | 11,75 | 13,33                  |
|             | 3    | D (mm)                                | 34    | 0             | 34                          | 34    | 34    | 34    | 82                     |
|             |      | $\sigma_v$ (kgf/cm <sup>2</sup> )     | 0,36  | 0,01          | 0,37                        | 0,37  | 0,38  | 0,39  | 2,28                   |
|             |      | $\Delta\sigma$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 10,30 | 1,00          | 11,45                       | 11,74 | 12,26 | 13,39 | 13,33                  |

Tabela 6.2.3 - Resultados das análises feitas com utilização do FEPAVE2, utilizando a mistura 2 (60,0% de escória) como revestimento, para o trecho Pajuçara-Pacatuba

| Mistura                      | Alt. | Parâmetros Calculados                 | Média | Desvio Padrão | Nível de Confiabilidade (%) |       |       |       | Critérios de aceitação |
|------------------------------|------|---------------------------------------|-------|---------------|-----------------------------|-------|-------|-------|------------------------|
|                              |      |                                       |       |               | 75,0                        | 85,0  | 95,0  | 99,9  |                        |
| Mistura 2 (60,0% de escória) | 1    | D (mm)                                | 33    | 0             | 33,00                       | 33,00 | 33,00 | 33,00 | 82                     |
|                              |      | $\sigma_v$ (kgf/cm <sup>2</sup> )     | 0,52  | 0,00          | 0,52                        | 0,52  | 0,52  | 0,52  | 2,28                   |
|                              |      | $\Delta\sigma$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 9,49  | 0,38          | 9,93                        | 10,04 | 10,23 | 10,66 | 6,47                   |
|                              | 2    | D (mm)                                | 34    | 0             | 34                          | 34    | 34    | 34    | 82                     |
|                              |      | $\sigma_v$ (kgf/cm <sup>2</sup> )     | 0,34  | 0,00          | 0,34                        | 0,34  | 0,34  | 0,34  | 2,28                   |
|                              |      | $\Delta\sigma$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 10,53 | 0,91          | 11,58                       | 11,84 | 12,31 | 13,34 | 6,47                   |
|                              | 3    | D (mm)                                | 35    | 0             | 35                          | 35    | 35    | 35    | 82                     |
|                              |      | $\sigma_v$ (kgf/cm <sup>2</sup> )     | 0,37  | 0,00          | 0,37                        | 0,37  | 0,37  | 0,37  | 2,28                   |
|                              |      | $\Delta\sigma$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 10,12 | 1,69          | 12,06                       | 12,55 | 13,43 | 15,34 | 6,47                   |

Tabela 6.2.4 - Resultados das análises feitas com utilização do FEPAVE2, utilizando a mistura 6 (40,0% de escória) como revestimento, para o trecho Pajuçara-Pacatuba

| Mistura                      | Alt. | Parâmetros Calculados                 | Média | Desvio Padrão | Nível de Confiabilidade (%) |       |       |       | Critérios de Aceitação |
|------------------------------|------|---------------------------------------|-------|---------------|-----------------------------|-------|-------|-------|------------------------|
|                              |      |                                       |       |               | 75,0                        | 85,0  | 95,0  | 99,9  |                        |
| Mistura 6 (40,0% de escória) | 1    | D (mm)                                | 28    | 2             | 30,30                       | 30,88 | 31,92 | 34,18 | 82                     |
|                              |      | $\sigma_v$ (kgf/cm <sup>2</sup> )     | 0,43  | 0,03          | 0,46                        | 0,47  | 0,49  | 0,52  | 2,28                   |
|                              |      | $\Delta\sigma$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 13,03 | 0,51          | 13,62                       | 13,76 | 14,03 | 14,61 | 17,52                  |
|                              | 2    | D (mm)                                | 30    | 2             | 32,3                        | 32,88 | 33,92 | 36,18 | 82                     |
|                              |      | $\sigma_v$ (kgf/cm <sup>2</sup> )     | 0,29  | 0,02          | 0,31                        | 0,32  | 0,33  | 0,35  | 2,28                   |
|                              |      | $\Delta\sigma$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 11,21 | 0,46          | 11,74                       | 11,87 | 12,11 | 12,63 | 17,52                  |
|                              | 3    | D (mm)                                | 31    | 1             | 32,15                       | 32,44 | 32,96 | 34,09 | 82                     |
|                              |      | $\sigma_v$ (kgf/cm <sup>2</sup> )     | 0,32  | 0,02          | 0,34                        | 0,35  | 0,36  | 0,38  | 2,28                   |
|                              |      | $\Delta\sigma$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 18,64 | 2,47          | 21,48                       | 22,20 | 23,48 | 26,27 | 17,52                  |

Os resultados encontrados para a mistura comparativa indicam que quase todas as estruturas avaliadas foram aceitas para todos os níveis de confiabilidade investigados. A única alternativa que não foi aceita foi a terceira (onde a estrutura do revestimento foi diminuída de 1 cm em relação a original investigada por BENEVIDES, 2000) e apenas para o nível de 99,9% de confiabilidade. Para este caso onde houve rejeição, o critério ultrapassado foi a  $\Delta\sigma$ . A diferença entre a  $\Delta\sigma$  calculada e a admissível foi muito pequena (0,06 kgf/cm<sup>2</sup>).

Para a M2 (60,0% de escória), os resultados indicam que para as estruturas analisadas, o critério de aceitação ( $\Delta\sigma$ ) foi ultrapassado em todas as alternativas avaliadas, para todos os níveis de confiabilidade.

Para a última mistura avaliada (M6 com 40,0% de escória), a estrutura escolhida foi aceita para as alternativas 1 e 2, para todos os níveis de confiabilidade. A alternativa 3

foi rejeitada para todos os níveis de confiabilidade avaliados. Para esta mistura, assim como para as outras duas avaliadas, o critério de aceitação ultrapassado foi a  $\Delta\sigma$ .

Percebe-se que, para a análise realizada, a diferença entre os valores de MR e a dispersão dos resultados encontrados para as misturas com escória investigadas neste estudo é relevante no dimensionamento de pavimentos. A mistura comparativa com valor de MR e desvio padrão intermediários (entre as M2 e M6) foi a mistura que apresentou o menor número de estruturas rejeitadas. Já a M2 (60,0% de escória), com o menor valor de MR entre as três misturas avaliadas, teve todas as estruturas analisadas rejeitadas, apesar de ter apresentado o menor valor de desvio padrão. A utilização da M6 (40,0% de escória), que apresentou maiores valores de MR, RT e uma tendência de maior vida de fadiga, fez com que duas das três estruturas analisadas fossem aceitas, apesar desta mistura (M6) também ter apresentado o maior valor de desvio padrão para os resultados de MR. O critério de aceitação  $\Delta\sigma$  foi sempre o ultrapassado, para os casos em que as alternativas não foram aceitas. Nota-se também que a alternativa crítica foi a terceira, isto é, o caso onde a estrutura estudada por BENEVIDES (2000) teve a camada de revestimento diminuída de 1 cm.

A estrutura avaliada por BENEVIDES (2000), isto é, a camada de revestimento com uma mistura do tipo CBUQ convencional, coincidentemente apresentou o mesmo comportamento da mistura convencional estudada nesta pesquisa. Ou seja, para a alternativa onde as espessuras iniciais projetadas pelo método empírico do DNER foram mantidas com a camada de subleito em função de  $\sigma_d$  (alternativa 2), a estrutura foi rejeitada apenas para o nível de 99,9% de confiabilidade. Porém, estas misturas (comparativa deste estudo e convencional de BENEVIDES, 2000) apresentaram valores de MR na mesma ordem de grandeza. Estes resultados estão nas Tabelas 6.2.5 e 6.2.6. Vale ressaltar que os níveis de confiabilidade estudados por BENEVIDES (2000) foram diferentes dos utilizados nesta pesquisa, assim como as alternativas avaliadas por este autor. A única alternativa coincidente foi a citada, isto é, aquela onde a camada de revestimento foi mantida com a dimensão original de 5 cm.

Tabela 6.2.5 - Resistência à Tração (RT), Módulo de Resiliência (MR) e relação MR/RT para o revestimento (CBUQ original) do trecho Pajuçara-Pacatuba, estudada por BENEVIDES (2000)

| Mistura       | RT (kgf/cm <sup>2</sup> , 25°C) |       | MR (kgf/cm <sup>2</sup> , 25°C) |       | MR/RT |
|---------------|---------------------------------|-------|---------------------------------|-------|-------|
|               | Média                           | DP    | Média                           | DP    |       |
| CBUQ original | 9,50                            | 1,012 | 25.160                          | 5.148 | 2.648 |

Tabela 6.2.6 - Resultados das análises feitas com utilização do FEPAVE2, utilizando a mistura original (CBUQ) como revestimento, para o trecho Pajuçara-Pacatuba (BENEVIDES, 2000)

| Mistura       | Alt. | Parâmetros Calculados | Média | Desvio Padrão | Nível de Confiabilidade |       |       |       | Critérios de Aceitação |
|---------------|------|-----------------------|-------|---------------|-------------------------|-------|-------|-------|------------------------|
|               |      |                       |       |               | 50,0                    | 85,0  | 95,0  | 99,9  |                        |
| CBUQ original | 2    | D                     | 20    | 0             | 20                      | 20    | 20    | 20    | 82                     |
|               |      | $\sigma_v$            | 0,21  | 0,01          | 0,21                    | 0,22  | 0,23  | 0,24  | 2,28                   |
|               |      | $\Delta\sigma$        | 10,82 | 0,72          | 10,82                   | 11,57 | 12,00 | 13,04 | 12,63                  |

Com a diminuição do FCL de  $10^4$  (PINTO, 1991), utilizado por BENEVIDES (2000), para  $10^3$  (utilizado para áreas urbanas) a análise tornou-se mais “conservadora” o que fez com alguns dos critérios de aceitação fossem ultrapassados e conseqüentemente algumas alternativas estudadas fossem descartadas. Para estas alternativas que foram descartadas, a solução seria alterar as estruturas (dimensão das camadas) ou até mesmo trocar os materiais. Se o FCL tivesse sido mantido igual ao utilizado por BENEVIDES (2000), o critério  $\Delta\sigma$  (kgf/cm<sup>2</sup>) passaria de 6,47 e 17,52 para 11,60 e 27,58 para as M2 e M6, respectivamente. Esta mudança faria com que grande parte das alternativas descartadas fosse aceita.

# CAPÍTULO 7

---

---

## 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Após o trabalho experimental, foi possível concluir:

- A escória de aciaria objeto desta pesquisa apresenta possibilidade de uso em revestimentos asfálticos. Porém a metodologia de dosagem tem que ser compatibilizada para torna-se adequada diante da natureza do rejeito.
- Diante da alta heterogeneidade do rejeito, sugere-se que a empresa geradora do mesmo (Gerdau Cearense S.A.) faça a devida adequação no seu processo de vazamento e disposição da escória, a fim de garantir a homogeneidade do rejeito e assim incentivar o seu uso na pavimentação.
- Com relação à expansibilidade da escória utilizada, a mesma mostrou-se inferior ao limite estabelecido pelo DNER ME 262/94, porém alta (0,61%) visto que o rejeito será utilizado como agregado em revestimentos asfálticos. Com a continuação do ensaio (até o 30º dia) foi possível concluir que a expansibilidade não estabilizou, aumentando para 1,25% ao final do ensaio. Uma readequação do processo de armazenagem do rejeito pela Sobremetal Recuperação de Metais Ltda. através do controle de idade das pilhas de escória de aciaria e conseqüentemente da cura deste material seria indicado. Esta atitude facilitaria a comercialização do rejeito para fins rodoviários.
- Com relação aos ensaios exigidos pela norma ME 262/94 (DNER), sugere-se que para a melhor caracterização do rejeito, alguns ensaios adicionais sejam inseridos na mesma, como a difração de raio-X e a análise química (quantitativa e feita pelo microscópio de varredura eletrônica). Além do aumento da duração do ensaio de expansibilidade, segundo o método PTM 130/78, para melhor avaliação desta característica do rejeito.
- Com relação às densidades máximas, o estudo indicou que é necessário compatibilizar os procedimentos para obtenção da densidade máxima com o

utilizado para obtenção das densidades reais dos agregados. Isto é, para o caso em estudo, agregado muito poroso, recomenda-se a utilização do vácuo também para a obtenção das densidades reais dos agregados para que a densidade máxima teórica apresente valores superiores aos de densidade máxima medida, o contrário não é possível conceitualmente.

- O procedimento para obtenção do teor de projeto tem que ser investigado para utilização deste rejeito como agregado em misturas asfálticas. Há um indicativo de que com o aumento do teor de ligante, computando-se o percentual absorvido pela escória ou parte dele, as variações encontradas nos parâmetros volumétricos diminuirão. Qualquer comparação entre os teores de projeto pode ser considerada precipitada devido à alta variação encontrada nos parâmetros volumétricos para as misturas que utilizaram escória no estado bruto, isto é, com grãos lisos e porosos.
- Há uma tendência de que o condicionamento de curto prazo (duas horas em estufa) ao qual a mistura 6 (40,0% de escória) foi submetida contribuiu para o aumento dos valores de resistência à tração e módulo de resiliência. Este fato (envelhecimento) pode ter sido mais relevante até do que a separação da escória, no que diz respeito a estes resultados.
- De um modo geral, os resultados para os ensaios de módulo de resiliência foram mais dispersos do que os de resistência à tração e de fadiga. Há uma tendência de que as análises para o estado limite de resistência são menos afetadas pela heterogeneidade do material do que aquelas que utilizam valores de pequenas deformações. Nenhuma bibliografia consultada pela autora reportou o efeito da heterogeneidade da escória nos parâmetros mecânicos para misturas asfálticas utilizados nesta pesquisa. A literatura internacional utiliza outros parâmetros e a nacional, na sua grande maioria, só reporta valores de estabilidade e fluência Marshall.
- A necessidade de uso de DOPE, segundo o método empírico do DNER – ME 078 (1994), mostrou-se inadequada diante dos resultados do ensaio de resistência à tração retida por umidade induzida (AASHTO T-283, 1989). Os resultados deste segundo ensaio não revelam qualquer vantagem na adição de DOPE ao ligante.
- O tamanho da amostragem utilizada para realização tanto das dosagens quanto da caracterização mecânica das misturas experimentais tem que ser repensado. Três

corpos de prova, quantidade geralmente utilizada para caracterização de misturas dosadas com agregados pétreos, podem ser insuficientes para que conclusões mais embasadas sejam feitas sobre misturas com utilização de rejeito em suas confecções.

- Com relação ao dimensionamento realizado, as diferenças encontradas nos valores dos parâmetros mecânicos bem como os valores de desvios padrões para as misturas com utilização de escória foram relevantes. A utilização de um Fator Campo Laboratório mais “conservador” fez com que algumas alternativas avaliadas fossem descartadas. Para que um maior número de alternativas fossem aceitas as estruturas teriam que ser modificadas ou os materiais trocados.

Como recomendações para futuras pesquisas podem ser citadas:

- Acompanhamento do desempenho de um pavimento com utilização de escória de aciaria, proveniente da Gerdau Cearense S.A., como agregado;
- Estudar um procedimento de projeto de misturas asfálticas do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente utilizando escória de aciaria como agregado;
- Avaliação da expansão da escória de aciaria com diferentes tempos de cura e maior número de corpos de prova;
- Realização de dosagens Marshall sem adição de DOPE e verificação das diferenças encontradas nos parâmetros volumétricos e mecânicos;
- Realização de dosagens Marshall com diferentes tempos de condicionamento em estufa e verificação das diferenças encontradas nos parâmetros volumétricos e mecânicos;
- Realização de dosagens Marshall com obtenção da densidade aparente dos corpos de prova com a superfície saturada e seca (e não da maneira convencional realizada neste estudo) e com correção da composição granulométrica das misturas experimentais devido à diferença entre as densidades da escória de aciaria e de agregados pétreos. Verificação das diferenças encontradas nos parâmetros volumétricos e mecânicos;
- Realização de dosagens Marshall para misturas asfálticas com utilização apenas de escória de aciaria como agregado, inclusive filler;
- Realização de dosagem Superpave para as misturas utilizadas neste estudo e comparação dos resultados;

- Realização de um estudo estatístico a partir da realização de maior número de ensaios mecânicos para verificar se as diferenças encontradas são significativas ou não;
- Avaliação da contaminação ambiental provocada pelo rejeito escória dentro de uma mistura asfáltica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials, 1999, T 283 "Standard Method of Test for Resistance of Compacted Bituminous Mixtures to Moisture Induced Damage".

ADERALDO, P.S.G., 2003, *Contato Pessoal*, Gerdau Cearense S.A - 15/10/2003.

ALVARENGA, J.C.A., 2001, *Um estudo de avaliação estrutural e econômica de pavimentos flexíveis de escória de aciaria*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982, NBR 5019 "Produtos e Ligas de Cobre - Terminologia".

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991, NBR 11582 "Cimento Portland e outros materiais em pó; determinação da massa específica".

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994, EB 2103 "Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente".

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996, NBR 7480 "Barras e Fios de Aço Destinados a Armaduras para Concreto Armado".

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987, NBR 10004 "Resíduos Sólidos".

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987, NBR 10005 "Lixiviação de Resíduos".

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987, NBR 10006 "Solubilização de Resíduos".

ASTM - American Society for Testing and Materials, 1982, D 4123 "Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures".

ASTM - American Society for Testing and Materials, 1988, C 127 "Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate".

ASTM - American Society for Testing and Materials, 1992, D 2940 "Standard specification for graded aggregate material for bases or sub-bases for highways or airports".

ASTM - American Society for Testing and Materials, 1994, C 1260 "Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates from potential alkali reactivity of aggregates (Mortar-Bar Method)".

ASTM - American Society for Testing and Materials, 1994, D 5002 "Standard test method for density and relative density of crude oils by digital density analyser".

ASTM - American Society for Testing and Materials, 1995, D 4792 "Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions".

ASTM - American Society for Testing and Materials, 1997, C 128 "Standard test method for specific gravity and absorption of fine aggregate".

ASTM - American Society for Testing and Materials, 1999, D 6373 "Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder".

ASTM - American Society for Testing and Materials, 2000a, D 2041 "Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures".

ASTM - American Society for Testing and Materials, 2000b, D 2726 "Standard test method for bulk specific gravity and density of non-absorptive compacted bituminous mixtures".

BAGAMPADDE, U.; H.I.A. WAHHAB e S.A. AIBAN, 1999, "Optimization of steel slag aggregates for bituminous mixes in Saudi Arabia". *Journal of Materials in Civil Engineering*, p. 30-35.

BELGO, 2003, [www.csn.com.br](http://www.csn.com.br) - 11/06/2003.

BENEVIDES, S.A.S., 2000, *Análise comparativa dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos: empírico do DNER e da resiliência da COPPE/UFRJ em rodovias do estado do Ceará*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

BERNUCCI, L.B.; J.A.P. CERATTI; J.M. CHAVES; E. MOURA e A.D. CHAVES, 1999, "Estudo da adesividade no comportamento de misturas asfálticas". *10º Congresso Ibero-Latinoamericano de Asfalto*, Sevilla, Espanha, v.I, p. 383-395.

BLEICHER, L. e J.M. SASAKI, 2000, "Introdução à difração de raios-X em cristais". Universidade Federal do Ceará.

BOAVISTA, A.H., 2003, "Estudo do Comportamento Mecânico de Escória de Aciaria para Aplicação na Construção Rodoviária na Região Metropolitana de Fortaleza". Plano de Tese de M. Sc., Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

BRAZ, D., 1993, *Tomografia computadorizada na análise de solo compactado e de mistura asfáltica*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

CARNEIRO, F.L., 1943, "Um novo método para a determinação da resistência à tração dos concretos". *Comunicação 5. Reun. Ass. Bras. Normas Técnicas*. Publ. Inst. Nac. Tecnol., Rio de Janeiro, (Publicado no boletim nº 13, RILEM, série antiga. Paris, 1953, p. 103-127).

COOMARASAMY, A. e T.L. WALZAK, 1995, "Effects os Moisture on Surface Chemistry of Steel Slag and Steel Slag-Asphalt Paving Mixes". *Transportation Research Record 1492*.

COSIPA, 2003, [www.cosipa.com.br](http://www.cosipa.com.br) - 11/06/2003.

COPPETEC, 1996, "Pavimento econômico a partir de carboquímicos e escórias de aciaria da CSN". Universidade Federal do Rio de Janeiro. Relatório Final.

CTPETRO, 2003, "Estudo de resíduo de vácuo de petróleo nacional como matéria-prima para pavimentação". Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes, Laboratório de Mecânica dos Pavimentos. 3º Relatório Parcial. Fundo Setorial do Petróleo.

DERT - Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes, 1994, “Especificações gerais para serviços e obras rodoviárias”, 1ª edição, Ceará.

DNC - Departamento Nacional de Combustíveis, 1993, “Portaria DNC 5 de 18 de fevereiro”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1987, ME 117 “Determinação da densidade aparente de mistura betuminosa”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1989, ME 192 “Determinação do Índice de Suporte Mini-CBR e da Expansão de Solos Compactados com Equipamento Miniatura”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1989, ME 228 “Compactação de solos em equipamento miniatura”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994a, ME 049 “Solos - determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994b, ME 054 “Equivalente de Areia”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994c, ME 078 “Agregado graúdo - adesividade à ligante betuminoso”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994d, ME 082 “Solos - determinação do limite de plasticidade”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994e, ME 086 “Agregado - determinação do índice de forma”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994f, ME 089 “Agregados - avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994g, ME 122 “Solos - determinação do limite de liquidez - método de referência e método expedito”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994h, ME 133 “Misturas Betuminosas - determinação do módulo de resiliência”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994i, ME 138 “Misturas Betuminosas - determinação da resistência à tração por compressão diametral”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994j, ME 262 “Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994k, PRO 269 “Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1995a, ME 043 “Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1995b, ME 055 “Areia - determinação de impurezas orgânicas”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1995c, ME 084 “Agregado miúdo - determinação da densidade real”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1996, PRO 199 “Redução de amostras de campo de agregados para ensaio de laboratório”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997a, ES 313 “Pavimentação - concreto betuminoso”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997b, ME 367 “Material de enchimento para misturas betuminosas”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998a, ME 035 “Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998b, ME 081 “Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo”.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998c, ME 083 “Agregados - análise granulométrica”.

FALCÃO, M.F.B. e J.B. SOARES, 2002, “Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação”. *XVI Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, ANPET*, Natal, v.I, p. 169-181.

FARRAND, B. e J. EMERY, 1995, “Recent Improvements in Quality of Steel Slag Aggregate”. *Transportation Research Record*, 1486.

FILEV, R., 2003, [www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria\\_de\\_aciaria.htm](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria_de_aciaria.htm) - 11/06/2003.

GEYER, R. M. T., 2001, *Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto*. Tese de D.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS.

HUNT L. e G.E. BOYLE, 2000, “Steel Slag in Hot Mix Asphalt Concrete”. State Research Project 511, Final Report, Salem, Oregon.

IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia, 1998, *Escórias Siderúrgicas Novas Tendências 9ª Reunião de Pavimentação Urbana*.

IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia, 2001, “Perfil da Siderurgia Brasileira”.

IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia, 2002, “Anuário Estatístico - Brasil Steel Databook”.

IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia, 2003, [www.ibs.org.br](http://www.ibs.org.br) - 16/12/2003.

INDUSTRIAL STANDARDIZATION IN JAPAN, 1992, JIS A 5015 “Escória siderúrgica para construção de estradas”.

JOHN, L. 2003 [www.uerj.br/~ambiente/emrevista/clipping/agosto/csn.htm](http://www.uerj.br/~ambiente/emrevista/clipping/agosto/csn.htm) - 11/06/2003.

KANDHAL, P.S. e G.L HOFFMAN, 1998, “Evaluation of steel slag fine aggregate in hot-mix asphalt mixtures”. *Transportation Research Record*, Washington, D.C., n. 1583, p. 28-36.

KHAN, M. I. e H.I.A WAHHAB, 1998, "Improving slurry seal performance in Eastern Saudi Arabia using steel slag". *12º Construction and Building Materials*, p. 195-201.

LIMA, N.P.; J.F. NASCIMENTO; V.P.C. VAL FILHO E C.A.V. ALBERNAZ, 2000, "Pavimentos de Alto Desempenho Estrutural Executados com Escória de Aciaria". *10ª Reunião Anual de Pavimentação*, Uberlândia, MG.

LOUREIRO, T.G., 2003, *Estudo da evolução do dano por fadiga em misturas asfálticas*. Tese de M. Sc., PETRAN/DET/UFC, Fortaleza, CE.

MACHADO, A.T., 2000, *Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria*. Tese de M.Sc., POLI/USP, São Paulo, SP.

MARQUES, G.L., 2004, *Contato Pessoal*, COPPE/UFRJ - 14/04/2004.

MASUERO, A.B.; A.C. VILELA e D. DAL MOLIN, 2000, "Emprego de Escórias de Aciaria Elétrica como Adição a Concretos". *Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais*, São Paulo, SP.

MEDINA, J., *Mecânica dos Pavimentos*. 1ª ed., Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 1997.

MAIA, J.N., 2002, ISCTE, Processo Tecnológico II, Indústria Siderúrgica. Lisboa.

MOTTA, L.M.G.; I. TONIAL; L.M. LEITE e R.S. CONSTANTINO, 1994, *Princípios do projeto e análise Superpave de misturas asfálticas*. Tradução comentada, Petrobras.

MOTTA, L.M.G, 2002, Noções básicas de pavimentação, Rio de Janeiro, RJ.

MOURA, E., 2001, *Estudo do efeito de aditivos químicos e da cal como melhoradores de adesividade em misturas asfálticas densas*. Tese de M. Sc., POLI/USP, São Paulo, SP.

NOURELDIN, A.S. e R.S. McDANIEL, 1989, "Evaluation of Surface Mixtures of Steel Slag and Asphalt". *Transportation Research Record 1269*.

PARENTE, E.B.; A.H. BOAVISTA e J.B. SOARES, 2003, “Estudo do comportamento mecânico de misturas de solo e escória de aciaria para aplicação na construção rodoviária na região metropolitana de Fortaleza”. *XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, v.1, p. 215-222.

PETROBRAS, 2003, [www.br.com.br](http://www.br.com.br) - 16/12/2003

PINTO, S., 1991, *Estudo do comportamento a fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PTM - Pennsylvania Testing Method 130, 1978, “Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria”. Adaptado pelo Departamento de Estradas e Rodagem de Minas Gerais-DMA-1/ DER-MGG-1982.

RAMOS, C.R., 2003, *Estudo para desenvolvimento de um catálogo de pavimentos flexíveis do município do Rio de Janeiro*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

ROBERTS, F.L.; P.S. KANDHALL; E.R. BROWN; D. LEE; T.W. KENNEDY, 1996, *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction* (2ª ed.). NAPA Education Foundation, Lanham, Maryland.

ROHDE, L., 2002, *Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – estudo laboratorial*. Tese de M.Sc., UFRS, Porto Alegre, RS.

SILVA, E.A., 1991, “Uso de escoria de acerias tratadas com emulsiones catiônicas em varias pavimentaciones”. *6º Congresso Ibero-Latino Americano Del Asfalto*, Santiago, Tomo I, p. 01-18.

SILVA, E.A., 1994, “Uso de escória de aciaria em pavimentação viária”. *28ª Reunião Anual de Pavimentação*, Belo Horizonte, v. 1, p. 261-283.

SILVA, E.A. e R.L. MENDONÇA, 2001a, “Utilização da escória de aciaria em todas as camadas do pavimento”. *Revista Engenharia Ciência e Tecnologia*, v. 4, n. 2, p. 7-20.

SILVA, E.A. e R.L. MENDONÇA, 2001b, “Brésil: laitier d’aciérie à tous lês étages, laitiers sidérurgiques”, n. 81, p.11-24;

SILVA, E.A., 2002, *Contato Pessoal de Parente E.B.*, Universidade Federal do Ceará.

SILVA, E.A., R.L. MENDONÇA e C.H.M. DOBELE, 2002, “Utilização da escória de aciaria em todas as camadas do pavimento”. *16º Encontro de Asfalto*, Rio de Janeiro, RJ, trabalho convidado.

SILVA, E.A., 2003a, 1º Seminário sobre uso de escória em pavimentação viária. Salvador.

SILVA, E.A., 2003b, Relatório desenvolvido para a construtora Queiroz Galvão, trecho Rodovia do Contorno, Volta Redonda II.

SILVA, E.A., R.L. MENDONÇA, C.H.M. DOBELE, M. SIQUEIRA e J.B. SOARES, 2003, “Uma experiência inédita: uso da escória de aciaria LD em todas as camadas do pavimento”. *34ª Reunião Anual de Pavimentação*, Campinas, SP, v. I, p. 238-244.

SOARES, J.B., L.F.M. LEITE, L.M.G. MOTTA e J.V.C. BRANCO, 1999a, “O efeito da consistência do CAP no teor ótimo e nas propriedades das misturas asfálticas”. *XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, v.I, p. 115-125.

SOARES, J.B., L.M.G. MOTTA e L.F.M. LEITE, 1999b, “Quatro anos de observação da pista experimental do Ceará”. *XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, v.I, p. 263-272.

SOARES, J.B., 2000, “Curso em Tecnologia dos Pavimentos”. Lubnor/Petrobras, Fortaleza.

SOARES, J.B.; F.A.C. FREITAS; J.V.C. BRANCO e L.M.G. MOTTA, 2000, “Método de previsão do teor ótimo de ligante em misturas asfálticas tipo CBUQ”. *32ª Reunião Anual de Pavimentação*, Brasília, Associação Brasileira de Pavimentação, v. 1, p. 149-162.

SOARES, J.B.; D.R. ALDIGUERI e L.M. LEITE, 2002, Relatório de Projeto, Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, Universidade Federal do Ceará e Petrobras.

SOUZA, F.V. e J.B. SOARES, 2003, "Considerações sobre módulo resiliente e módulo dinâmico em misturas asfálticas com base na teoria da viscoelasticidade". *XII Congresso Ibero-Latino Americano Del Asfalto*, Quito, Equador, v.1, p. 1-10.

TRIOLA, M.F., 1999, *Introdução à Estatística*, 7 ed. Rio de Janeiro, RJ.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2003, [www.economia.ufpr.br](http://www.economia.ufpr.br) - 11/06/2003.

VASCONCELOS, K.L. e J.B. SOARES, 2003, "Influência dos métodos de ensaio para determinação das densidades real e aparente de agregados na dosagem de misturas asfálticas". *34ª Reunião Anual de Pavimentação (ABPv)*, Campinas, SP.

VASCONCELOS, K.L.; J.B. SOARES e L.F.M. LEITE, 2003, "Influência da densidade máxima teórica na dosagem de misturas asfálticas". *17º Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET)*, Rio de Janeiro, v. 1, p. 5-17.

[www.inventabrasil.hpg.ig.com.bresciaria.htm](http://www.inventabrasil.hpg.ig.com.bresciaria.htm), 11/06/2003.

ZIEMKIEWICZ, P., 1998, "Steel slag: applications for AMD control". *Proceedings of the 1998 Conference on Hazardous Waste Research*, p. 44-62.