

**Dissertação de Mestrado**

**ESTUDO LABORATORIAL DO  
DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS  
ASFÁLTICAS COM RESÍDUOS INDUSTRIAIS  
DE MINÉRIO DE FERRO**



**NUGEO**

**AUTOR: RODOLFO GONÇALVES OLIVEIRA  
DA SILVA**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Gilberto Fernandes (UFOP)**

**ESCOLA DE MINAS / UFOP**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP**

**OURO PRETO - JANEIRO DE 2010**

# **Livros Grátis**

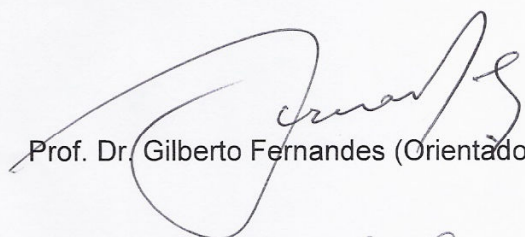
<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

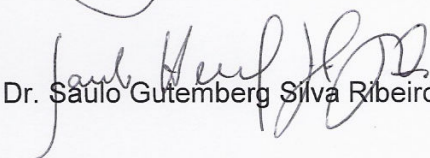
# ESTUDO LABORATORIAL DO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM RESÍDUOS INDUSTRIAIS DE MINÉRIO DE FERRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**.

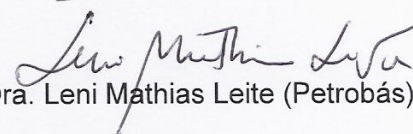
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 27 de janeiro de 2010, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Prof. Dr. Gilberto Fernandes (Orientador / UFOP)



Prof. Dr. Saulo Gutemberg Silva Ribeiro (UFOP)



Dra. Leni Mathias Leite (Petrobás)

S586e Silva, Rodolfo Gonçalves Oliveira da.  
Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro. [manuscrito] / Rodolfo Gonçalves Oliveira da Silva - 2010.  
xv, 132f.: il., color.; grafs.; tabs.; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Fernandes.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. NUGEO.  
Área de concentração: Geotecnia de pavimentos.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Geotecnia - Pavimentos - Teses. 2. Pavimentos de asfalto – Teses. 3. Mecânica do solo - Teses. 4. Minérios de ferro - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 625.85:553.31

# DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, José Estevão e Ana Lúcia, que me deram o estudo como o maior e mais sublime presente da vida.

À minha madrinha Mercês e ao meu tio Jair, pela confiança em mim depositada.

***“Apenas o cérebro cultivado pode produzir iluminadas formas de pensamento. Educa e transformarás a irracionalidade em inteligência, a inteligência em humanidade e a humanidade em angelitude.”***

***Chico Xavier***

## AGRADECIMENTOS

- A Deus, que me concedeu na vida todas as condições e oportunidades necessárias para a realização deste trabalho, principalmente o apoio da minha família e dos amigos;
- A minha família, pelo apoio e incentivo para continuar nos estudos, em especial aos meus pais, pelo exemplo de vida e moralidade, do qual tiro inspiração para enfrentar os desafios da vida;
- A minha prima Ana Amélia, pelos conselhos e incentivo que me deram forças para tomar as decisões certas e ter me encorajado a seguir a vida acadêmica;
- Ao meu orientador, Prof. Gilberto Fernandes, pelo estímulo dado para enfrentar os desafios encontrados nesta pesquisa, pela paciência que teve durante toda a realização dos trabalhos e, principalmente, pela confiança e por ter acreditado em meu potencial, sendo diretamente o responsável pelo êxito desta pesquisa;
- À Gerdau Açominas, pelo fornecimento do resíduo siderúrgico, que possibilitou a realização dos ensaios de laboratório com a escória de aciaria, em especial ao engenheiro Leandro Lopes e a engenheira Marina Barbosa, pela inestimável disposição que tiveram em me auxiliar durante o período dos trabalhos realizados.
- À Vale, por fornecer o rejeito de minério de ferro utilizado nesta pesquisa; sinceros agradecimentos a engenheira Jane, pelo suporte dado durante a pesquisa;
- À Petrobrás, pelo convênio assinado com a UFOP e apoio financeiro, que viabilizou a compra e modernização dos equipamentos do Laboratório de Ferrovias e Asfalto, permitindo assim, a realização dos ensaios com as misturas asfálticas e o fechamento deste trabalho;
- À pedreira Irmãos Machado, pela doação dos agregados empregados na pesquisa;
- À UFOP, pela concessão da bolsa de estudos que viabilizou a dedicação à pesquisa;

- À Fundação Gorceix, pelo suporte dado a este trabalho, em especial à Adriana Resende;
- Aos amigos do Laboratório de Geotecnia da COOPE/UFJR, Sandra Oda, Marcos, Álvaro, Rodrigo e Beto, pelo auxílio e apoio técnico, além da transmissão de conhecimentos em procedimentos laboratoriais que foram de fundamental importância para a execução dos ensaios de laboratório;
- À REGAP, por conceder amostras de cimento asfáltico, principalmente ao amigo Getúlio, por me auxiliar com seus preciosos conhecimentos sobre ensaios com ligante asfáltico;
- Ao engenheiro Rogério Pedrosa do DER/MG, pela realização dos ensaios de expansão feitos com a escória e pelas informações e conselhos transmitidos durante a realização dos ensaios;
- Aos colegas do mestrado, Johanna, Karippe, Thiago, Shirlei, Marines, pela amizade e horas de estudos que passamos juntos, só tenho a dizer a vocês “muito obrigado”;
- Aos companheiros da República Maizona, João Paulo e Rodrigo pelos momentos de descontração, companheirismo e torcer pelo meu sucesso;
- Aos amigos do Laboratório de Pavimentação da UFJF, Prof. Geraldo Marques, Raphael e Jorge, pela execução dos ensaios mecânicos com as misturas asfálticas;
- A todos os amigos do Laboratório de Ferrovias e Asfalto da UFOP, especialmente aos grandes amigos e companheiros Miguel, Hebert, Geraldo e Tharcísio, pela inestimável ajuda durante toda essa jornada e horas despendidas de trabalho para realizar os ensaios de laboratório; a Daniel e Leonardo, pela amizade e auxílio dispensado neste trabalho. Sem a ajuda de vocês essa pesquisa dificilmente teria êxito.
- A todos os amigos não citados aqui, que mesmo nos pequenos gestos de carinho e ajuda contribuíram para que eu pudesse chegar ao fim desta etapa de minha vida;



## RESUMO

A geração de grandes volumes de resíduos sólidos provenientes das mineradoras e das usinas siderúrgicas tem sido fonte de preocupação em todo o Brasil, principalmente na região do chamado Quadrilátero Ferrífero, em função de questões ambientais, econômicas e até sociais. O presente trabalho teve como finalidade contribuir para uma melhor compreensão do comportamento mecânico de misturas betuminosas convencionais e modificadas e verificar a viabilidade técnica do uso de rejeito de minério de ferro e escória de aciaria em pavimentos rodoviários. O projeto de pesquisa analisou laboratorialmente aspectos físicos e de comportamento mecânico de agregados convencionais e alternativos para uso em revestimento asfáltico. As misturas betuminosas do tipo CBUQ foram dosadas segundo a metodologia Marshall, sendo adotada a mesma granulometria, Faixa C do DNIT, com a utilização de brita graduada e escória de aciaria, em diferentes proporções, como agregados graúdos e miúdos e o rejeito de minério de ferro como material de enchimento alternativo (filer). A caracterização mecânica das misturas asfálticas foi realizada por meio dos ensaios de resistência à tração estática por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), fadiga por compressão diametral a tensão controlada e deformação permanente por compressão axial (creep estático). Todas as misturas alternativas analisadas apresentaram desempenho mecânico satisfatório, comprovando a qualidade destes resíduos para uso em camadas de rolamento. Neste trabalho se constatou grande potencial de uso do rejeito de minério de ferro e da escória de aciaria como agregados alternativos para revestimentos asfálticos com ganhos de natureza ambiental quando comparados aos agregados pétreos.

## **ABSTRACT**

The generation solid residues coming from the mining companies and steel industries has been source concern in Brazil, mainly in the region of the Quadrilátero Ferrífero, due to environmental, economic and social matters. This works objective to contribute for a better understanding of the mechanical behavior of asphaltic mixtures end to verify the technical feasibility of the use of residues of iron ore and steel furnace slag in the road pavements. This investigation analyzed volumetric and mechanical parameters of the mixtures with slag and iron ore residues were compared to those of a mix with conventional rock aggregates. The dense graded hot mix asphalts were designed from the Marshall procedure. Was adopted a same gradation of aggregate, aggregate gradation "C" of DNIT, with steel slag and natural aggregates used as asphalt mixtures aggregates and the iron ore tailings used as filler. The mechanical behavior of the asphalt mixtures was evaluated through testing of indirect tensile strength, Resilient Modulus, fatigue of diametrical compression under controlled stress and permanent deformation (static creep). All the mixtures with alternative aggregates presented a satisfactory mechanical performance, that prove the quality of this residues to be used in road pavements. The steel slag and iron ore tailings can be use as alternative aggregates in hot mix asphalt concrete and present environmental advantages compared to aggregates petreous.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2 – RELEVÂNCIA DO TEMA .....	3
1.3 – OBJETIVOS DA PESQUISA .....	6
1.4 – ESTRUTURA DO TRABALHO .....	8
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>10</b>
2.1 – DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS .....	10
2.1.1 – Dosagem Marshal .....	11
2.2 – GERAÇÃO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO .....	12
2.2.1 – Características dos rejeitos de minério de ferro .....	13
2.2.2 – Uso dos resíduos de minério de ferro em pavimentação .....	16
2.3 – PROCESSO DE PRODUÇÃO DA ESCÓRIA .....	18
2.3.1 – Escória de Aciaria .....	21
2.3.2 – Utilização da escória de aciaria na pavimentação .....	23
2.3.3 – Patologias estruturais e o fenômeno de expansão da escória .....	28
2.3.4 – Controle da expansão da escória .....	31
<b>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
3.1 – INTRODUÇÃO .....	35
3.2 – AGREGADOS .....	35
3.2.1 – Análise Granulométrica .....	35
3.2.2 – Abrasão Los Angeles .....	36
3.2.3 – Equivalente de areia .....	36
3.2.4 – Forma das partículas .....	37
3.2.5 – Durabilidade .....	37
3.2.6 – Densidade e absorção .....	37
3.2.7 – Adesividade .....	37
3.2.8 – Treton .....	38
3.2.9 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	38

3.2.10 – Difractometria de Raios-X .....	39
3.2.11 – Obtenção e caracterização do rejeito de minério de ferro .....	39
3.2.12 – Obtenção e caracterização da escória de aciaria .....	46
3.2.13 – Obtenção e caracterização da brita graduada .....	56
3.3 – LIGANTE ASFÁLTICO .....	60
3.4 – DOSAGEM DAS MISTURAS .....	62
3.5 – ENSAIOS MECÂNICOS .....	63
3.5.1 – Resistência à tração estática por compressão diametral .....	63
3.5.2 – Módulo de resiliência .....	65
3.5.3 – Deformação permanente por compressão axial (creep estático) .....	66
3.5.4 – Fadiga por compressão diametral a tensão controlada .....	68
<b>CAPÍTULO 4 – PROJETO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....</b>	<b>71</b>
4.1 – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA .....	71
4.2 – DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA (DMT) .....	75
4.3 – TEOR DE PROJETO (TP) .....	78
4.4 – INFLUÊNCIA DO TIPO DE FÍLER NO VOLUME DE VAZIOS .....	90
<b>CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS MECÂNICOS .....</b>	<b>92</b>
5.1 – MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....	92
5.2 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	99
5.3 – ENSAIO DE FADIGA .....	107
5.4 – ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE (CREEP ESTÁTICO) .....	112
<b>CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>116</b>
6.1 – CONCLUSÕES .....	116
6.2 – SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	119
<b>ANEXO I – RESULTADOS DO ENSAIO DE FADIGA .....</b>	<b>132</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Quadrilátero Ferrífero .....	4
Figura 2.1 – Esquema típico do processo de mineração de ferro.....	12
Figura 2.2 – Curva granulométrica de rejeitos de minério de ferro .....	16
Figura 2.3 – Sequência de operação do conversor a oxigênio tipo LD: (1) carregamento de sucata e ferro gusa; (2) sopro de oxigênio; (3) basculamento de aço na panela; (4) conversor antes de bascular a escória; (5) vazamento da escória de aciaria no pote de escória.....	20
Figura 2.4 – Exemplos de trincas causadas pela expansão das escórias: (a) trinca radial; (b) trincas longitudinais; (c) trincas transversais ou “quebra-molas”. (Gontijo, 2006).....	28
Figura 2.5 – Autoclave desenvolvido pelo Japão para cura de escória de aciaria com vapor d’água a alta pressão (Silveira, 2004) .....	33
Figura 3.1 – Equipamento para análise difratométrica dos agregados.....	39
Figura 3.2 – Localização da Mina de Gongo Soco (Fernandes 2005, modificado) .....	40
Figura 3.3 – Obtenção e homogeneização do resíduo: (a) barragem de rejeito; (b) coleta de amostras de rejeito de minério de ferro; (c) homogeneização do rejeito; (d) redução das amostras de campo por quarteamento.....	41
Figura 3.4 – Curva granulométrica do rejeito de minério de ferro.....	42
Figura 3.5 – Fíler convencional e alternativo utilizados nas misturas asfálticas.....	43
Figura 3.6 – Microscopia eletrônica do resíduo de mineração com ampliações de 100x e 800x.....	44
Figura 3.7 – Análise qualitativa do rejeito de minério de ferro.....	45
Figura 3.8 – Difratoograma da amostra de rejeito de minério de ferro.....	46
Figura 3.9 – Detalhe do pátio de estocagem de escória da Gerdau Açominas.....	47
Figura 3.10 – Homogeneização e redução da amostra de campo de escória para o laboratório.....	47
Figura 3.11 – Curva granulométrica da escória de aciaria LD.....	48

Figura 3.12 – Processo de expulsão das bolhas de ar: (a) procedimento de fervura; (b) adaptação para aplicação de vácuo.....	50
Figura 3.13 – Fotomicrografias dos grãos de escória EA1 com ampliações de 500x e 1500x.....	54
Figura 3.14 – Fotomicrografias dos grãos de escória EA2 com ampliações de 100x e 500x.....	54
Figura 3.15 – Seleção pontual para análise química qualitativa.....	55
Figura 3.16 – Difrátograma da amostra de escória de aciaria.....	56
Figura 3.17 – Granulometria da brita graduada convencional.....	57
Figura 3.18 – Fotomicrografias dos grãos de gnaisse com ampliações de 500x: (a) grão retido na peneira de 4,76 mm; (b) grão retido na peneira de 0,42 mm.....	59
Figura 3.19 – Morfologia da amostra de gnaisse britado na escala de 10 $\mu\text{m}$ .....	60
Figura 3.20 – Gráfico viscosidade Brookfield (poise) versus temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).....	63
Figura 3.21 – Prensa mecânica utilizada para a realização dos ensaios de resistência a tração.....	64
Figura 3.22 – Ensaio creep estático: (a) configuração do cp e dos LVDTs durante o ensaio; (b) tela de apresentação do programa do controle e aquisição de dados do ensaio de deformação permanente.....	67
Figura 3.23 – Esquema simplificado do ensaio de deformação permanente (creep estático).....	68
Figura 4.1 – Enquadramento granulométrico das misturas .....	71
Figura 4.2 – Representação da curva granulométrica de projeto pela especificação SUPERPAVE para tamanho nominal máximo de 12,5 mm .....	72
Figura 4.3 – Fracionamento dos agregados: (a) escória e (b) gnaisse britado.....	74
Figura 4.4 – Ilustração dos volumes considerados nas misturas: (a) DMT e (b) DMM (Bernucci <i>et al</i> , 2008 modificado).....	76
Figura 4.5 – Valores de DTM e DMT* obtidos para as misturas M1, M2, M3 e M4 .....	78
Figura 4.6 – Exemplo de determinação do teor de projeto .....	81
Figura 4.7 – CP apresentando agregados com recobrimento insuficiente de ligante indicados pelas setas para a mistura M2 no teor de 5,5%.....	82
Figura 4.8 – Curva Vv x Teor de CAP para a mistura M1 .....	83

Figura 4.9 – Curva RBV x Teor de CAP para a mistura M1 .....	84
Figura 4.10 – Curva Vv x Teor de CAP para a mistura M2 .....	85
Figura 4.11 – Curva RBV x Teor de CAP para a mistura M2 .....	85
Figura 4.12 – Curva Vv x Teor de CAP para a mistura M3 .....	87
Figura 4.13 – Curva RBV x Teor de CAP para a mistura M3 .....	87
Figura 4.14 – Curva Vv x Teor de CAP para a mistura M4 .....	88
Figura 4.15 – Curva RBV x Teor de CAP para a mistura M4 .....	88
Figura 4.16 – Teores de Projeto das misturas de CBUQ .....	89
Figura 4.17 – Comparação da variação do Vv com o teor de CAP para as misturas M2 e M3 .....	91
Figura 4.18 – Comparação da variação do Vv com o teor de CAP para as misturas M1 e M2 .....	91
Figura 5.1 – Valores de MR obtidos para a mistura M1 .....	93
Figura 5.2 – Valores de MR obtidos para a mistura M2 .....	94
Figura 5.3 – Valores de MR obtidos para a mistura M3 .....	95
Figura 5.4 – Valores de MR obtidos para a mistura M4 .....	96
Figura 5.5 – Valores de MR das misturas contendo escória com filer convencional (M2) e com rejeito de minério de ferro (M3) .....	97
Figura 5.6 – Valores de MR das misturas contendo agregado natura com filer convencional (M1) e com rejeito de minério de ferro (M4) .....	98
Figura 5.7 – Valores de RT a 25°C da mistura M1 em diferentes teores de CAP ..	100
Figura 5.8 – Valores de RT a 25°C da mistura M2 em diferentes teores de CAP ..	101
Figura 5.9 – Valores de RT a 25°C da mistura M3 em diferentes teores de CAP ..	102
Figura 5.10 – Valores de RT a 25°C da mistura M4 em diferentes teores de CAP .....	102
Figura 5.11 – Valores médios de RT a 25°C das misturas sem escória com filer convencional (M1) e com rejeito de minério de ferro (M4) .....	104
Figura 5.12 – Valores médios de RT a 25°C das misturas contendo escória com filer convencional (M2) e com rejeito de minério de ferro (M3) .....	104
Figura 5.13 – Valores médios de RT das misturas contendo filer de rejeito de minério de ferro em diferentes teores .....	106
Figura 5.14 – Curva de fadiga da mistura comparativa (M1) .....	108

Figura 5.15 – Curva de fadiga das misturas M1 e M2 (80% de escória).....	108
Figura 5.16 – Vida de fadiga das misturas M1 e M3 (80% de escória e 6% de rejeito de minério de ferro).....	109
Figura 5.17 – Vida de fadiga das misturas M1 e M4 (6% de rejeito de minério de ferro).....	109
Figura 5.18 – Gráfico vida de fadiga versus deformação específica resiliente das misturas M1 e M2 (80% de escória).....	111
Figura 5.19 – Gráfico vida de fadiga versus deformação específica resiliente das misturas M1 e M3 (80% de escória e 6% de rejeito de minério de ferro).....	111
Figura 5.20 – Gráfico vida de fadiga versus deformação específica resiliente das misturas M1 e M4 (6% de rejeito de minério de ferro).....	112
Figura 5.21 – Variação da deformação específica ao longo do tempo para a mistura M1.....	113
Figura 5.22 – Variação da deformação específica ao longo do tempo para a mistura M2.....	113
Figura 5.23 – Variação da deformação específica ao longo do tempo para a mistura M3.....	114
Figura 5.24 – Variação da deformação específica ao longo do tempo para a mistura M4.....	114



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Percentagem do estado de conservação das rodovias federais (CNT, 2008).....	1
Tabela 1.2 – Extensão do sistema rodoviário nacional (DNIT, 2006).....	2
Tabela 1.3 - Malha rodoviária pertencente ao Quadrilátero Ferrífero (DER/MG, 2006).....	5
Tabela 2.1 – Caracterização de materiais de base e sub-base (Saraiva, 2006, modificada).....	17
Tabela 2.2 – Processos de refino do aço.....	19
Tabela 2.3 – Produção brasileira de aço bruto por processo de refino (IBS, 2002; Sousa, 2007).....	19
Tabela 2.4 – Composição química de escórias EAF (Oliveira, 2006).....	22
Tabela 2.5 – Composição química de escórias LD (Raposo, 2005).....	23
Tabela 2.6 - Processos utilizados para redução de expansão da escória.....	34
Tabela 3.1 – Especificação para filer quanto à granulometria (Cavalcante e Soares, 2001).....	42
Tabela 3.2 – Valores de massa específica ( $\text{g/cm}^3$ ) de alguns autores para fileres..._	43
Tabela 3.3 – Análise qualitativa da composição química do rejeito de mineração..._	45
Tabela 3.4 – Valores de abrasão Los Angeles da escória de aciaria (DNER-ME 035 /98).....	48
Tabela 3.5 – Valores de densidades reais da escória de aciaria miúda.....	50
Tabela 3.6 – Análise química do extrato lixiviado das amostras de escória de aciaria.....	52
Tabela 3.7 – Análise química do extrato solubilizado das amostras de escória de aciaria.....	53
Tabela 3.8 – Análise qualitativa das espécies químicas presentes na amostra EA2.....	55
Tabela 3.9 – Resultado dos ensaios de caracterização do agregado convencional..._	57
Tabela 3.10 – Análise química qualitativa da amostra de pedra britada.....	60
Tabela 3.11 – Especificações e caracterização do CAP 50/70 (REGAP/Petrobrás).....	61

Tabela 3.12 – Resultado dos ensaios de caracterização do CAP 50/70.....	61
Tabela 3.13 – Resultado dos ensaios de viscosidade do CAP 50/70.....	62
Tabela 4.1 – Enquadramento granulométrico das dosagens (DNIT-ES 031/2006).	72
Tabela 4.2 – Porcentagem em peso dos agregados utilizados nas misturas asfálticas .....	74
Tabela 4.3 – Resultados das DMTs calculadas com os valores de densidades reais de maneira convencional (DMT) e pelo método adaptado (DMT <sub>A</sub> ).....	77
Tabela 4.4 – Valores médios dos parâmetros volumétricos encontrados para a mistura M1.....	84
Tabela 4.5 – Valores médios dos parâmetros volumétricos encontrados para a mistura M2.....	85
Tabela 4.6 – Valores médios dos parâmetros volumétricos encontrados para a mistura M3.....	87
Tabela 4.7 – Valores médios dos parâmetros volumétricos encontrados para a mistura M4 .....	88
Tabela 5.1 – Quantidade de amostras utilizadas para caracterização mecânica das misturas.....	92
Tabela 5.2 – Valores médios do módulo de resiliência para a mistura M1 a 25°C.	93
Tabela 5.3 – Valores médios do módulo de resiliência para a mistura M2 a 25°C.	95
Tabela 5.4 – Valores médios do módulo de resiliência para a mistura M3 a 25°C.	96
Tabela 5.5 – Valores médios do módulo de resiliência para a mistura M4a 25°C.	97
Tabela 5.6 – Concentração volumétrica do sistema filer-betume (C) das misturas estudadas.....	99
Tabela 5.7 – Comparação dos resultados médios de MR das misturas asfálticas...	99
Tabela 5.8 – Resultados médios de resistência a tração obtidos para todas as misturas a 25°C.....	100
Tabela 5.9 – Comparação de valores médios de RT obtidos para misturas de CBUQ .....	103
Tabela 5.10 – Porcentagem em peso dos agregados utilizados nas misturas asfálticas com filer de rejeito de minério de ferro.....	105
Tabela 5.11 – Valores médios de RT de amostras virgens e após ensaio de MR....	107

Tabela 5.12 – Parâmetros das curvas de fadiga das misturas analisadas neste estudo	107
Tabela 5.13 – Resultados da deformação plástica específica das misturas asfálticas deste estudo	115

## **LISTA DE ABREVIATURAS E NOMENCLATURA**

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM: American Society for Testing and Materials

BOF: Blast Oxygen Furnace

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CNT: Confederação Nacional do Transporte

CP: Corpo-de-prova

CST: Companhia Siderúrgica de Tubarão

DNIT: Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes

PNLT: Plano Nacional de Logística e Transporte

DER/MG: Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

EAF: Electric Arc Furnace

EM: Especificação de Material

ES: Especificação de Serviço

IBS: Instituto Brasileiro de Siderurgia

ISC: Índice de Suporte Califórnia

JIS: Japan Industrial Standard

LD: Linz-Donawitz

LFA: Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Universidade Federal de Ouro Preto

LVDT: Linear Variable Differential Transducer

ME: Método de Ensaio

MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura

NAPA: National Asphalt Pavemente Association

NBR: Norma Brasileira Registrada

OH: Open Hearth

PRO: Procedimento

SKAP: Sumitomo Kawasaki Aging Process

SUPERPAVE: Superior Performing Asphalt Pavements

# Capítulo 1

---

---

## INTRODUÇÃO

### 1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um dos grandes desafios a vencer pelo Brasil na área de infra-estrutura é melhorar a situação das estradas existentes. As condições precárias de trafegabilidade e deterioração contínua que se encontram grande parte da rede rodoviária nacional se devem, em geral, a falta de conservação oportuna, ao uso inadequado da infra-estrutura rodoviária, agravada pela falta de controle de cargas. O péssimo estado das rodovias provoca centenas de mortes a cada ano e limita seriamente as possibilidades de crescimento econômico do país. De acordo com uma pesquisa feita pela Confederação Nacional do Transporte (CNT), no ano de 2006 apenas 26,1% das estradas do país exibiam condições satisfatórias de uso. No extremo oposto, 33,1% foram consideradas ruins ou péssimas e um total de 73,9% da malha apresentava “algum grau de imperfeição”, como sinalização inadequada e falta de acostamento, conforme mostrado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Percentagem do estado de conservação das rodovias federais (CNT, 2008)

<b>Estado de conservação</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
Ótimo	2,9	5,1	10	11,6	11	10,8	10,5
Bom	28,4	35,8	16	13,7	17	14,2	15,6
Deficiente	66,3	57,6	38,4	36,4	31,8	38,4	40,8
Ruim	2,2	1,2	21,5	23,7	22	22,4	22,1
Péssimo	0,3	0,3	14,1	14,6	18,2	12,2	11,0

Atualmente, o Brasil possui uma malha viária composta por 1.603.131 km de rodovias (Tabela 1.2) que interligam as diversas regiões do país, com uma extensa concentração desta infra-estrutura situada na região Sudeste do país. Deste total, apenas 12,2% das

rodovias nacionais encontram-se pavimentadas, enfatizando-se que apenas 1,8% da extensão total das rodovias municipais estão pavimentadas.

Tabela 1.2 – Extensão do sistema rodoviário nacional (DNIT, 2006)

RODOVIAS	PAVIMENTADAS		NÃO PAVIMENTADAS		TOTAL	
	(km)	(%)	(km)	(%)	(km)	(%)
<b>FEDERAIS</b>	58.152	79,7	14.857	20,3	73.009	4,6
<b>ESTADUAIS COINCIDENTES</b>	17.016	70,4	7.146	29,6	24.162	1,5
<b>ESTADUAIS</b>	98.377	47,2	109.942	58,2	208.319	13,0
<b>MUNICIPAIS</b>	22.735	1,8	1.274.906	98,2	1.297.641	80,9
<b>TOTAL</b>	<b>196.280</b>	12,2	<b>1.406.851</b>	87,8	<b>1.603.131</b>	100

De acordo com o Plano Nacional de Logística e Transporte (PNLT), o transporte rodoviário de carga corresponde por 58% do total, o que faz do transporte rodoviário no país fator determinante da eficiência e da produtividade sistêmica da economia. O fato de o modal rodoviário ser predominante na matriz de transporte de carga no Brasil se deve, geralmente, à preferência do governo pelo investimento prioritário em rodovias, com destaque para as décadas de 1950 a 1970. Portanto, os padrões de eficiência e produtividade do transporte de carga do Brasil ainda continuam a ser determinados pelo desempenho do transporte rodoviário (PNLT, 2007).

O atual grau de precariedade que se encontra a malha rodoviária tem sido um dos principais responsáveis pelo aumento dos custos logísticos no país, refletindo no aumento dos custos operacionais dos veículos, do tempo de viagem e do risco de acidentes. Por ser um país de dimensões continentais, o Brasil precisa de uma estrutura de transporte mais eficiente, capaz de reduzir os custos e tornar nossos produtos mais competitivos. Tendo em vista as condições em que se encontra a malha rodoviária nacional, pode-se vislumbrar todo um horizonte para iniciativas e investimentos em infra-estrutura rodoviária que tenham como finalidade a construção de estradas que proporcionem melhores condições de rolamento quanto à comodidade e segurança.

## 1.2 – RELEVÂNCIA DO TEMA

O desenvolvimento econômico tem motivado um aumento da demanda por agregados naturais, que são insumos minerais vitais empregados na construção civil, tendo significativa importância na construção de estradas.

Para atender as crescentes necessidades de consumo do ser humano relacionadas às atividades agrícolas ou industriais, seja no campo da metalurgia, da indústria química ou da construção civil, aumenta-se a demanda por produtos derivados de minerais utilizados como matéria-prima. Associado a estes fatores, a crescente urbanização em áreas que se afastam cada vez mais das áreas de consumo e o controle ambiental mais rígido têm levado ao encarecimento de agregados naturais, visto que o processo de produção torna-se mais oneroso.

A preocupação com a escassez de recursos naturais e com os impactos que a extração de matérias-primas naturais pode provocar ao meio ambiente tem mobilizado a indústria da construção civil a buscar alternativas que atenuem os danos ambientais, através do melhor aproveitamento dos materiais, a redução da geração e o reaproveitamento dos resíduos gerados e sua devida disposição. A exploração de jazidas minerais para a produção de agregados naturais é responsável por grandes impactos ambientais, verificando-se entre eles poeira, poluição visual e sonora, tráfego ou ainda poluição de recursos hídricos e assoreamento dos mesmos (Diniz *et al*, 2008).

A princípio, o principal atrativo dos agregados alternativos é o aspecto econômico, pois estes materiais normalmente podem ser vendidos por preços inferiores aos dos granulares tradicionalmente empregados em pavimentação.

Portanto, a investigação de materiais alternativos, como escórias de siderurgia e resíduos de minério de ferro, em substituição aos agregados naturais empregados na construção de infra-estrutura rodoviária torna-se necessário, uma vez que a utilização desses materiais constitui uma ferramenta importante no aumento da sustentabilidade da construção, contribuindo para um ambiente saudável e redução dos custos de

pavimentação. Possibilitando, de certa forma, contribuir com o desenvolvimento de pesquisas que promovam técnicas e metodologias construtivas de estradas, de maneira a avançar tecnicamente e otimizar a utilização dos materiais utilizados na pavimentação.

O estado de Minas Gerais, por exemplo, possui um enorme acervo de bens minerais, particularmente na zona do chamado Quadrilátero Ferrífero (Figura 1.1), que constitui uma das principais províncias minerais do mundo compreendendo uma área de aproximadamente 7000 km<sup>2</sup>, composta por consideráveis reservas de minério de ferro e um amplo número de outros minerais, que são intensamente exploradas por grandes conglomerados industriais e inúmeras minerações de médio e grande porte (Germani, 2002).

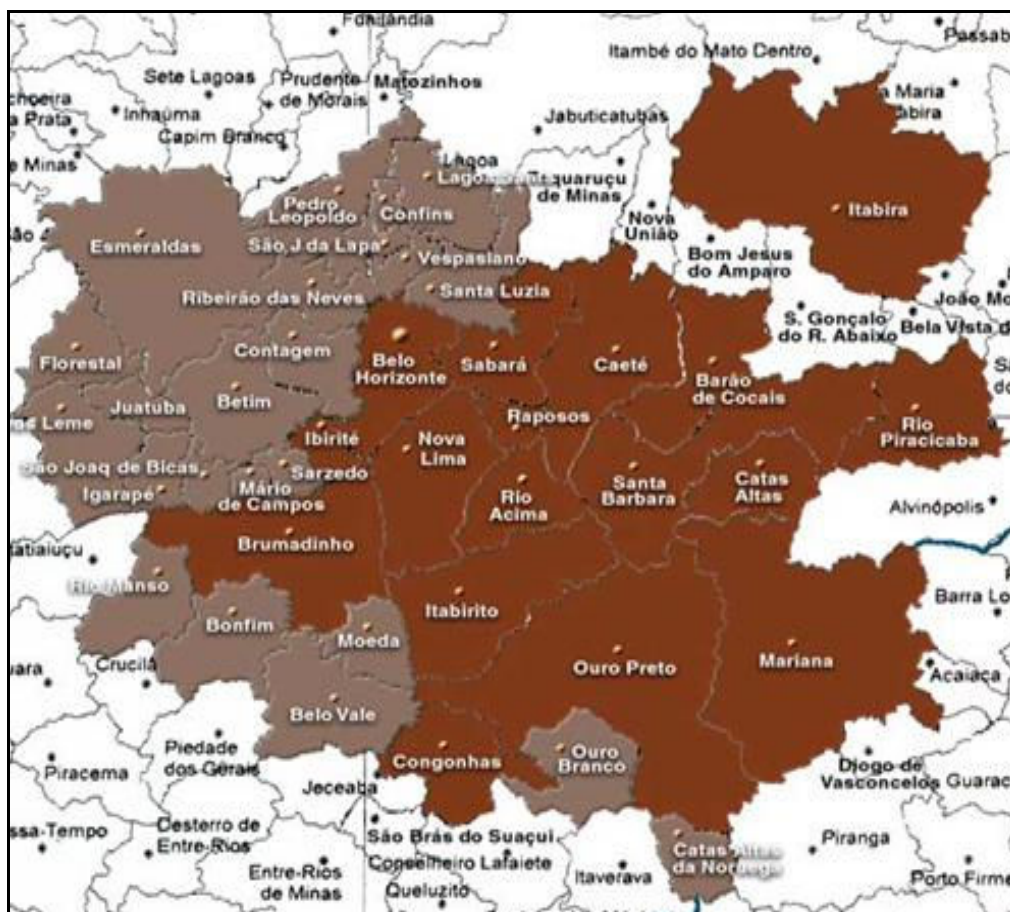


Figura 1.1 – Quadrilátero Ferrífero



Adicionalmente, o aperfeiçoamento dos processos de beneficiamento dos minerais de ferro tem acarretado em um aumento significativo dos volumes de estéreis e rejeitos gerados, resultando cada vez mais na crescente ocupação de áreas para disposição e estocagem destes resíduos além de contribuir para o potencial de degradação do meio ambiente.

Fernandes (2005) relata que a minimização dos impactos ambientais é viabilizada pela reciclagem dos resíduos de minério de ferro, com redução de área para depósito de botaforas e não impõe a necessidade de desmatamento e frentes de lavra para exploração de materiais granulares tradicionais.

Este potencial de degradação ambiental associado aos efeitos que a logística de transporte que a mineração impõe à malha rodoviária localizada na sua área de influência, confere grande importância ambiental e econômica para os estudos que buscam a viabilidade técnica da utilização dos resíduos de mineração na recuperação estrutural dos pavimentos das malhas rodoviárias e ferroviárias que servem a atividade mineradora. A Tabela 1.3 apresenta a malha rodoviária do Quadrilátero Ferrífero que interliga as diversas mineradoras e cidades localizadas na região.

Tabela 1.3 - Malha rodoviária pertencente ao Quadrilátero Ferrífero (DER/MG, 2006)

<b>Malha rodoviária na área das 1ª, 12ª e 17ª Coordenadorias Regionais do DER/MG</b>			
<b>Situação</b>	<b>Federal (km)</b>	<b>Estadual (km)</b>	<b>Total (km)</b>
Leito natural	31	228,9	259,9
Implantada	0	143,8	143,8
Em obras de pavimentação	30,5	55,5	86
Pavimentada	653,6	1644,5	2298,1
Duplicada	337	96,6	433,6
Em obras de duplicação	0	4,8	4,8
<b>Total (km)</b>	<b>1052,1</b>	<b>2174,1</b>	<b>3226,2</b>

Saraiva (2006) destaca que uma das alternativas ao modelo estrutural vigente consiste na adoção de materiais alternativos de inserção regional que, mesmo não se enquadrando totalmente às condicionantes normativas, assegurem um desempenho estrutural tão satisfatório quanto aos sistemas convencionalmente adotados. Neste

contexto, além dos resíduos de mineração, incluem-se os solos residuais, escórias e materiais sintéticos.

Devido a intensa atividade mineral existente, a malha rodoviária do Quadrilátero Ferrífero possibilita o transporte e escoamento parcial do minério de ferro beneficiado, bem como a chegada de insumos necessários à produção do minério. Além disso, a atividade econômica regional é estimulada por diversas atividades e empresas que prestam serviços às mineradoras locais, oferecendo-lhes suporte às operações de mineração e contribuindo para um fluxo de veículos bastante ativo.

Conseqüentemente, esta malha sofre os efeitos da solicitação do tráfego intenso e muitas vezes com carga acima dos limites legais. Estas circunstâncias aliada ao longo período sem investimentos na conservação e atualização da malha rodoviária gerou um passivo estrutural nos pavimentos que urge ser resgatado.

Para efetivar-se este resgate é necessária a busca da inovação utilizando métodos de dimensionamento baseados na análise mecânica e na caracterização geotécnica dos rejeitos da mineração e resíduos siderúrgicos afim de introduzi-los nas estruturas de pavimentação como materiais de construção.

### **1.3 – OBJETIVOS DA PESQUISA**

Para que sejam desenvolvidos novos materiais, em qualquer área do conhecimento, é de fundamental importância que se conheçam as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais de constituição, bem como suas possíveis combinações. Neste contexto, o presente trabalho tem como finalidade contribuir para uma melhor compreensão do comportamento mecânico de misturas asfálticas convencionais e modificadas.

O projeto de pesquisa proposto tem como objetivo geral analisar laboratorialmente aspectos físicos e de comportamento mecânico de agregados convencionais e alternativos para uso em revestimento asfáltico.

O estudo envolve a análise dos agregados alternativos (rejeito de minério de ferro e escória de aciaria) como materiais de revestimento asfáltico, buscando promover uma melhoria das propriedades físicas e geotécnicas do material. Também serão realizados alguns ensaios com brita graduada (material tradicionalmente empregado na execução de pavimentos) a fim de comparar os resultados. O projeto de pesquisa contempla a realização de ensaios laboratoriais para a caracterização do ligante asfáltico e dos agregados, além de ensaios para caracterização mecânica das misturas asfálticas com o intuito de avaliar e comparar o desempenho estrutural dos revestimentos em concreto asfáltico com utilização de agregados alternativos e agregados convencionais.

A presente pesquisa é laboratorial e de ordem quantitativa, uma vez que serão moldadas as amostras das misturas asfálticas, cujos resultados serão tabelados e apresentados em gráficos, para posterior análise dos resultados.

Como objetivos específicos citam-se:

- Revisão da literatura existente sobre a escória de aciaria e o rejeito de minério de ferro, suas características e utilização desses materiais na infra-estrutura de pavimentos, além de estudos que abordem o desempenho dos pavimentos flexíveis em concreto asfáltico com misturas betuminosas convencionais e alternativas;
- Caracterização dos materiais utilizados como agregados nas misturas asfálticas segundo a constituição mineralógica, massa específica real e absorção, durabilidade química e mecânica, características geométricas e adesividade ao ligante asfáltico;
- Caracterização do ligante asfáltico através de ensaios de massa específica real, viscosidade, ponto de amolecimento, ductilidade e penetração;
- Dosagem das misturas asfálticas em estudo segundo a metodologia Marshall com a utilização de brita graduada e escória de aciaria, em diferentes

proporções, como agregados graúdos e miúdos e o rejeito de minério de ferro como material de enchimento alternativo (filer);

- Avaliar o comportamento mecânico das misturas asfálticas por meio de ensaios de módulo de resiliência (MR), resistência à tração estática por compressão diametral (RT), fadiga por compressão diametral a tensão controlada e deformação permanente por compressão axial (creep estático).
- Análise, avaliação e comparação do desempenho mecânico das misturas asfálticas tendo como propósito verificar a viabilidade técnica da utilização do rejeito de minério de ferro e da escória de aciaria como agregados para revestimentos asfálticos;

#### **1.4 – ESTRUTURA DO TRABALHO**

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. O Capítulo 1 apresenta as considerações a respeito da malha rodoviária brasileira, enfatizando as condições de uso que a mesma se encontra. Destacando ainda o potencial de uso de agregados alternativos para pavimentação, principalmente na região do Quadrilátero Ferrífero. Os objetivos da pesquisa e a estrutura da dissertação também são apresentados neste capítulo.

O Capítulo 2 se refere a uma revisão bibliográfica abordando os processos de geração do resíduos de minério de ferro e da escória de aciaria. Discorre, ainda, das principais características desses resíduos, a utilização desses materiais como matéria-prima nas camadas do pavimento e seus respectivos fatores que limitam sua utilização como agregado.

O Capítulo 3 apresenta a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa (agregados e ligante asfáltico). Encontram-se neste capítulo a metodologia adotada, com a descrição detalhada dos procedimentos laboratoriais empregados e dos ensaios específicos complementares para cada tipo de agregado.

O Capítulo 4 trata da dosagem das misturas asfálticas empregadas neste estudo por meio da metodologia Marshall, assim como a apresentação e análise dos resultados.

O Capítulo 5 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização mecânica das misturas asfálticas utilizadas, tendo em vista a obtenção de parâmetros mecânicos que possibilitem fazer uma análise do desempenho estrutural das misturas.

No Capítulo 6 são apresentados as conclusões deste estudo e as recomendações para pesquisas futuras.

## Capítulo 2

---

---

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 – DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Os procedimentos de dosagem de misturas asfálticas têm o propósito de estimar a seleção de materiais que propiciem ao revestimento um comportamento mecânico capaz de resistir às solicitações de carregamento impostas pelo tráfego.

Nesse contexto, vários procedimentos foram desenvolvidos em todo o mundo para dosagem de misturas asfálticas, sendo que, cada um possui critérios próprios que visam o estabelecimento de relações entre os ensaios de laboratórios e os resultados obtidos em campo sob condições usuais de serviço (Wesseling, 2005).

Destacam-se como principais métodos de dosagem de concreto asfáltico (Motta *et al.*, 2000; Vasconcelos e Soares, 2005; Bernucci *et al.*, 2008): (a) o método Hubbard-Field, que foi o primeiro procedimento documentado e que determina a carga máxima suportada por um CP, denominada estabilidade Hubbard-Field; (b) Método Hveem, que realiza análises de parâmetros volumétricos e de resistência de amostras confeccionadas por compactação pulsante; (c) método Marshall, que utiliza a compactação por impacto e estabelece o teor ótimo de ligante baseado em propriedades volumétricas e medidas de Estabilidade e Fluência; (d) método Superpave, sendo uma metodologia que estima o teor de projeto baseada no volume de vazios e no conhecimento da granulometria dos agregados, com utilização de um dispositivo mecânico, denominado compactador giratório Superpave (SGC), para a modelagem dos corpos-de-prova.

Entre as décadas de 40 e metade da década de 90, 75% dos projetos de misturas asfálticas realizados pelos departamentos de transporte norte-americanos eram baseados no método Marshall e apenas 25% no método Hveem (Roberts *et al.*, 1996). No entanto,

a partir do ano de 1993, a metodologia Superpave vem sendo adotada nos EUA para dosagem das misturas. Vários engenheiros acreditam que a compactação por impacto utilizada no método Marshall resulta em amostras com densidades diferentes das densidades do revestimento asfáltico em campo, enquanto que a compactação por amassamento utilizada no método Superpave, simula de maneira mais próxima da realidade a compactação em campo (Vasconcelos e Soares, 2005; Bernucci *et al.*, 2008). No Brasil, o método Superpave praticamente encontra-se limitado a trabalhos acadêmicos, sendo pouco aplicado em projetos corriqueiros de pavimentação.

Mundialmente, o método Marshall é o procedimento mais difundido e utilizado, inclusive no Brasil, por se tratar de um método simples, rapidez de execução e que utiliza equipamentos de baixo custo.

### **2.1.1 – Dosagem Marshall**

A metodologia Marshall de dosagem de misturas asfálticas foi desenvolvida na década de 1940 pelo Engenheiro Bruce Marshall, do Departamento de Estradas de Rodagem do estado do Mississippi, nos EUA, e tinha como objetivo determinar a proporção de ligante e agregado que conferisse ao revestimento asfáltico desempenho satisfatório de uso (Bernucci *et al.*, 2008).

Assim sendo, a quantidade ótima de ligante asfáltico necessária deveria garantir a mistura o enquadramento dentro de especificações que são definidas com a finalidade de evitar desagregação prematura da mistura, por falta de ligante, ou superfícies escorregadias e deformáveis, por excesso de ligante.

Originalmente, o teor ótimo de ligante era determinado baseado nos resultados de estabilidade, definida como a resistência máxima oferecida pelo corpo-de-prova antes da sua ruptura em uma prensa, e fluência, designada como o deslocamento vertical apresentado pelo CP correspondente à aplicação da carga máxima. Os valores admissíveis desses parâmetros eram determinados empiricamente (Wesseling, 2005).

No Brasil, a metodologia Marshall sofreu alterações ao longo do tempo. Apesar da especificação DNIT-ES 031/2006 ainda apresentar a estabilidade como requisito de dosagem, vários órgãos rodoviários brasileiros utilizam atualmente como critério de seleção do teor de projeto, os parâmetros volumétricos denominados volume de vazios (Vv) e relação betume/vazios (RBV) (Vasconcelos e Soares, 2005).

## 2.2 – GERAÇÃO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

O processo de mineração pode ser definido como o conjunto de atividades que, através do beneficiamento ou tratamento dos minérios tem como objetivo modificar as propriedades físicas dos minerais de modo que sua identidade química seja preservada. No conjunto de operações que envolvem desde as atividades de lavra até a obtenção do produto final (minério), estão envolvidos uma série de tratamentos físicos e químicos realizados nos minerais.

A Figura 2.1 mostra de maneira simplificada e apenas ilustrativa o fluxograma de um processo de mineração, devido à diversidade de fatores podem influenciar nas atividades de uma usina de minério de ferro.

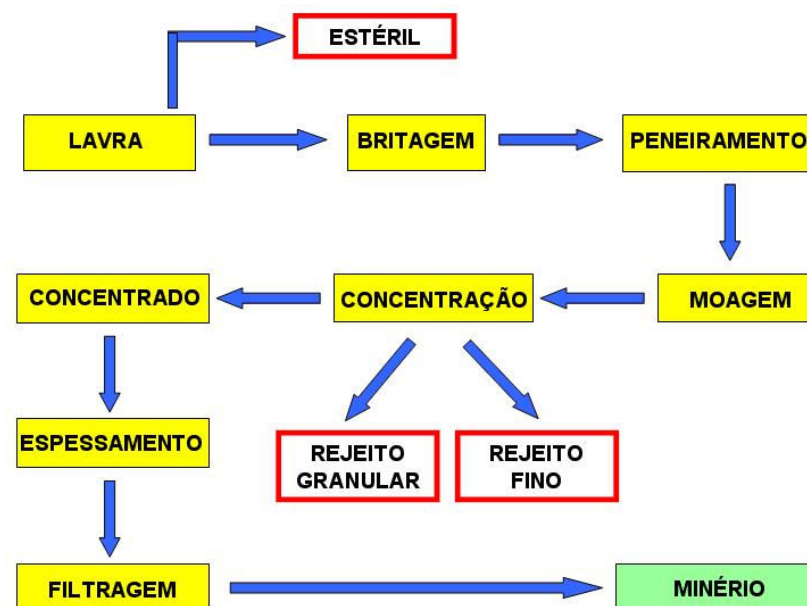


Figura 2.1 – Esquema típico do processo de mineração de ferro



As características mineralógicas e os teores do minério de ferro explorado em cada mina estão entre os diversos fatores que podem influenciar nas operações e nos conseqüentes produtos do processo de mineração (Albuquerque Filho, 2004).

A operação de lavra consiste no decapeamento e desmonte do maciço rochoso mineralizado, carregamento, transporte de minério bruto para a usina de concentração e transporte de estéril para as áreas destinadas à disposição de resíduos.

Os processos de peneiramento, britagem e moagem têm como finalidade a redução do tamanho dos grãos (cominuição) para que ocorra a liberação do mineral, pois o processo de concentração impõe que as partículas de minério de ferro estejam fisicamente liberadas, ou seja, apresentando apenas uma espécie mineralógica.

Nas operações de concentração, que são geralmente realizadas com a presença de água, ocorre a separação seletiva das partículas do minério (parcela passível de aproveitamento econômico) e das partículas dos minerais de ganga (parcela com baixo valor agregado) através das diferenças de propriedades como: densidade, forma, condutividade elétrica, susceptibilidade magnética, superfície e a cor.

Nas fases de espessamento e filtração, é necessária a redução do volume de água do concentrado até o final do processo (desaguamento). Conseqüente, ocorre a elevação do teor de sólidos.

### **2.2.1 – Características dos rejeitos de minério de ferro**

Os resíduos de minério de ferro são subprodutos oriundos da atividade de mineração com baixo ou sem valor econômico direto. A geração de resíduos relacionados ao processo de mineração de ferro pode ocorrer durante a operação de lavra, originando o resíduo denominado estéril, que usualmente não é submetido aos processos de beneficiamento. Este tipo de resíduo é formado normalmente por solos ou rochas provenientes da atividade de decapeamento da jazida. Durante as atividades de concentração, na qual ocorre a separação seletiva dos minerais, podem ser gerados dois

tipos de resíduos de mineração denominados rejeito granular e rejeito fino ou simplesmente rejeitos de minério de ferro (Presotti, 2002; Fernandes, 2005; D'Agostino, 2008)

Os rejeitos de minério de ferro apresentam uma grande heterogeneidade em suas características em função das diferenças do processo de beneficiamento do minério, do tipo de minério bruto ou mesmo da variabilidade das frentes de lavra. Segundo D'Agostino (2008), pequenas variações de litologia no maciço rochoso da jazida e nos processos de beneficiamento do minério de ferro podem resultar em variações nas características dos rejeitos, tais como, mudanças de volumes produzidos, granulometria, variação de densidade, ângulo das arestas e arredondamento dos grãos que compõem o rejeito.

Aliado a estes fatores, o rejeito pode apresentar características distintas dependendo do local onde foram depositados. Durante a deposição, diferentes regiões do depósito podem apresentar características granulométricas, mineralógicas e estruturais diferentes em função das variáveis que controlam os processos de descarga da lama. A heterogeneidade do rejeito também pode ser causada pelas variações na composição do minério e mesmo nas condições de operação do minério ao longo da vida útil da mina (Presotti, 2002).

No Brasil, em geral, os rejeitos de minério de ferro são transportados e dispostos sob a forma de polpa, o que reduz substancialmente o custo do transporte desses materiais. Todavia, podem ainda ser dispostos após passarem por processos de espessamento, constituindo as “pastas” e o rejeito “a granel” (Ferreira, 2007).

A caracterização tecnológica dos rejeitos de minério de ferro, por meio de metodologias que contemplem ensaios laboratoriais e de campo, é de fundamental importância para os estudos geotécnicos de infra-estrutura rodoviária e ferroviária. A noção do rejeito de minério de ferro como material geotécnico definido é ainda bastante incipiente e a modelação dos problemas geotécnicos envolvendo este material é estabelecida a partir de uma generalização dos princípios clássicos da mecânica dos solos. Um dos grandes

obstáculos e desafios relacionados ao uso do rejeito de minério de ferro como matéria-prima em empreendimentos rodoviários e ferroviários, explica-se pelo fato do mesmo não se comportar necessariamente como solo, representando uma perda significativa no domínio do conhecimento em projetos e empreendimentos envolvendo este resíduo. Assim sendo, torna-se necessário a adoção de metodologias e estudos específicos para determinação de suas propriedades (Gomes, 2002; Albuquerque Filho, 2004; Fernandes, 2005).

A constituição do rejeito é caracterizada pela presença bem definida de uma fração líquida e sólida. A fração sólida é formada por partículas com granulometria fina, abrangendo partículas que variam de areia a colóide, com características variadas e diretamente condicionadas às características da jazida e ao processo de beneficiamento do minério de ferro.

A variação da granulometria do rejeito ao longo da área de deposição está associada a vários fatores. Após o lançamento do rejeito, ocorre a seleção de partículas que são depositadas em diferentes locais ao longo da trajetória do fluxo de lama, em função do tamanho, da forma e da densidade dos grãos. A predisposição que a fração sólida apresenta em escoar ou sedimentar é caracterizada como segregação hidráulica. Ao escoar ao longo da praia de deposição, o rejeito perde velocidade provocando a diminuição da sua capacidade de arraste, que vai se limitando a partículas cada vez menores. Além disso, mudança dos canhões de lançamento da lama, interferências de outros canhões próximos e paralisações momentâneas do lançamento provocam mudanças na granulometria do rejeito depositado, ocasionando a formação de bandas de material fino intercaladas entre frações mais grossas (Ribeiro, 2000).

A Figura 2.2 mostra as diferentes curvas granulométricas de diferentes amostras de rejeito de minério de ferro provenientes de jazidas localizadas na região do Quadrilátero Ferrífero (Albuquerque Filho, 2004).

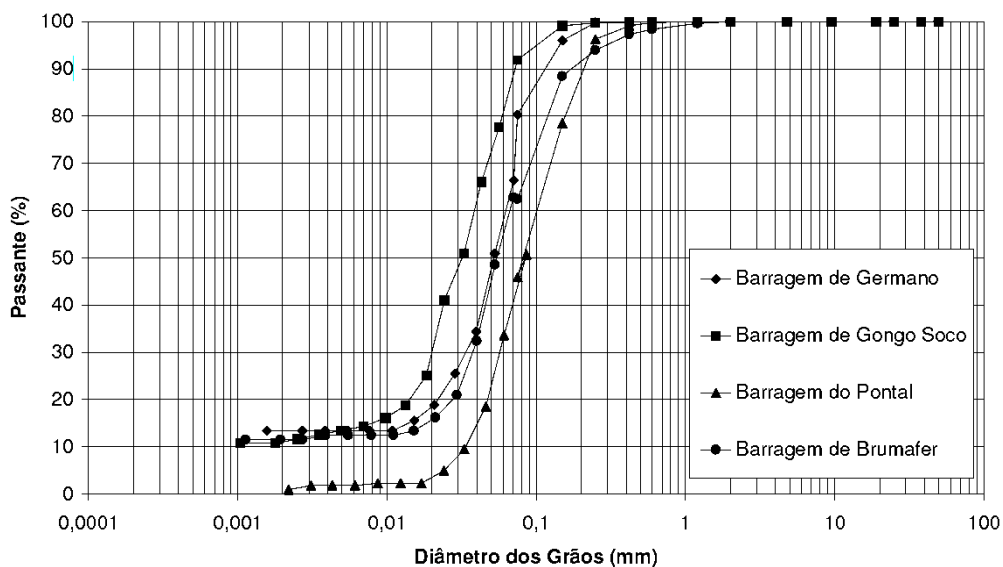


Figura 2.2 – Curva granulométrica de rejeitos de minério de ferro (Pereira 2001, *apud* Albuquerque Filho, 2004)

Segundo Fernandes (2005), os rejeitos denominados granulares geralmente apresentam baixa compressibilidade devido a sua alta permeabilidade. Além disso, possuem coesão muito baixa ou nula e valores de densidade dos grãos elevada devido à influência das partículas de minério de ferro remanescentes no rejeito.

Presotti (2002) destaca que, apesar dos rejeitos granulares apresentarem comportamento e características de areias, os mesmos não podem ser tratados como tal, pois a forma e o tipo de processamento do minério influenciam as características mineralógicas, físico-químicas e geotécnicas, atribuindo características específicas para cada rejeito.

### 2.2.2 – Uso de resíduos de minério de ferro em pavimentação

No Brasil, ainda há uma carência de pesquisas e trabalhos publicados que abordam o uso de rejeito de minério de ferro em pavimentação, em comparação aos resíduos industriais. Dando destaque para a escória de aciaria, gerada pela indústria siderúrgica, que vem sendo amplamente estudada e utilizada como material granular em camadas de pavimentos rodoviários e ferroviários.

Saraiva (2006) utilizou resíduos de mineração de ferro como materiais alternativos na construção de um trecho experimental rodoviário na cidade de Itabira, Minas Gerais, e analisou o comportamento geotécnico dos rejeitos de minério de ferro misturados a solos argilosos, como materiais da camada de base, combinando-se com geossintéticos de acordo com a seção-teste, conforme mostra a Tabela 2.1. O trecho foi monitorado através de extensômetros elétricos-resistivos e sensores de temperatura e umidade para que os dados coletados, correspondentes às solicitações dinâmicas experimentadas pelo pavimento, fossem comparados diretamente com as deformações medidas no local. Os resultados demonstraram que é tecnicamente viável a utilização do rejeito de minério de ferro na composição de misturas para pavimentos rodoviários e ferroviários.

Tabela 2.1 – Caracterização de materiais de base e sub-base (Saraiva, 2006, modificada)

Mistura	Materiais (%)			ISC	
	Jigue	rejeito de minério de ferro	Argila	ISC (%)	Expansão (%)
M-01	50	25	25	33,8	0,000
M-02	50	0	50	24,7	0,200
M-03	60	20	20	65,0	0,000
M-04	60	0	40	26,3	0,320
M-05	70	10	20	73,0	0,030
6	Cascalho de Itabirito			89,7	0,018
7	Cascalho de Mina			67,8	0,120

Fernandes (2005) estudou o comportamento mecânico das misturas contendo resíduos de minério de ferro associados a geossintéticos na construção de um trecho experimental de ferrovia instrumentado com sensores elétricos tipo KM-120 para medições e análises das deformações verticais e horizontais sofridas pelas camadas estruturais do pavimento, comprovando a qualidade técnica dessas misturas compatível com a de materiais normalmente utilizados em pavimentos ferroviários. Os resultados obtidos demonstraram que os resíduos de minério de ferro tenderam a apresentar boa capacidade de suporte, valores elevados de densidade e de ISC (Índice de Suporte Califórnia), baixa expansão e elevados módulos de resiliência, propriedades estas fortemente afetadas pela presença do ferro. Entretanto, o autor da pesquisa recomenda

que sejam executados dispositivos de drenagem adequados para evitar a grande variação do teor de umidade do material de subleito e sublastro ao longo do tempo.

Ferreira (2007) estudou o comportamento geotécnico e mecânico de cinco tipos de estéreis de minério de ferro (canga laterita, canga contaminada com minério de ferro, areia laterítica, itabirito pobre amarelo e itabirito cinza) aplicados como materiais de infra e superestrutura em um pavimento rodoviário experimental para tráfego de caminhões fora-de-estrada. Foram realizados ensaios laboratoriais para caracterização geotécnica dos materiais, tais como, cisalhamento direto, triaxial de carga repetida e ISC. O controle tecnológico de campo envolveu medições de deflexões e rigidez das camadas estruturais. O trecho experimental foi monitorado, continuamente por um período de dois meses, através da instrumentação do pavimento por meio de sensores de deformação, pressão, umidade e temperatura. Os resultados demonstraram que o pavimento executado com estéreis apresentou desempenho mecânico satisfatório quanto à capacidade de suporte e de durabilidade ante a ação dos caminhões fora-de-estrada e das intempéries. Tal afirmação é sustentada pelo bom estado de conservação da pista após dois meses de monitoramento, tempo superior aos serviços de manutenção das vias empregados na mina.

### **2.3 – PROCESSO DE PRODUÇÃO DA ESCÓRIA**

O aço pode ser definido como sendo um produto siderúrgico formado por uma liga de ferro e carbono. Além disso, possuem elementos de liga secundários provenientes do processo de fabricação. O grande uso do aço pode ser atribuído às notáveis propriedades desta liga, à abundância das matérias-primas necessárias à sua produção e o seu preço competitivo (Pannoni, 2008).

Para a obtenção do aço, diferentes processos produtivos podem ser empregados. Basicamente existem três processos de fabricação do aço que se distinguem pela utilização de diferentes fornos de refino, conforme mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Processos de refino do aço

Processo de fabricação do aço	Forno de Refino
OH (Open Hearth)	Forno Siemens-Martins
LD (Linz-Donawitz) ou BOF (Blast Oxygen Furnace)	Conversor a oxigênio
EAF (Electric Arc Furnace)	Forno de Arco Elétrico

As siderúrgicas brasileiras utilizam os três tipos de fornos para a produção e refino do aço, sendo os processos que empregam os fornos de arco elétrico (EAF) e conversores a oxigênio (LD/BOF), os mais usados. A Tabela 2.3 mostra a produção do aço bruto no Brasil por processo de refino.

Tabela 2.3 – Produção brasileira de aço bruto por processo de refino (Sousa, 2007)

Processo	Forno de refino	Produção de aço 10 <sup>5</sup> toneladas
OH	Siemens-Martins	0,5
Elétrico (EAF)	Arco Elétrico	5,4
Oxigênio (LD/BOF)	Conversor a oxigênio	20,8

O processo do tipo OH, é um processo lento de fabricação de aço e possui uma produtividade baixa se comparado ao processo BOF. O seu uso está praticamente em declínio, em virtude de suas desvantagens em relação a processos mais modernos. Atualmente, os processos de LD e EAF são os mais utilizados para a produção do aço (Oliveira, 2006; Machado, 2000).

O processo EAF consiste na fusão da sucata de aço no interior do forno elétrico através da energia gerada por um arco elétrico. Durante a fase de carregamento do forno com a carga metálica pode-se adicionar cal, se necessário. Na etapa denominada “afinação oxidante”, ocorre a injeção de oxigênio através de uma lança com o objetivo de eliminar elementos como carbono e fósforo através de reações de oxidação. As reações de refino ocorrem através da adição de CaO e MgO para a redução do teor de oxigênio e enxofre (afinação redutora). Posteriormente ocorrem adições para o ajuste da composição química resultando na formação da escória de aciaria elétrica. (Castelo Branco, 2004).

No processo do tipo LD ou BFO de refino e produção do aço, a sucata e o ferro gusa líquido são inseridos no conversor a oxigênio onde, inicialmente, uma lança é introduzida injetando oxigênio gasoso em alta pressão com o objetivo de promover a redução e eliminação de vários elementos indesejáveis no aço, como o carbono, silício e fósforo através das reações de oxidação. A escória de aciaria LD é resultante da reação entre os óxidos formados com o CaO utilizado no processo. Na etapa final, o conversor é basculado e a escória de aciaria e o aço líquido são separados por diferença de densidades. Neste processo, não há necessidade de fonte de calor externa devido a temperatura do aço líquido ser mantida ou elevada através das reações exotérmicas de oxidação. (Castelo Branco, 2004; Oliveira, 2006; Machado, 2000). A Figura 2.3 mostra um exemplo de processo de formação da escória de aciaria LD.

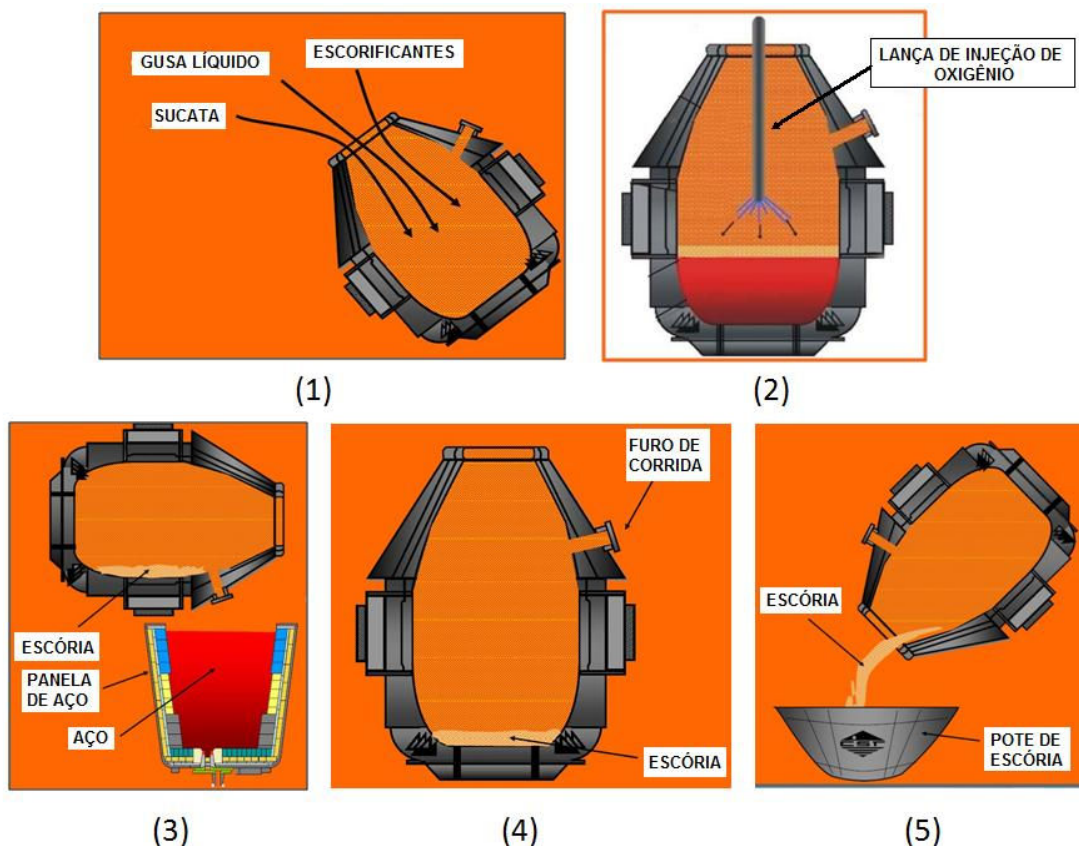


Figura 2.3 – Sequência de operação do conversor a oxigênio tipo LD: (1) carregamento de sucata e ferro gusa; (2) sopro de oxigênio; (3) basculamento de aço na panela; (4) conversor antes de bascular a escória; (5) vazamento da escória de aciaria no pote de escória



### 2.3.1 – Escória de Aciaria

As escórias de aciaria são resíduos siderúrgicos formados em fornos elétricos ou conversores a oxigênio através da conversão do ferro gusa e sucata em aço. Dependendo dos processos utilizados na fabricação do aço, a escória de aciaria pode ser classificada como oxidante ou redutora:

- Escória Oxidante: resíduo originado das reações de oxidação dos elementos de carbono, fósforo e silício resultante da injeção de oxigênio no aço fundido (refino oxidante). Este tipo de escória é formada nos processos LD, EAF e OH.
- Escória Redutora: resíduo após o vazamento da escória oxidada, onde se adiciona elementos de liga juntamente com o óxido de cálcio (CaO) e a fluorita (CaF<sub>2</sub>) com o objetivo de promover a dessulfuração do aço fundido. Este tipo de escória é originado na etapa secundária do refino realizado no forno-panela, sendo formada apenas pelo processo EAF (Freitas, 2007).

As siderúrgicas que utilizam o forno de arco elétrico, como as que utilizam o conversor a oxigênio, produzem em torno de 100 a 170 kg de escória de aciaria por tonelada de aço produzido. A variação da quantidade de resíduo gerado depende do processo de geração, das matérias primas utilizadas e das diferentes especificações dos aços produzidos em cada usina. Para a escória de aciaria LD, são gerados, aproximadamente 110 kg de escória de aciaria por tonelada de aço. (Kuehn *et al.*, 2000; Geyer, 2001; Sousa, 2007).

As características físicas dos grãos das escórias referentes à textura superficial, granulometria e densidade, variam de acordo com o processo de resfriamento sofrido pelas mesmas (Rohde, 2002). No processo lento de resfriamento ao ar, ocorre a solidificação dos grãos em decorrência da cristalização dos óxidos que compõe a escória, resultando em escórias de superfície rugosa e estrutura veicular. Pelo processo de resfriamento rápido com a utilização de vapor ou ar, formam-se escórias porosas e de baixa densidade devido a expansão sofrida pelos grãos. No processo de resfriamento brusco com jato d'água seguido de resfriamento em tanque com água, forma-se uma

escória granular vítrea com estrutura porosa e textura áspera (Castelo Branco, 2004; Rohde 2002; Oliveira, 2006).

As escórias formadas pelo processo EAF apresentam grãos porosos (refino oxidante) e lisos (refino redutor) com coloração escura. As escórias formadas pelo processo LD são, geralmente, mais heterogêneas e possuem maior quantidade de cal livre em relação às escórias de aciaria elétrica, sendo praticamente lisas e apresentando grãos de coloração mais clara (Freitas, 2007; Pena, 2004).

A composição química das escórias de aciaria é constituída por uma mistura de vários elementos e impurezas que são formadas durante o processo de produção do aço, tais como: óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO), silicatos de cálcio (CaSiO<sub>3</sub>), óxido de ferro (FeO), óxido de silício (SiO<sub>2</sub>), dentre outros. Como consequência da oxidação do silício e do fósforo, elementos como a cal e o magnésio se precipitam ao ultrapassar os limites de solubilidade da escória de aciaria fundida, resultando em elevados teores de CaO e MgO, presentes na composição da escória (Castelo Branco, 2004). A Tabela 2.4 mostra a composição química de escórias de aciaria EAF provenientes de diferentes usinas siderúrgicas brasileiras, e a Tabela 2.5 mostra a composição química de escórias de aciaria LD nacionais.

Tabela 2.4 – Composição química de escórias EAF (Oliveira, 2006)

Siderurgia	CaO (%)	MgO (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	MnO (%)	Fe total (%)	S (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)
BARRA MANSA	28,04	16,93	4,00	20,42	5,37	17,39	-	0,49
BELGO - CARIACICA	34,00	9,30	6,20	18,20	4,70	18,67	0,13	0,54
BELGO - PIRACICABA	41,60	7,90	4,40	-	4,50	21,6	0,16	-
BELGO - JUIZ DE FORA	37,00	9,31	3,31	17,33	7,33	16,19	0,07	0,41
GERDAU - CEARENCE	45 - 65	5 - 15	1 - 5	15 - 17	0,5 - 5	-	-	-
GERDAU - AÇONORTE	25,70	10,37	5,31	15,80	5,51	34,31	0,31	-
GERDAU - USIBA	42,00	6,50	4,50	13,50	3,00	28,00	0,06	0,60
GERDAU - COSIGUA	30,00	9,00	3,00	17,00	3,00	35,00	1,00	-
GERDAU - GUAÍRA	25,50	12,10	7,70	20,30	6,60	23,20	0,06	0,19
VILLARES - MOGI	45 - 55	4 - 6	3 - 5	12 - 17	4 - 6	10 - 15	-	-
VILLARES - PINDA	30 - 50	3 - 9	3 - 7	8 - 18	4 - 6	7 - 20	-	0,3-0,7

Tabela 2.5 – Composição química de escórias LD (Raposo, 2005)

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

### 2.3.2 – Utilização da escória de aciaria na pavimentação

Devido à atual preocupação com o meio ambiente e a crescente escassez de matérias-primas naturais para a construção civil, a busca por materiais alternativos tem se tornado um desafio estimulante para o meio científico. Várias pesquisas em todo o mundo vem sendo realizadas focando o reaproveitamento de resíduos siderúrgicos, através de métodos, processos e tecnologias apropriadas para a utilização e aplicação racionalizada destes resíduos, de forma viável técnica e economicamente.

O uso da escória de aciaria como fonte alternativa de matéria-prima para a pavimentação rodoviária tem se apresentado como uma alternativa viável técnica e economicamente, além de apresentar benefícios ao meio ambiente, como a redução do passivo ambiental gerado pelo acúmulo das pilhas de resíduos depositado nos pátios das siderúrgicas e diminuição da extração de materiais naturais como rochas britadas, areias e cascalhos utilizados na construção de pavimentos.

A escória de aciaria usada como agregado em projetos de pavimentação apresenta vantagens em relação aos agregados convencionais, pois consiste de maior resistência à abrasão, menor custo por não necessitar de explosivos para desmonte, ótima capacidade de drenagem conferida pela sua estrutura vesicular, rigidez e adesividade satisfatórias às

misturas asfálticas proporcionadas pela forma cúbica dos grãos, maior peso específico, que resulta em elevada capacidade de carga e possibilita a implantação de camadas mais finas de bases e sub-bases (Rohde, 2002; Raposo, 2005).

Noureldin e McDaniel (1989) relatam que na Europa, Canadá, Austrália e partes dos Estados Unidos a escória de aciaria tem sido utilizada com sucesso como agregados em misturas asfálticas. No Brasil várias obras rodoviárias executadas com o uso da escória de aciaria se encontram em perfeitas condições de uso, mesmo após anos de utilização e solicitações de cargas impostas pelo tráfego.

Como exemplo de várias obras rodoviárias nacionais executadas com a utilização da escória de aciaria como agregado, têm-se: BR-393 (Volta Redonda-Três Rios), BR-116 (Volta redonda-Divisa RJ/SP), RJ-157 (Barra Mansa-Divisa RJ/SP), ES-466 (Colatina-Itaimbé), pistas de pouso e decolagem do aeroporto internacional de Vitória-ES, duplicação da Rodovia do Sol-ES, acesso ao Terminal de Produtos Siderúrgicos da CST, estradas rurais do município de Santa Maria de Jetibá-ES e vários pavimentos na região do município de Volta Redonda (Castelo Branco, 2004).

Noureldin e McDaniel (1989) avaliaram misturas asfálticas contendo escória de aciaria com teores variados em pavimentos rodoviários de tráfego intenso. Os resultados obtidos mostraram valores elevados de estabilidade Marshall para as misturas e verificaram também que as pistas de rolamento apresentavam boa aderência e resistência à derrapagem. Os altos teores dos compostos FeO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presentes na escória provocaram o endurecimento do revestimento asfáltico e em condições ambientais com temperaturas baixas propiciaram a formação de trincas e fissuras na mistura. Como forma de minimizar o problema, os autores recomendaram a utilização de cimentos asfálticos de menor viscosidade.

Rohde (2002) realizou estudos com misturas contendo escória de aciaria elétrica, cinza pesada e cal de carbureto para avaliar o potencial de utilização desses materiais nas camadas de base e sub-base de pavimentos. Verificou-se que a escória com granulometria corrigida (EGC), através de britagem e composição para se enquadrar na

faixa C do DNIT, propiciou melhorias nas características de trabalhabilidade, compactação e valores de ISC na ordem de 200%, sendo superiores ao da brita graduada. Ao analisar o comportamento da EGC quanto a deformação elástica, observou-se que a mesma apresentou valores de MR superiores em relação aos valores encontrados para os materiais convencionais (britas de granito, basalto e saibro), para qualquer nível de tensão confinante. A autora também demonstrou através de análise paramétrica, que um pavimento composto por 7,5 cm de CBUQ e 40 cm de brita graduada apresenta um comportamento, relacionado à deformação elástica, semelhante a uma estrutura composta de 7,5 cm de CBUQ e 20 cm de EGC. O que resulta em uma estrutura de pavimento rodoviário mais esbelta e econômica.

Parente *et al.* (2003) estudou o comportamento mecânico (ensaios triaxiais cíclicos e ISC) de duas misturas misturas de solo e escória, com teores de escória variando entre 50% e 70%, para utilização na pavimentação, demonstrando a empregabilidade da escória como agregado para as camadas de bases e sub-bases, visto que, as misturas solo-escória apresentaram valores superiores de CBR e módulo de resiliência (MR) em relação as misturas comparativas convencionais de solo-brita. As escórias foram submetidas a um processo de cura por um período de três meses para que seu potencial expansivo fosse reduzido aos limites aceitáveis.

Castelo Branco (2004) avaliou o desempenho de misturas asfálticas do tipo CBUQ contendo areia de campo, filer mineral e escória de aciaria elétrica como agregado em diferentes proporções. A escória de aciaria foi caracterizada química e fisicamente por ensaios prescritos pela norma DNER – EM 262/94. As misturas foram dosadas através da metodologia Marshall com a utilização de CAP 50/60, DOPE (melhorador de adesividade) e granulometria na faixa C do DNIT, sendo caracterizadas mecanicamente pelos ensaios de módulo de resiliência, fadiga por compressão diametral, resistência à tração estática por compressão diametral e resistência à tração retida por umidade.

Os resultados obtidos foram comparados com uma mistura contendo agregados convencionais, demonstrando a possibilidade do uso da escória em revestimentos asfálticos. Entretanto, a autora recomenda o aperfeiçoamento da metodologia devido às

dificuldades encontradas na dosagem das misturas relacionadas com as grandes variações nos parâmetros volumétricos, causadas pela heterogeneidade dos grãos da escória. Como alternativa de se obter um rejeito mais homogêneo, recomenda-se a separação das escórias de refino oxidante e redutor, visto que, as mesmas são obtidas em etapas diferentes durante o processo de refino. O condicionamento prévio dos corpos-de-prova resultou em um melhor desempenho mecânico das misturas asfálticas (Castelo Branco, 2004).

Raposo (2005) estudou experimentalmente a compactação e expansão de uma escória de aciaria do tipo LD utilizando amostras tratadas, por molhagem e revolvimento do material, e amostras não tratadas, tendo como objetivo, a sua utilização nas camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. Foram realizados ensaios laboratoriais de caracterização (física, química e ambiental), compactação (Proctor normal e Proctor modificado), expansão pelos métodos PTM-130/78, JIS A 5015/92 e ASTM D 4792/00, além de ensaios complementares como ISC e o ensaio de permeabilidade a carga variável. Os resultados obtidos pelos ensaios de compactação demonstraram que a escória estudada apresenta comportamento típico de materiais granulares e umidade ótima de compactação indefinida.

Oliveira (2006) comparou experimentalmente três métodos laboratoriais de determinação do potencial de expansão de escórias de aciaria para aplicação em pavimentos rodoviários. Neste estudo foram utilizadas escórias do tipo LD e EAF recém produzidas e sem tratamento, observando que as escórias de aciaria do tipo LD apresentaram valores de expansibilidade superiores ao da escória EAF em todos os três métodos utilizados (DMA-1/DER-MG/92, JIS A 5015/92 e ASTM D 4792/00), sendo o método ASTM D 4792/00 o de mais simples execução, porém, o limite de expansão estabelecido por este método inviabiliza o uso da escória do tipo LD sem tratamento prévio para pavimentação.

Freitas (2007) comparou o desempenho mecânico de misturas asfálticas de módulo elevado contendo escória de aciaria LD como agregado com misturas contendo agregado convencional granítico. Utilizaram-se três tipos diferentes de ligantes e a

granulometria adotada (faixa B do DNIT) continha 97% de escória e 3% de cal. As misturas contendo escória apresentaram melhor desempenho em relação ao módulo de resiliência (MR), apresentando também características físicas tão boas quanto à do agregado convencional e competência mecânica satisfatória e adequada para ser utilizada como agregado em misturas asfálticas de módulo elevado.

Mendonça *et al.* (2008) estudou a utilização de escória de aciaria como material para revestimento primário em estradas rurais do município de Santa Maria de Jetibá, no estado do Espírito Santo. Os procedimentos adotados para a avaliação do revestimento primário seguiram as normas DNIT PRO 008/2003 e DNIT PRO 009/2003, apresentando comportamento satisfatório e em perfeitas condições de dirigibilidade após três meses de utilização das estradas.

Gimenes *et al.* (2008) relata que a execução de um trecho rodoviário da ES-446, que liga Colatina a Itaimbé, utilizando uma mistura de escória de aciaria tratada e argila nas camadas de base e sub-base apresentou resultados satisfatórios que comprovam a qualidade da escória como material alternativo de construção rodoviária. Os valores de ISC das camadas executadas com escória foram superiores em comparação aos de materiais convencionais, apesar da ocorrência de trincas longitudinais ocorridas na base devido, provavelmente, a contração da mistura de escória e argila.

Diniz *et al.* (2008) analisou as características mecânicas de concretos fabricados com escória de aciaria para a fabricação de blocos intertravados para a aplicação em pavimentos rodoviários, através de ensaios de resistência à tração por compressão diametral e ensaio de resistência à compressão simples, que mostraram ganhos de resistência à compressão de até 75%, apontando o grande potencial de uso da escória de aciaria como agregado de peças pré-moldadas de concreto.

Silva *et al.* (2008) estudou o comportamento mecânico de uma pista experimental circular contendo escória de aciaria, denominada ACERITA, em diferentes teores (50%, 80% e 100%) nas camadas de base do pavimento. Além da caracterização geotécnica das misturas, as camadas foram instrumentadas com a utilização de extensômetros e

células de carga. A pista utilizou um simulador de tráfego e o desempenho das camadas foi monitorado através de levantamentos de evolução de deformação permanente, da condição do revestimento da pista e de medições de deflexões elásticas. Os resultados obtidos para as misturas de escória apresentaram valores de ISC superiores ou iguais a 140%, expansão média de até 0,50%, deflexões inferiores à admissível e comportamento admissível quanto à deformação permanente.

### 2.3.3 – Patologias estruturais e o fenômeno de expansão da escória

Um dos principais fatores responsáveis pela limitação do uso de escória de aciaria em pavimentação asfáltica e os fenômenos patológicos estruturais do pavimento relacionados a este tipo de agregado, se deve ao fato da escória apresentar características volumétricas expansivas. Existem vários problemas relatados ocorridos com o pavimento utilizando este tipo de escória, principalmente as erupções de trincas (Silveira, 2004).

Dependendo do processo de expansão dos grãos e desenvolvimento das fissuras no revestimento causadas pela expansão da escória associado a outros fatores, as trincas podem se apresentar de variadas formas (Figura 2.4), tais como: fissuras denominadas “vulcãozinhos” (trincas radiais), “quebra-molas” (trincas transversais) ou trincas longitudinais (Gontijo, 2006; Freitas, 2007).

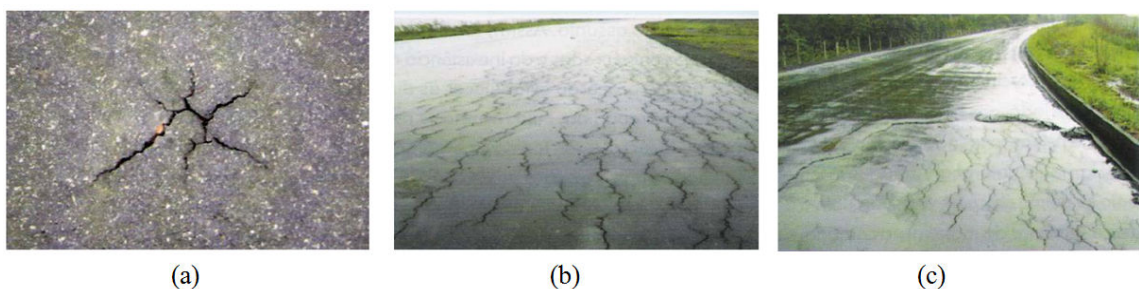


Figura 2.4 – Exemplos de trincas causadas pela expansão das escórias: (a) trinca radial; (b) trincas longitudinais; (c) trincas transversais ou “quebra-molas” (Gontijo, 2006)



Segundo Freitas (2007), a expansão da fração fina da escória impõe um estado de flexão, no sentido de baixo para cima, na camada asfáltica, gerando tração nas fibras superiores e resultando na formação das trincas radiais. A expansão volumétrica longitudinal das escórias está relacionada com a concentração de agregado graúdo ou concentração de material pulverulento, de maneira que a expansão pode ocorrer em sentidos contrários e nos pontos de encontro destes esforços são formados os “quebra-molas”. A expansão transversal da camada de base induz ao revestimento esforços de tração ocasionando rupturas longitudinais no mesmo por falta de elasticidade, tendo como resultado as trincas longitudinais.

Os problemas causados na estrutura do pavimento pela expansão da escória podem ocorrer tanto quando a escória é utilizada como agregado nas camadas de base, sub-base ou no revestimento asfáltico. No último caso, o desgaste sofrido pelo revestimento devido a ação do tráfego, pode levar ao deslocamento da película de ligante que envolve a escória e esta, em contato com a água, desencadeia reações de hidratação que levam a expansão do material (Silva *et al*, 2003; Castelo Branco, 2004).

A instabilidade volumétrica da escória de aciaria ocorre, principalmente, devido as reações de hidratação da cal livre (CaO) e do periclásio (MgO) que são as maiores responsáveis pela expansão, desintegração e enfraquecimento por diferença de volume durante as suas reações. Em menor escala, a expansão também é causada pela corrosão e oxidação do ferro metálico residual e pela transformação alotrópica do C<sub>2</sub>S no resfriamento lento das escórias (Kandahal e Hoffman, 1998).

O CaO contido nas escórias de aciaria se apresenta nas formas livres, combinadas de silicatos ou em solução sólida, sendo o composto na forma livre o responsável pela maior expansão do material a curto prazo. Durante o processo de hidratação da cal livre, ocorre a formação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), conhecido como portlandita (Equação 2.1), causando a expansão destrutiva do material devido ao aumento de volume molar de até 99% em relação ao CaO (Kandahal e Hoffman, 1998; Oliveira, 2006).



Como consequência da hidratação da cal livre, ocorre a carbonatação do  $\text{Ca(OH)}_2$  formando a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), (Equação 2.2), sendo um fenômeno que contribui, em menor escala, para a expansão da escória de aciaria. Essas reações de carbonatação contribuem para a colmatção dos dispositivos dos sistemas de drenagens existentes nas camadas dos pavimentos, devido a precipitação do  $\text{CaCO}_3$ , denominado tufa. A concentração de cal livre, água, dióxido de carbono, temperatura e umidade são os principais fatores controladores da deposição de tufa nos drenos e vasos coletores de rodovias (Rohde, 2002; Castelo Branco, 2004; Sousa, 2007).



Segundo Machado (2000), a escória de aciaria do tipo LD pode conter aproximadamente entre 39 e 50%, em massa, de CaO presente em sua composição, sendo que aproximadamente 7% do total de CaO pode se apresentar na forma livre. Diversas pesquisas realizadas com escória recomendam um teor limite de cal livre presente nas mesmas com valores variando entre 4% e 7%, visando não prejudicar a durabilidade das camadas do pavimento.

A presença do óxido de magnésio na escória de aciaria LD é proveniente do uso de dolomita no forno para proteção do revestimento refratário durante o processo de refino do aço, podendo representar um teor total de 10% na escória. O óxido de magnésio pode se apresentar na forma livre (periclásio), quimicamente combinado (merwinita e monticelita) ou em solução sólida. (Shousun, 1980; Machado, 2000; Oliveira, 2006).

O MgO quimicamente combinado na forma da merwinita e da monticelita, ou em soluções sólidas presente nas escórias, geralmente apresenta um comportamento químico estável. Normalmente, a maior parte das escórias de aciaria apresenta um teor total acima de 3% de óxido de magnésio, ocasionado principalmente pela dissolução incompleta da dolomita durante o processo de refino do aço e resultando na formação do periclásio, que é a espécie química contribuinte no processo de expansão. Uma das

possíveis alternativas e recomendações propostas por alguns pesquisadores para minimizar o problema de expansão do MgO, seria a redução da dimensão dos grãos para obter o menor tamanho possível, o que facilitaria a dissolução e a reação completa desse óxido (Montgomery e Wang, 1991; Machado, 2000; Pena, 2004; Raposo, 2005).

O MgO, quando hidratado, sofre um processo de expansão que leva a formação do hidróxido de magnésio ou brucita ( $\text{Mg(OH)}_2$ ) (Equação 2.3), um composto que pode apresentar variação de volume de até 119,5% em relação ao MgO (Machado, 2000). Segundo Silva *et al.* (2003), a velocidade de hidratação e expansão do MgO ocorre de forma lenta gerando instabilidade volumétrica por um longo período de tempo, sendo um fenômeno dependente do tamanho dos cristais e estes dependentes da velocidade de resfriamento. Assim, o resfriamento lento das escórias, propicia a formação de grandes cristais de periclásio que, ao entrar em contato com a água, hidratam-se lentamente gerando grande expansão. Cristais pequenos tendem a se hidratar mais rapidamente, pois a água leva pouco tempo para agir sobre o cristal.



As escórias de aciaria apresentam um teor de ferro metálico ( $\text{Fe}^0$ ) que varia em torno de 15% a 20% de sua composição. Este componente contribui, em menor escala, para a expansão volumétrica da escória através das reações de oxidação e corrosão. As reações de oxidação formam os compostos wustita ( $\text{FeO}$ ), a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) enquanto que as reações de corrosão originam os produtos denominados de hidróxidos ferroso ( $\text{Fe(OH)}_2$ ) e hidróxidos férrico ( $\text{Fe(OH)}_3$ ). Deve-se destacar que 70% do teor total de ferro contido nas escórias de aciaria do tipo LD se encontram na forma de wustita (Machado, 2000).

#### **2.3.4 – Controle da expansão da escória**

Visando a adequação da escória de aciaria para uso em pavimentação, pesquisas em todo o mundo vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de identificar tratamentos e métodos capazes de promover a redução do potencial expansivo da escória e propiciar

requisitos para que a mesma possa ser utilizada como matéria-prima em camadas do pavimento. Os principais agentes que provocam a estabilização volumétrica da escória são a água e o ar atmosférico, através das reações de hidratação e carbonatação dos óxidos livres de CaO e MgO.

Segundo Silveira *et al.* (2004), o termo escória de aciaria “curada” normalmente se refere à escória que não apresenta risco de expandir ou que apresenta níveis de expansão dentro dos limites estabelecidos pelas normas, pelo fato de ter ficado estocada e/ou exposta a céu aberto por um período mínimo de tempo pré-determinado objetivando sua cura.

Segundo Geyer (2001), o método mais utilizado para minimizar o efeito de expansibilidade consiste na estocagem das escórias em pilhas com alturas de até 2 metros, umidecendo-a com água natural ou aquecida para possibilitar as reações de hidratação dos compostos potencialmente expansivos e instáveis. O período de exposição, envelhecimento e estocagem da escória pode variar de 3 meses a 1 ano, dependendo do teor de cal livre presente. Este procedimento é utilizado em algumas usinas brasileiras.

Para reduzir o tempo de cura e acelerar o processo de estabilização do material, após e resfriamento e britagem, as escórias são submetidas a um vapor de água (tratamento denominado de cura acelerada), visto que, as moléculas de vapor são menores que a de água, conferindo maior poder de penetração e hidratação do rejeito (Geyer, 2001; Oliveira, 2006).

O tratamento das escórias através de vapor saturado sob pressão vem sendo utilizado no Japão. Neste processo totalmente automatizado, denominado “SKAP”, a escória de aciaria LD é colocada dentro de um cilindro de autoclave (Figura 2.5), onde a mesma é submetida a uma atmosfera de vapor de água sob pressão de 0,5 MPa, demandando, apenas 3 horas para executar todo o processo. O efeito sobre a expansibilidade da escória é semelhante ao processo descrito anteriormente. Outra vantagem deste processo é que a escória de aciaria resultante possui maior homogeneidade e menor expansibilidade,

devido a uma maior penetração do vapor na escória (Morishita, *et al.*, 1998; Silveira, *et al.*, 2004).



Figura 2.5 – Autoclave desenvolvido pelo Japão para cura de escória de aciaria com vapor d'água a alta pressão (Silveira, 2004).

A cura acelerada por umectação e aeração da escória de aciaria LD foi desenvolvida pela CST juntamente com uma empresa de consultoria rodoviária como forma de adequar a escória de aciaria ao uso na pavimentação viária. O método consiste em submeter o material ao efeito de umectação conjugada com aeração periódica, onde o tempo de cura se dá em 2 meses, apresentando níveis de expansão abaixo de 3% pelo método PTM 130. A escória curada é denominada ACERITA. Além disso, este método está de acordo com exigências determinadas pelas normas de pavimentação brasileiras e é perfeitamente compatível com o custo de produção e condições do mercado brasileiro (Silveira, 2004).

A Tabela 2.6 apresenta, de forma resumida, exemplos de processos empregados para redução do potencial expansivo das escórias de aciaria com suas respectivas vantagens e desvantagens de uso.

Tabela 2.6 - Processos utilizados para redução de expansão da escória (Silva, 2004)

<b>Tratamento</b>	<b>Descrição</b>	<b>Momento de Atuação</b>	<b>Pontos Positivos</b>	<b>Pontos Negativos</b>
Aumento da dissolução dos fundentes	redução da granulometria da cal/dolomita	Antes da geração	Baixo custo	-
Alteração do agente escorificante	Utilização de um material sintético como fundente	Antes da geração	Aumenta também a atividade hidráulica	Não altera o valor de MgO livre
Adição de sílica e oxigênio	Adição de sílica e oxigênio à escória líquida com uma fonte de calor	Após a geração com a escória líquida	Redução dos teores de CaO e MgO livres	Alto custo
Granulação com água	Resfriamento brusco com água	Após a geração com a escória líquida	Aumenta também a atividade hidráulica	Alteração na granulometria; problemas ambientais
Granulação a seco	Resfriamento brusco a seco	Após a geração com a escória líquida	Aumenta também a atividade hidráulica	Alteração da granulometria
Cura ao tempo ACERITA - caso particular	Exposição ao tempo (ocasionalmente com molhagem)	Após geração com escória sólida	Baixo custo e simplicidade	Demorado; metodologia indefinida; heterogeneidade
Cura a vapor sob pressão atmosférica ( <i>open yard</i> )	injeção de vapor à escória	Após geração com escória sólida	Redução considerável dos teores de CaO e MgO livres	Alto custo, principalmente se não há rede de vapor disponível
Cura a vapor sob alta pressão ( <i>SKAP</i> )	injeção de vapor à escória em autoclave	Após geração com escória sólida	Redução considerável dos teores de CaO e MgO livres	Alto custo

# Capítulo 3

---

---

## MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 – INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a obtenção e caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa, bem como a metodologia empregada e os procedimentos realizados em laboratório para a determinação e avaliação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

A investigação dos materiais e das misturas asfálticas foi dividida em três etapas. Inicialmente, foram caracterizados os materiais utilizados como matéria prima das misturas asfálticas (rejeito de minério de ferro, escória de aciaria LD, pedra britada e ligante asfáltico). Na segunda etapa, realizaram-se ensaios para a determinação do teor de projeto das misturas betuminosas. A terceira etapa consiste na avaliação mecânica das misturas por meio dos ensaios de módulo de resiliência (MR), resistência à tração estática por compressão diametral (RT), fadiga por compressão diametral a tensão controlada e deformação permanente por compressão axial (creep estático).

### 3.2 – AGREGADOS

#### 3.2.1 – Análise granulométrica

A distribuição granulométrica dos agregados graúdos e miúdos utilizados nesta pesquisa foi avaliada de acordo com a metodologia DNER-ME 083/98 com a utilização de um peneirador mecânico convencional.

### 3.2.2 – Abrasão Los Angeles

O ensaio de desgaste ao choque e à abrasão permite avaliar a quebra e a degradação dos agregados graúdos, resultante das ações combinadas do atrito e do impacto. O método adotado segue os procedimentos da norma DNER-ME 035/98 que consiste em submeter determinada quantidade do material, juntamente com uma carga abrasiva (esferas metálicas), a um número especificado de revoluções no interior do tambor da máquina Los Angeles.

### 3.2.3 – Equivalente de areia

Este ensaio determina a proporção relativa de argila ou pó em agregados miúdos, através de uma relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior do agregado sedimentado e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade do material.

O equivalente de areia foi determinado conforme o método DNER-ME 054/97. O ensaio consiste em colocar uma amostra de agregado em uma proveta contendo solução floculante. Posteriormente, o conjunto é agitado horizontalmente por 30 segundos e, após completar a proveta com a solução até um nível predeterminado, deixado em repouso por 20 minutos. Após o período de repouso, é feita a leitura da altura do nível superior da argila em suspensão e da altura do nível superior da areia. O equivalente de areia pode ser calculado através da Equação 3.1:

$$EA = \frac{L_2}{L_1} \times 100 \quad (3.1)$$

onde:

EA = equivalente de areia;

$L_1$  = altura do nível superior da argila em suspensão;

$L_2$  = altura do nível superior da areia.



### **3.2.4 – Forma das partículas**

A determinação do índice de forma das partículas foi realizada seguindo os procedimentos da norma DNER-ME 086/94. O equipamento utilizado no ensaio é composto por um conjunto de crivos circulares e crivos redutores.

### **3.2.5 – Durabilidade**

A avaliação da resistência à desintegração química dos agregados foi realizada através do método de ensaio DNER-ME 089/94. As amostras foram submetidas a cinco ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa. A execução do ensaio e o preparo da solução foram realizados no Laboratório de Ferrovias e Asfalto - LFA da Universidade Federal de Ouro Preto.

### **3.2.6 – Densidade e Absorção**

A densidade e absorção dos agregados graúdos (material retido na peneira de 4,8 mm) foram determinadas segundo a norma DNER-ME 081/98. Foi utilizado o método do DNER-ME 084/95 para determinar a densidade real dos agregados miúdos.

### **3.2.7 – Adesividade**

O método empregado para avaliar a adesividade dos agregados ao ligante asfáltico foi o DNER-ME 078/94. O ensaio consiste na submersão da amostra em água destilada a 40 °C durante um período de 72 horas e verificar visualmente se há ou não o deslocamento da película de ligante. Para esta pesquisa, foi utilizado como ligante o CAP 50/70 fornecido pela REGAP.

Devido à subjetividade do ensaio (avaliação visual pelo executor do ensaio), alguns autores recomendam a metodologia AASHTO T – 283 para determinação das características de adesividade dos agregados através da relação entre as resistências à tração por compressão diametral de amostras submetidas ao processo de saturação e

congelamento com amostras não submetidas ao processo descrito (Castelo Branco, 2004; Bernucci *et al*, 2008). Neste estudo não foi realizado este método.

### **3.2.8 – Treton**

Para complementar os resultados sobre a resistência ao choque dos agregados, os mesmos foram submetidos a um ensaio alternativo ao de abrasão Los Angeles para determinação da perda ao choque no aparelho Treton (Roseno, 2005; Bernucci *et al*, 2008).

O ensaio foi realizado seguindo o método DNER-ME 399/99 (Agregados – determinação da perda ao choque no aparelho Treton) e consiste submeter uma amostra com partículas de dimensões entre 19 e 16 mm a 10 golpes de um martelo cilíndrico padronizado. Posteriormente, o material é passado na peneira de abertura 1,7 mm e a resistência ao choque é determinada pela diferença entre a massa inicial da amostra e a massa retida nesta peneira.

### **3.2.9 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

A análise química qualitativa dos agregados deste estudo foi realizada utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura do tipo JEOL JSM – 5510, do laboratório de Microscopia Eletrônica do DEGEO/UFOP. O ensaio permite a caracterização da morfologia das partículas das amostras, além de auxiliar a identificação química e mineralógica dos materiais.

Para a realização dos ensaios, as amostras são submetidas a um processo denominado metalização, tendo como objetivo torná-las condutoras em presença de carbono. Assim, foram feitas fotomicrografias e utilizados diferentes acessórios, tais como espectômetro por dispersão de energia (EDS), detector de elétrons retroespehados, detector de elétrons absorvidos e detector de elétrons transmitidos (Fernandes, 2005).

### 3.2.10 – Difractometria de Raios-X

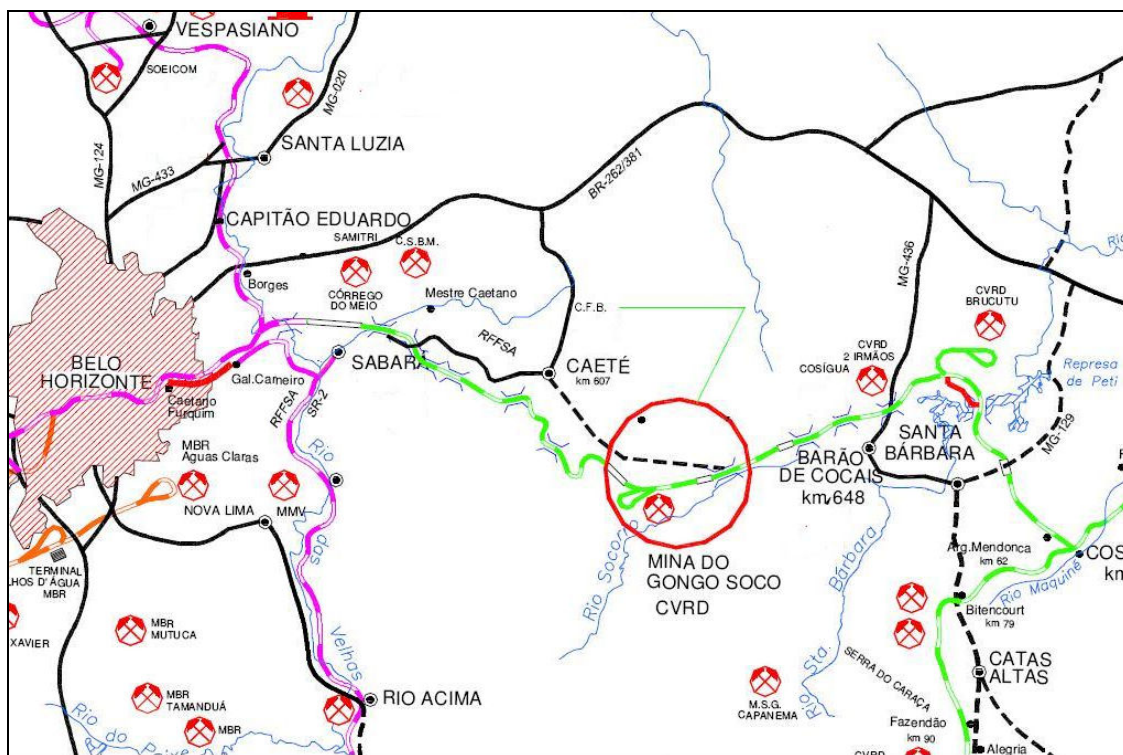
As características mineralógicas dos materiais foram analisadas pelo processo de difração de raios-X. O método permite a identificação dos minerais constituintes da amostra através da determinação das distâncias interplanares das células cristalinas, que são constituídas por planos definidos, diretamente relacionados com o raio atômico de cada um dos átomos e seus tipos de ligação. Os resultados são apresentados na forma de registros difratométricos, onde os picos característicos estão relacionados com a posição, intensidade e forma da estrutura cristalina, permitindo assim, a caracterização da composição mineralógica dos materiais (Sousa, 2007). Os ensaios foram realizados com a utilização de um difratômetro da marca Rigaku, modelo D/MAX-B do Laboratório de Difractometria de Raios-X do DEGEO/UFOP (Figura 3.1).



Figura 3.1 – Equipamento para análise difratométrica dos agregados

### 3.2.11 – Obtenção e caracterização do rejeito de minério de ferro

O rejeito de minério de ferro utilizado nesse estudo é proveniente da mina de Gongo Soco, localizada na cidade de Barão de Cocais/MG que está inserida na região do chamado Quadrilátero Ferrífero (Figura 3.2).



Legenda:



Figura 3.2 – Localização da Mina de Gongo Soco (Fernandes 2005, modificado)

As mostras foram coletadas ao longo da praia da barragem de rejeito da mina de Gongo Soco em diferentes pontos para garantir maior representatividade do resíduo de minério de ferro, totalizando aproximadamente 420 kg de material dispostos em sete sacos de 60 kg.

O rejeito foi transportado e estocado no Laboratório de Ferrovias e Asfalto – LFA da Universidade Federal de Ouro Preto, onde o mesmo foi homogeneizado manualmente. A redução das amostras de campo para o laboratório seguiu os procedimentos da norma DNER-PRO 199/96 (Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório) pelo método de quarteamento em quantidade apropriada para a execução dos ensaios laboratoriais, conforme demonstrado na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Obtenção e homogeneização do resíduo: (a) barragem de rejeito; (b) coleta de amostras de rejeito de minério de ferro; (c) homogeneização do rejeito; (d) redução das amostras de campo por quarteamento.

A princípio, pretendia-se fazer a caracterização granulométrica do rejeito através do método de granulometria à laser, mas devido à impossibilidade de realização deste tipo de análise durante a pesquisa, optou-se pelo método de peneiramento conjunto, por meio dos ensaios de peneiramento mecânico fino e análise granulométrica por sedimentação, seguindo as prescrições do DNER-ME 083/98 e da NBR 7181/84.

A Figura 3.4 mostra a curva granulométrica do rejeito de minério de ferro coletado na mina de Gongo Soco. O rejeito apresenta uma granulometria com predominância de partículas siltosas e argilosas com aproximadamente 77% dos grãos passando na peneira de 0,075 mm de abertura de malha quadrada, permitindo sua classificação como filer para aplicação em misturas betuminosas, uma vez que o material se enquadra dentro da graduação estabelecida pelas

especificações do DNER-EM 367/97 e da ASTM D 242-85, conforme mostrado na Tabela 3.1

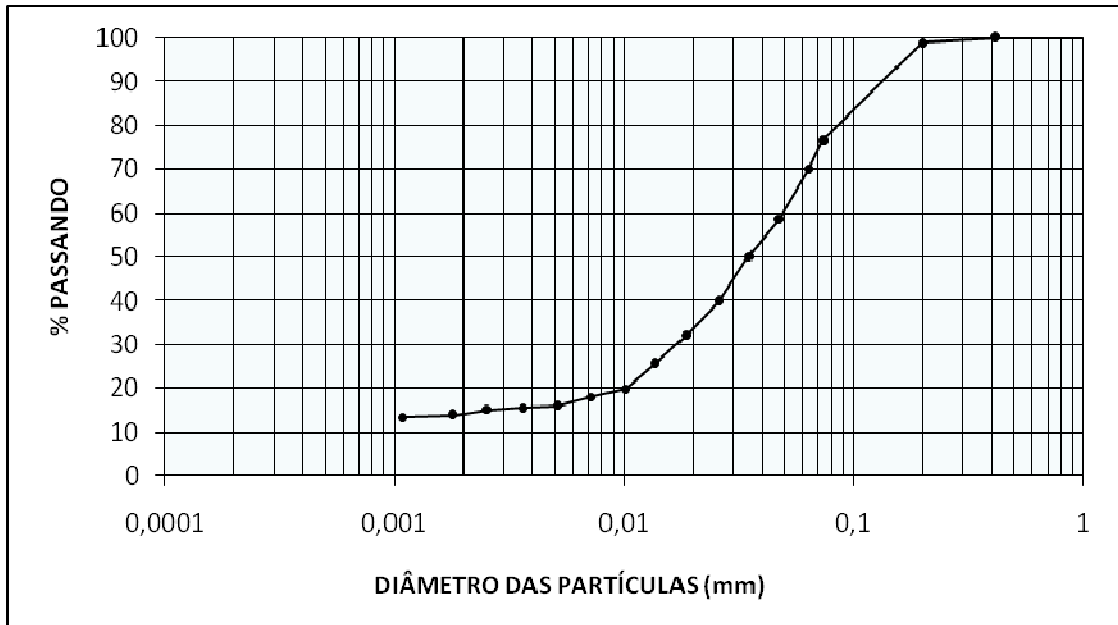


Figura 3.4 – Curva granulométrica do rejeito de minério de ferro

Tabela 3.1 – Especificação para filer quanto à granulometria (Cavalcante e Soares, 2001)

Especificação DNER EM 367/97		Especificação ASTM D 242-85	
Abertura de malha (mm)	% mínima passante	Diâmetro dos grãos (mm)	% mínima passante
0,42	100	0,600	100
0,18	95 - 100	0,300	95 - 100
0,075	65 - 100	0,075	75 - 100

Nesta pesquisa foi utilizado como conceito de filer o material 100% passante na peneira de N° 200 (0,075 mm), cuja definição difere do conceito de filer definido pelo DNER como material que passe no mínimo 65% pela peneira de 0,075 mm (Cavalcante e Soares; 2001). Portanto, para este trabalho a definição de filer alternativo trata-se do rejeito de mineração de ferro e filer convencional do material proveniente do pó de pedra (Figura 3.5).

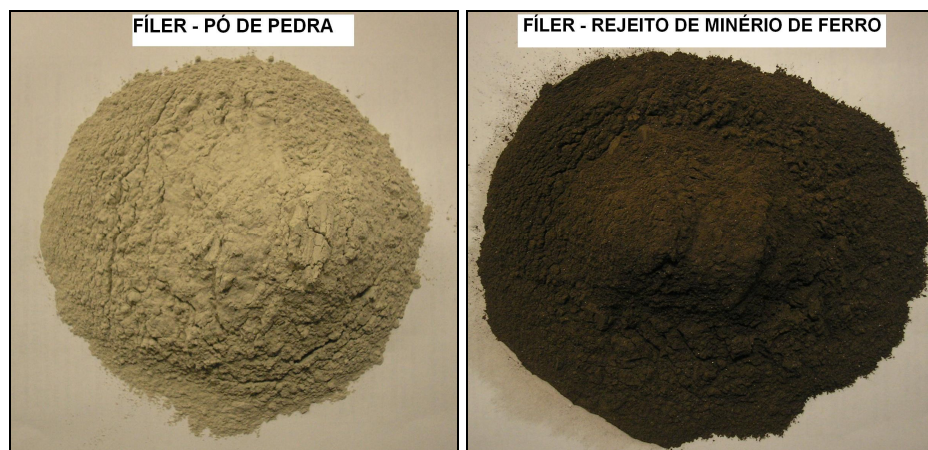


Figura 3.5 – Fíler convencional e alternativo utilizados nas misturas asfálticas

A massa específica real do fíler alternativo foi obtida através do método DNER-ME 085/94 e o resultado encontrado foi de 4,084 g/cm<sup>3</sup>. Como era esperada, a quantidade de amostra necessária para realização do ensaio (60 g) não foi suficiente para que o líquido ficasse entre os limites da faixa superior de graduação do frasco Le Chateleir, devido à massa específica do rejeito ser superior ao dos fíleres normalmente empregados nas misturas asfálticas. O elevado valor da densidade obtido para o rejeito de minério de ferro deve-se principalmente a composição de ferro presente no rejeito, conforme verificado por Fernandes (2005), sendo necessária uma quantidade de aproximadamente 85 g de material para realização do ensaio. A Tabela 3.2 mostra uma comparação dos valores das massas específicas do fíler alternativo utilizado nesta pesquisa com aqueles encontrados na literatura para os fíleres convencionais.

Tabela 3.2 – Valores de massa específica (g/cm<sup>3</sup>) de alguns autores para fíleres

Autor	Tipo de fíler					
	Rejeito de minério de ferro	Pó de Pedra	Cimento Portland	Pó Calcário	Cal Hidratada	Areia de Campo
<b>Mesmo autor</b>	4,084	2,742	-	-	-	-
Cavalcante e Soares (2001)	-	2,647	3,030	2,765	2,536	2,546
Castelo Branco (2004)	-	-	-	-	-	2,604
Vasconcelos (2004)	-	-	-	-	2,780	-

Pelo microscópio de varredura eletrônica é possível observar a heterogeneidade da forma e dimensões dos grãos que compõe a amostra do rejeito, com predomínio de grãos na forma lamelar, placóides e formações em filamentos, conforme mostrado na Figura 3.6. Os diferentes processos de beneficiamento do minério de ferro contribuem para a variedade das características morfológicas do material.

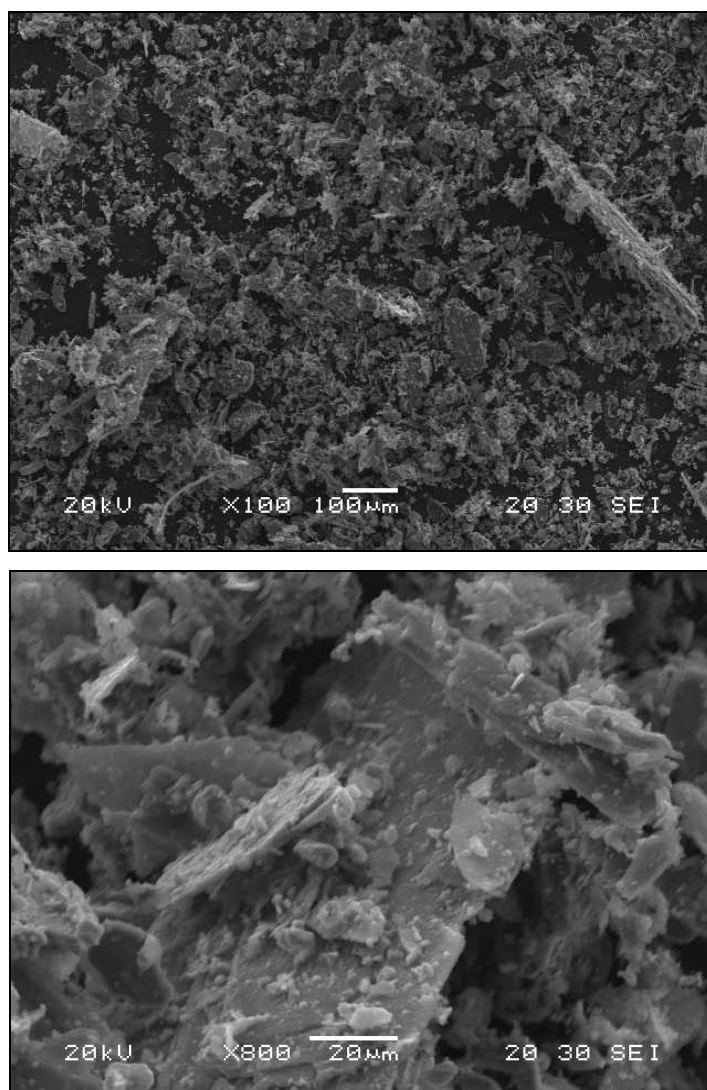


Figura 3.6 – Microscopia eletrônica do resíduo de mineração com ampliações de 100x e 800x

A análise química pontual (Figura 3.7) da amostra do resíduo de mineração é apresentada na Tabela 3.3, com indicativo da presença dos elementos de Fe, Si e Mg em maior frequência na amostra analisada. A composição de ferro está presente em todos os pontos analisados, o que contribui para a elevada densidade do material.



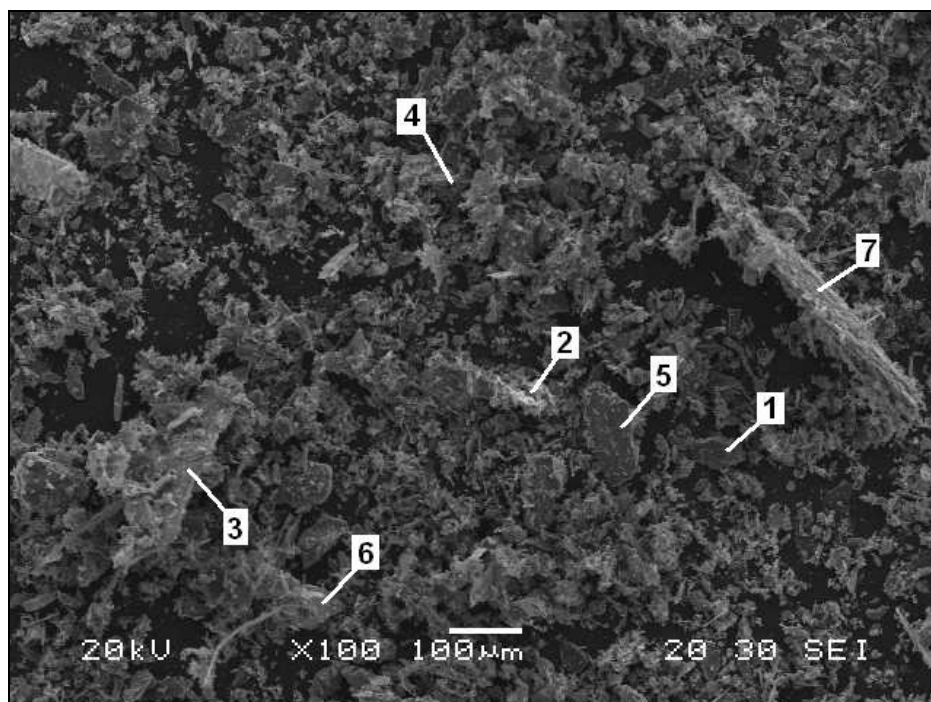


Figura 3.7 – Análise qualitativa do rejeito de minério de ferro

Tabela 3.3 – Análise qualitativa da composição química do rejeito de mineração

AR5	Elemento químico (% em massa)								
	O	Mg	Al	Si	P	Ca	Mn	Fe	Cu
Pt. 1	28.50	10.82	5.76					18.88	36.03
Pt. 2	57.42	3.54	13.00	16.78			1.00	8.26	
Pt. 3	21.33	21.74	2.15	44.10				10.68	
Pt. 4	15.55	8.15		8.93			5.26	62.12	
Pt. 5	36.81	7.15		17.55				38.48	
Pt. 6	34.06	14.89	2.03	18.86	7.16	4.82	4.50	13.68	
Pt. 7	6.33	2.76	0.54	2.62			7.60	80.14	

O difratograma de Raios-X obtido para a amostra de rejeito coletada na barragem da Mina de Gongo Soco revela a presença dos compostos  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (hematita);  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  (caolinita);  $\text{SiO}_2$  (quartzo);  $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$  (actinolita) e  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  (talco). A Figura 3.8 apresenta os registros difratométricos obtidos para o rejeito utilizado como filer.

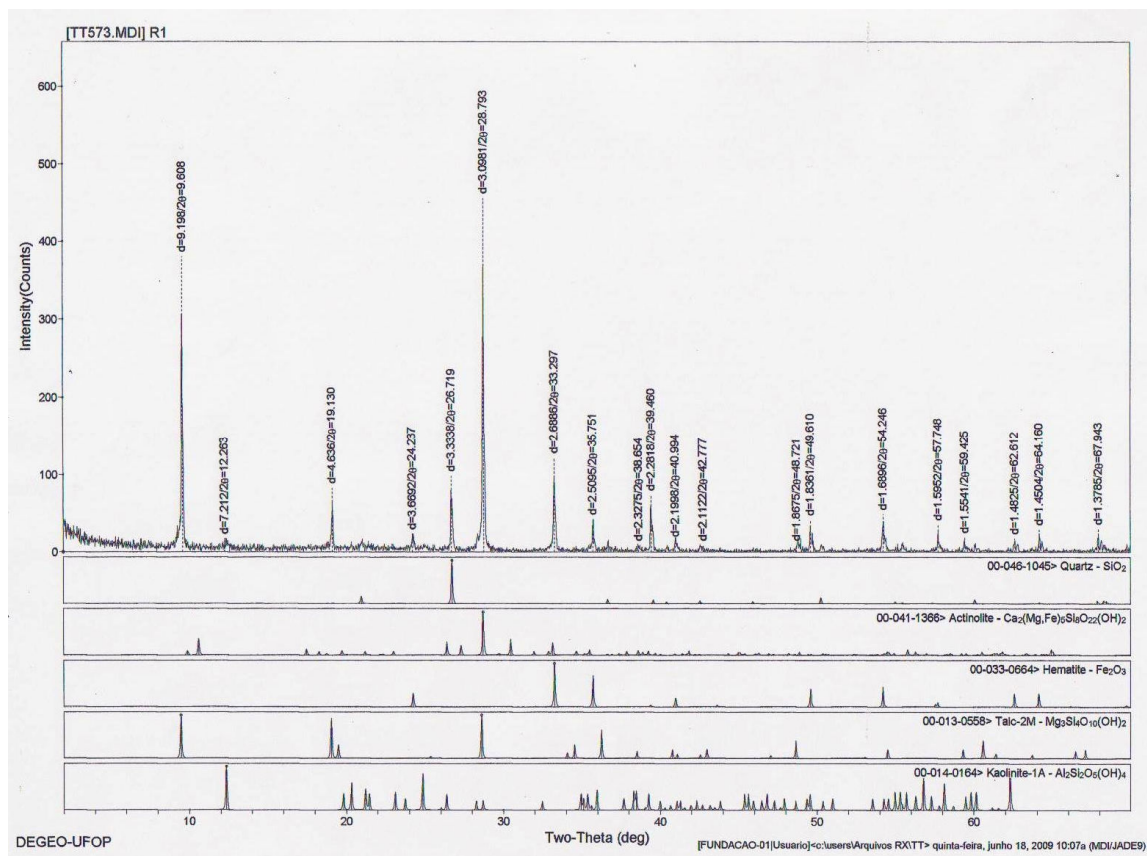


Figura 3.8 – Difratoograma da amostra de rejeito de minério de ferro

### 3.2.12 – Obtenção e caracterização da escória de aciaria

A escória de aciaria do tipo LD utilizada como agregado graúdo e miúdo neste estudo é proveniente da siderúrgica Gerdau Açominas (Figura 3.9), localizada no município de Ouro Branco/MG. As amostras coletadas não seguiram nenhum procedimento específico, recomendou-se apenas que a tomada do material se desse em diferentes pontos e alturas das pilhas para que se pudesse garantir uma melhor representatividade do agregado siderúrgico.

Os resíduos selecionados para a coleta foram aqueles com maior tempo de exposição a céu aberto em condições ambientes de temperatura e umidade, a fim de obter escórias com reduzido potencial expansivo. Foram coletados aproximadamente 450 kg de escória de aciaria classificados pela Gerdau como agregado 1 (material passante na peneira de 19,0 mm) e que já apresentavam um período de cura de 8 meses.



Figura 3.9 – Detalhe do pátio de estocagem de escória da Gerdau Açominas

O material foi acondicionado na área externa do LFA/UFOP e exposto às intempéries por um período de dois meses acompanhado de aspersões de água ao longo do tempo para tratamento do agregado siderúrgico. Posteriormente, a escória foi homogeneizada e a redução de amostra de campo para o laboratório seguiu o procedimento DNER-PRO 199/96 com a utilização de um separador mecânico, conforme mostrado na Figura 3.10.



Figura 3.10 – Homogeneização e redução da amostra de campo de escória para o laboratório

A curva granulométrica da escória de aciaria LD foi obtida conforme os procedimentos DNER-ME 083/98 e o resultado é apresentado na Figura 3.11.

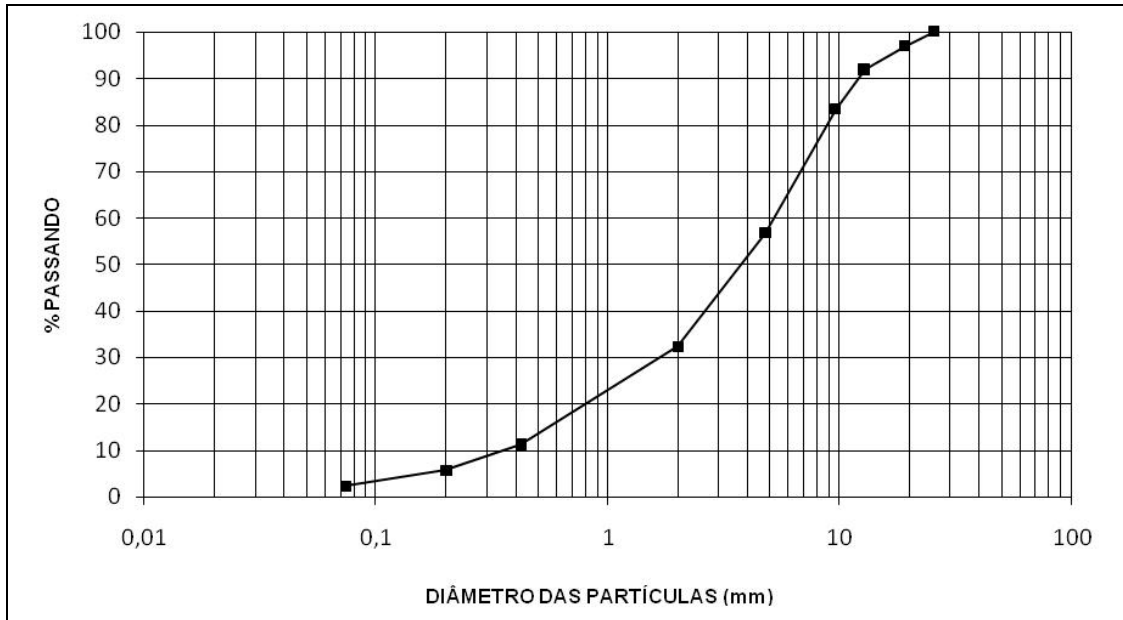


Figura 3.11 – Curva granulométrica da escória de aciaria LD

O índice de forma das partículas foi determinado segundo a graduação D, sendo a que melhor representa a graduação da escória utilizada neste estudo. O valor encontrado foi de 0,74, superior ao limite de 0,5 estabelecido pelo DNIT.

Os valores de abrasão Los Angeles da escória foram obtidos como sendo a média aritmética de três ensaios, para cada graduação, sendo utilizados aproximadamente 5000 g de material em cada ensaio. O material apresentou resultados abaixo do limite de 25% especificado pelo DNER-EM 262 /94, conforme apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Valores de abrasão Los Angeles da escória de aciaria (DNER-ME 035 /98)

Graduação da Amostra	Número de Esferas	Número de rotações	Abrasão Los Angeles (%)
C	8	500	15,8
D	6	500	19,1

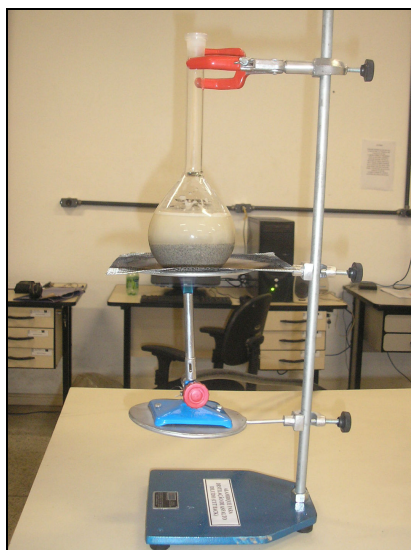
O resultado da perda ao choque pelo aparelho Treton foi de 14,17%, o que confere a escória elevada resistência ao choque e abaixo do limite de 60% recomendado pelo IPR (1998).

A durabilidade da escória foi considerada satisfatória, visto que, após a realização dos ensaios, a perda média de massa foi de 4,79%, abaixo do limite máximo de 5% estabelecido pelo DNIT. Uma análise conjunta dos resultados de abrasão Los Angeles, perda no aparelho Treton e sanidade permite concluir que a escória pode ser considerada um agregado resistente e adequado aos serviços de pavimentação rodoviária em relação a estes três ensaios.

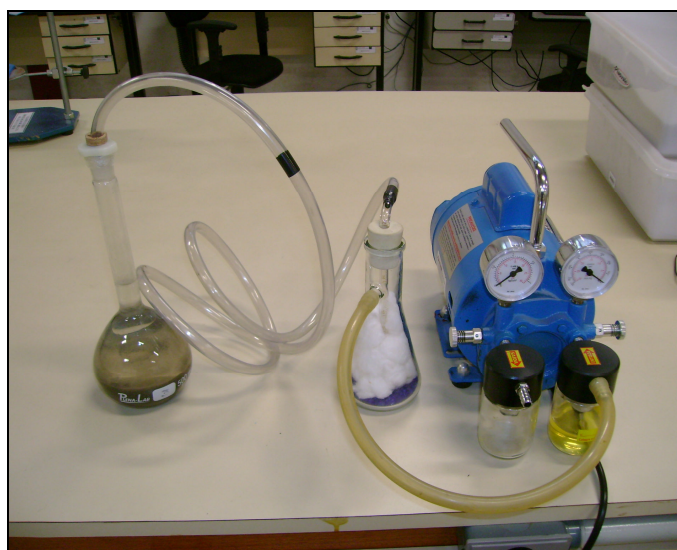
O equivalente de areia (EA) encontrado foi de 90,2% para o agregado miúdo, o resultado comprova a pequena presença de frações argilosas na escória.

Os resultados do ensaio de densidade aparente e densidade real da escória de aciaria LD encontrados foram de 3,33 e 3,59 respectivamente. O valor encontrado para a absorção da escória de aciaria deste estudo foi de 2,17%, sendo superior ao limite de 2% recomendado pelo DNER-EM 262 /94.

A densidade real da escória de aciaria miúda foi determinada seguindo procedimentos do método DNER-ME 084/95 e o resultado sendo a média de três determinações. Para fins de comparação, a etapa de fervura dos picnômetros foi complementada com a aplicação de -73,3 kPa de pressão, durante 15 minutos, através de uma bomba de vácuo (Figura 3.12), visando tornar mais eficiente o processo de extração das bolhas de ar da amostra (Vasconcelos e Soares, 2003; Castelo Branco, 2004). Durante todo o processo de aplicação de vácuo foi realizado a agitação manual do picnômetro. A princípio pretendia-se aplicar uma pressão de -88 kPa, mas o equipamento de vácuo disponível tinha potência limitada para aplicação de pressão dessa magnitude. Os resultados encontrados estão indicados na Tabela 3.5.



(a)



(b)

Figura 3.12 – Processo de expulsão das bolhas de ar: (a) procedimento de fervura; (b) adaptação para aplicação de vácuo.

Tabela 3.5 – Valores de densidades reais da escória de aciaria miúda

Método	Densidades			Média
Convencional (fervura)	3,59	3,60	3,61	3,60
Adaptado (fervura e vácuo)	3,60	3,63	3,62	3,61

Os valores observados sugerem que o processo de aplicação de vácuo tornou o processo de remoção do ar contido na água mais eficiente, onde o valor da densidade real da escória miúda passou de 3,60 para 3,61, apresentando uma diferença de 0,33%. Acredita-se que a aplicação de vácuo utilizada nesta pesquisa não foi suficiente, de modo que, uma bomba de maior potência poderia proporcionar uma maior variação nos valores de densidade, pelo fato de os grãos de escória apresentarem elevada porosidade. Além disso, a agitação mecânica do picnômetro pelo método adaptado seria mais apropriada.

A massa específica determinada para a escória de aciaria foi superior aos valores encontrados para o gnaisse, basalto e granito, agregados comumente utilizados em pavimentação rodoviária. Esse elevado valor de massa específica é devido à composição metálica do agregado siderúrgico.

A adesividade da escória de aciaria foi considerada satisfatória, pois não foi verificado deslocamento da película de asfalto durante a realização dos ensaios.

O potencial expansivo da escória foi analisado por meio do ensaio de expansão segundo o método PTM-130/78, desenvolvida por J.J. Emery na MacMaster University no Canadá, sendo adotado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG) que posteriormente fez uma adaptação na metodologia originando o ensaio DMA-1/DER-MG/92. As etapas do ensaio de expansão consistem na compactação do material em moldes cilíndricos com intensidade de energia do Proctor normal e posterior instalação da aparelhagem necessária para se fazer a leitura e acompanhar a expansão vertical sofrida pela amostra. Em seguida, o corpo-de-prova é imerso em um banho-maria com temperatura a  $71 \pm 3^\circ\text{C}$ . As leituras são realizadas diariamente durante os sete primeiros dias com o corpo-de-prova imerso, posteriormente, faz-se a realização de leituras por mais sete dias com as amostras dentro de uma estufa na condição de “saturação” (não-submersa). A condição saturada é obtida com a adição de no mínimo 500 ml de água no topo do corpo-de-prova duas horas antes da realização da leitura da expansão.

A média dos resultados obtidos pelo método de ensaio DMA-1/DER-MG/92 para as seis determinações realizadas para a amostra da escória de aciaria LD resultou em valor de expansão acumulada de 4,47%, superior ao limite de 3% estabelecido pela norma DNER-EM 262/94 para os 14 dias de ensaio. Uma readequação do processo de estocagem do resíduo através do controle de umectação e idade das pilhas de escória e da cura deste material seria recomendada, uma vez que, os dez meses de cura a céu aberto não foram suficientes para a estabilidade volumétrica do agregado siderúrgico. Na França, é recomendado um período mínimo de 1 ano de tratamento a céu aberto da escória para sua utilização como agregado nas camadas de pavimentos rodoviários (Raposo, 2005).

Pesquisas comprovaram que somente a exposição e armazenamento da escória a céu aberto sem o processo de molhagem (tratamento conhecido como weathering) não garantem a redução do potencial expansivo da escória. Além da molhagem, estocagem

em pilhas de até 2,0 metros de altura, aeração e mistura por meio de revolvimento da escória em períodos pré-determinados alcançam melhores resultados em termos de estabilização volumétrica (Geyer, 2001; Raposo, 2005).

Para a verificação do potencial de contaminação do meio ambiente, procedeu-se a caracterização ambiental da escória de aciaria referentes aos ensaios de lixiviação e solubilização quanto à toxicidade, segundo a NBR 10004/2004 (Classificação de Resíduos Sólidos). A periculosidade do agregado siderúrgico foi determinada através da análise química dos extratos resultantes dos ensaios e posteriormente comparados com a concentração máxima dos poluentes estabelecida pela mesma norma. Devido à impossibilidade de execução dos ensaios pelo autor, os resultados das análises foram obtidos pela Gerdau Açominas, através de ensaios realizados com amostras de escória não-tratada (resíduo sem processo de cura) no ano de 2006.

Os ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados conforme os procedimentos das normas NBR 10005/2004 e NBR 10006/2004 respectivamente. As concentrações médias de não-metals e metais resultantes da análise do extrato lixiviado são apresentadas na Tabela 3.6 e os resultados dos ensaios de solubilização para os compostos inorgânicos são indicados na Tabela 3.7.

Tabela 3.6 – Análise química do extrato lixiviado das amostras de escória de aciaria

Parâmetros	Concentração Média (mg/L)	Desvio Padrão	Limite Máximo Permitido (mg/L)
Arsênio	0,00526	0,00098	1,0
Bário	0,4	0,07	70,0
Cádmio	0,00149	0,00026	0,50
Chumbo	0,00222	0,00033	1,0
Cromo	0,0114	0,0025	5,0
Mercúrio	0,00165	0,00054	0,10
Prata	0,00204	0,00013	5,0
Selênio	0,00071	0,00004	1,0
Fluoreto	1,49	0,02	150



Tabela 3.7 – Análise química do extrato solubilizado das amostras de escória de aciaria

Parâmetros	Concentração Média (mg/L)	Desvio Padrão	Limite Máximo Permitido (mg/L)
Arsênio	Não Detectado	-	0,010
Bário	0,486	0,026	0,70
Cádmio	0,0002	0,00007	0,0050
Chumbo	0,0016	0,0003	0,010
Cromo	0,0034	0,0023	0,050
Mercúrio	0,00085	0,00009	0,0010
Prata	0,00134	0,00051	0,050
Alumínio	0,0235	0,0104	0,20
Zinco	0,0036	0,0017	5,0
Ferro	0,058	0,017	0,30
Manganês	0,014	0,002	0,10
Sódio	7,23	0,44	200,0
Cobre	0,0138	0,0111	2,0
Selênio	0,00036	0,00007	0,010
Sulfato	8,23	0,37	250,0
Cloreto	42,03	2,78	250,0
Fluoreto	0,67	0,03	1,50

Observa-se que os valores médios dos parâmetros analisados no extrato lixiviado e no extrato solubilizado das amostras de escória de aciaria são inferiores aos limites máximos prescritos pela NBR 10004/2004, sendo caracterizado como resíduo não perigoso e classificado como material inerte (Classe IIB), isto é, não apresenta riscos à saúde pública ou efeitos nocivos ao meio ambiente.

Por meio do processo de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram avaliados, de forma ampliada, aspectos relacionados à morfologia e composição mineralógica na superfície dos grãos de escória. As Figuras 3.13 e 3.14 ilustram as características morfológicas dos minerais presentes na superfície de dois fragmentos de escória de aciaria (material retido na peneira de Nº 4) denominadas EA1 e EA2, respectivamente.

A observação visual revela que as amostras de escória apresentam aspecto textural superficial áspero e bastante irregular, compostos de cristais com granulação grossa,

destacando-se a presença de partículas com forma angulosa e bordas agudas para a amostra EA1 e grãos de formas e dimensões variadas para a amostra EA2.

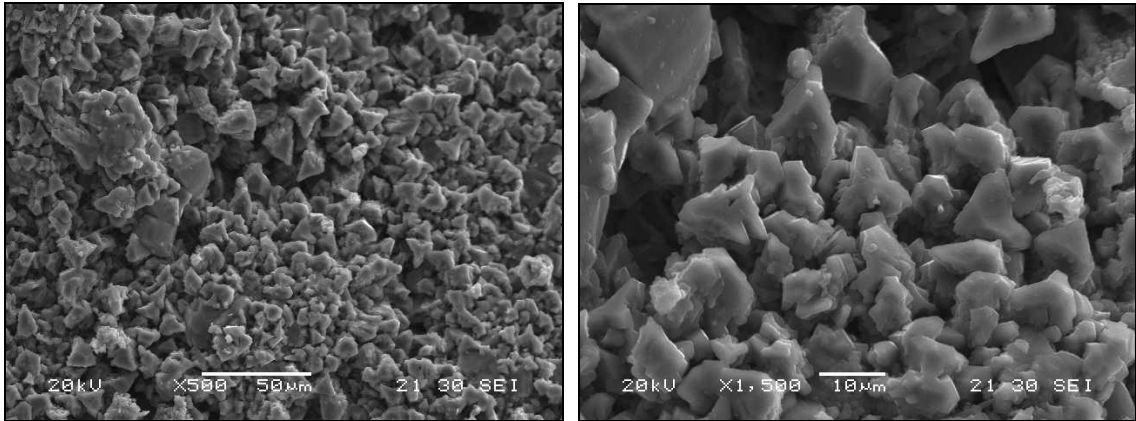


Figura 3.13 – Fotomicrografias dos grãos de escória EA1 com ampliações de 500x e 1500x

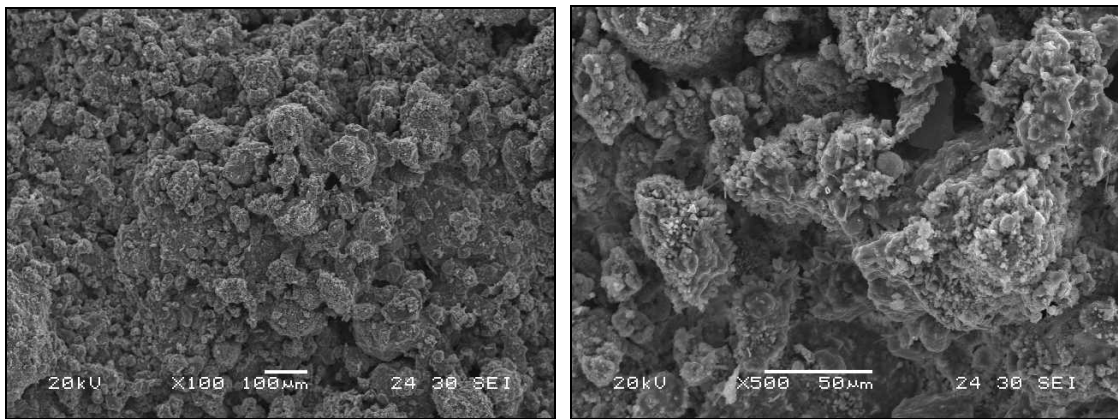


Figura 3.14 – Fotomicrografias dos grãos de escória EA2 com ampliações de 100x e 500x

Para a análise química qualitativa, foram selecionados pontos específicos em cada região da amostra (destacados na Figura 3.15) e a composição dos elementos químicos encontrados estão dispostos na Tabela 3.8. Os resultados são referentes apenas aos ensaios realizados com a amostra EA2, pois na mesma foram detectados maior variedade de elementos químicos em relação à amostra EA1. A composição química determinada no ponto 4 (Tabela 3.8) pode ser um indício da presença de óxido de cálcio livre nas amostras de escória, o que contribuiria para a instabilidade volumétrica do material.

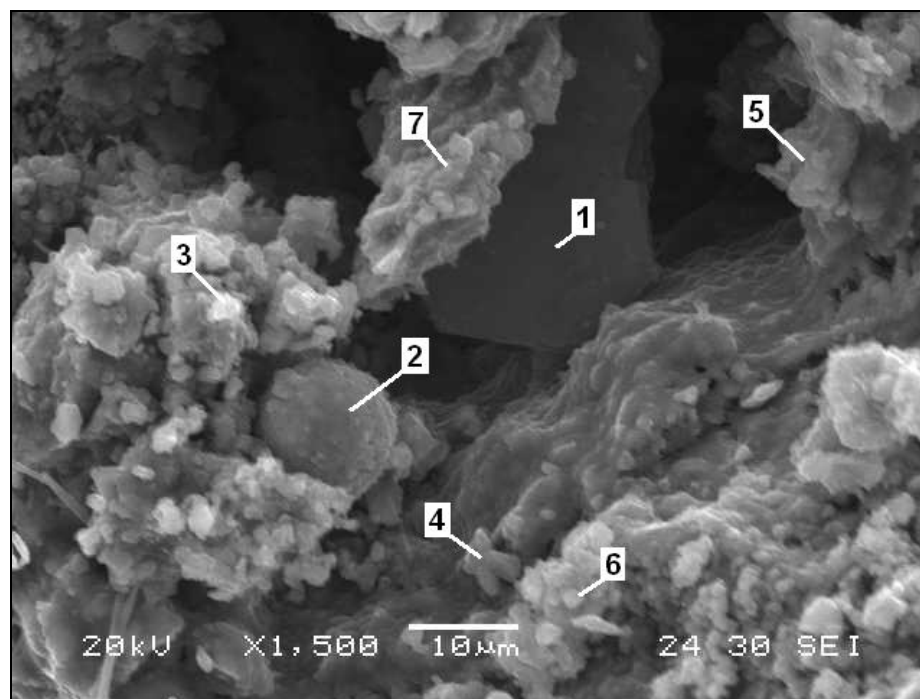


Figura 3.15 – Seleção pontual para análise química qualitativa da amostra EA2

Tabela 3.8 – Análise qualitativa das espécies químicas presentes na amostra EA2

EA2	Elemento químico (% em massa)								
	O	F	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe	Te
Pt. 1	36,71		9,30		0,94	53,05			
Pt. 2	14,10	0,89	1,04	2,03		6,44		75,49	
Pt. 3	32,76			3,51		50,52	2,07	9,88	1,25
Pt. 4	21,52					78,48			
Pt. 5	27,86					66,95		5,20	
Pt. 6	36,89		0,44	1,54		55,40		5,73	
Pt. 7	33,99			3,26		38,84	2,67	21,24	

A Figura 3.16 apresenta a análise difratométrica da escória de aciaria utilizada como agregado nas misturas asfálticas. Os resultados obtidos a partir da comparação com padrões de difração conhecidos evidenciam os seguintes constituintes minerais:  $\text{CaCO}_3$  (calcita);  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  (caolinita);  $\text{CaCO}_3$  (vaterita, mesmo composto do carbonato de cálcio, mas com estrutura cristalina diferente);  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (Gibsitita);  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ;  $\text{SiO}_2$  (quartzo) e  $(\text{K},\text{Na})(\text{Mg},\text{Fe},\text{Ti})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH},\text{O})_2$  (Biotita).

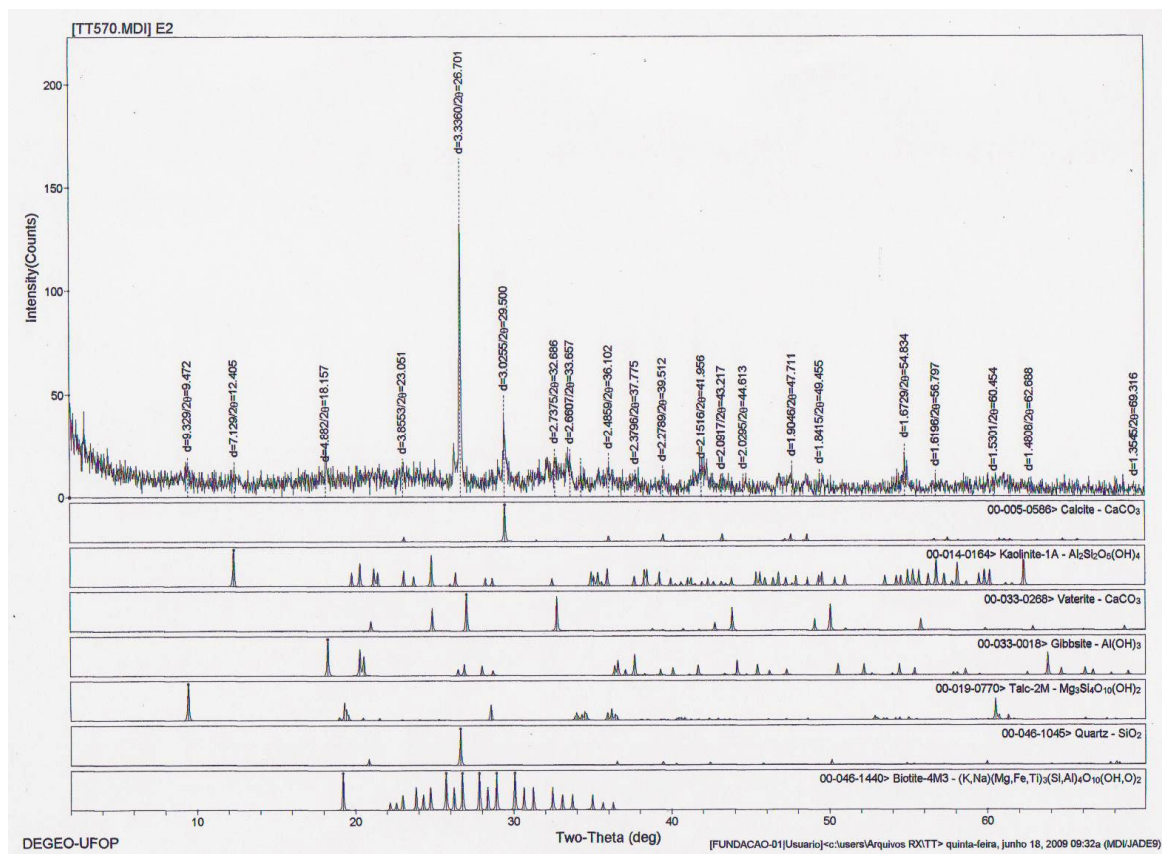


Figura 3.16 – Difratoograma da amostra de escória de aciaria

### 3.2.13 – Obtenção e caracterização da brita graduada

Nesta pesquisa, foi utilizado pedra britada (brita 1, brita 0 e pó de pedra) como agregado convencional, por ser este material usualmente empregado em revestimentos asfálticos da região do Quadrilátero Ferrífero.

O agregado foi obtido na Pedreira Irmãos Machado, localizada no distrito de Amarantina - Ouro Preto. A jazida da pedreira situa-se no Complexo Metamórfico Bação (CMB) e é composta por rocha gnáissica de coloração predominantemente cinza esbranquiçada (Campos, 2006). As amostras foram obtidas de vários pontos das pilhas de estocagem de acordo com a metodologia DNER-PRO 120/97.

As curvas granulométricas correspondentes dos agregados brita 1, brita 0 e pó de pedra são mostradas na Figura 3.17.

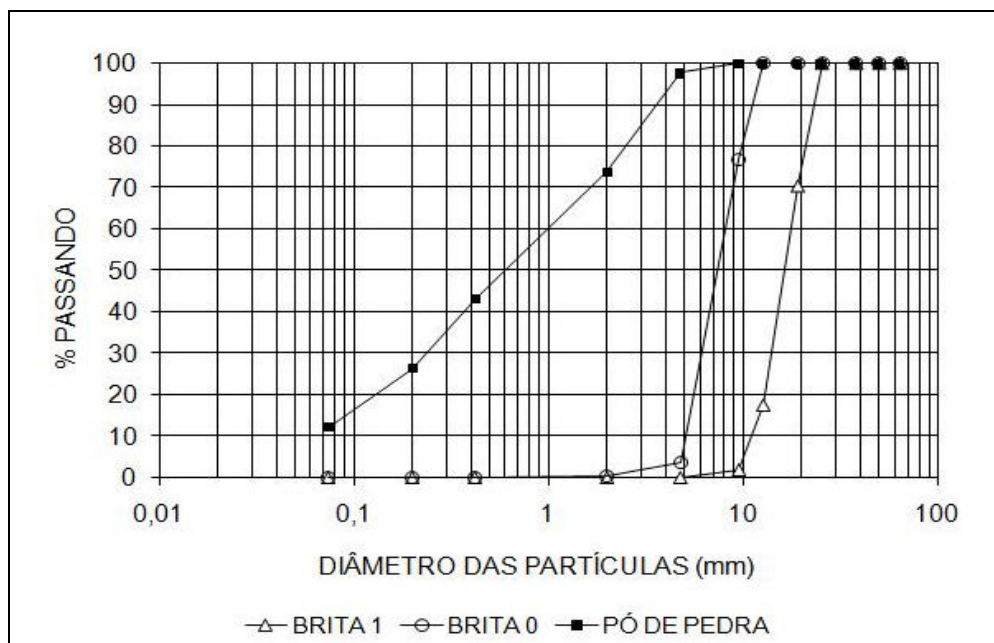


Figura 3.17 – Granulometria da brita graduada convencional

Estão dispostos na Tabela 3.9 os resultados dos ensaios de caracterização realizados com o agregado convencional no Laboratório de Ferrovias e Asfalto da UFOP.

Tabela 3.9 – Resultado dos ensaios de caracterização do agregado convencional

Parâmetros	Resultados
Equivalente de areia (%)	75,6
Absorção (%) - Agregado Graúdo	0,4
Densidade aparente - Agregado graúdo	2,66
Densidade real - Agregado graúdo	2,68
Densidade real - Agregado miúdo	2,69
Massa específica - filer	2,742
Treton (%)	18,82
Durabilidade (%)	4,48 (Brita 0)
	2,37 (Brita 1)
Adesividade	Satisfatória
	Graduação
	B C D
Abrasão Los Angeles (%)	30,9 31,6 40,7
Índice de forma	0,83 0,80 0,73

O filer de referência ou comparativo, denominado neste estudo como filer mineral, foi obtido através do peneiramento do pó de pedra, que possui em sua composição aproximadamente 12% de material passante na peneira de N° 200 (0,075 mm de abertura). A seleção deste tipo de filer para composição das misturas estudadas foi adotada por se tratar de um material de enchimento comumente utilizado na execução de pavimentos rodoviários da região.

Através dos resultados de equivalente de areia (75,6%), percebe-se que a brita graduada possui em sua composição maior quantidade de fração argilosa ou material fino em relação à escória de aciaria, mas ainda sim com valor acima do limite mínimo de 55% estabelecido pelo DNIT.

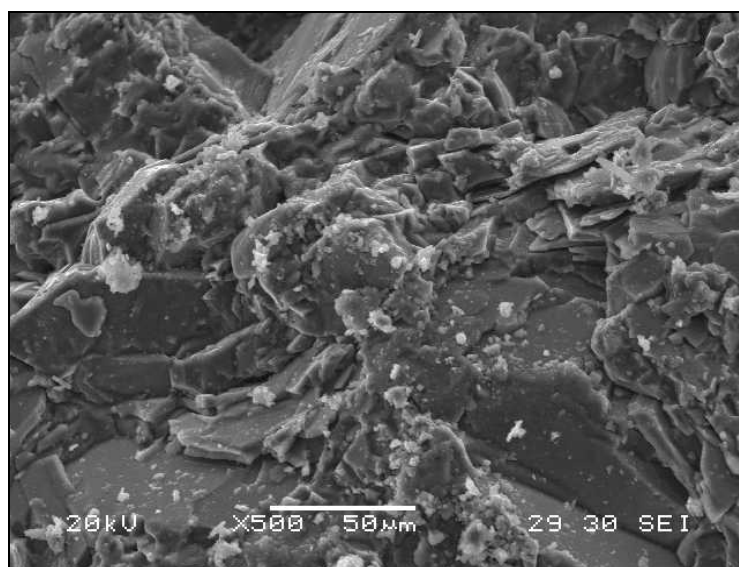
A baixa absorção de água do agregado britado, no valor de 0,40%, indica se tratar de um material de baixa porosidade se comparado a escória de aciaria.

A brita graduada apresentou menor resistência ao choque (18,82%) e resultados de perdas por abrasão Los Angeles praticamente duas vezes superiores aos resultados obtidos para a escória de aciaria LD. Essa maior resistência se deve a existência de compostos metálicos presentes nos grãos de escória.

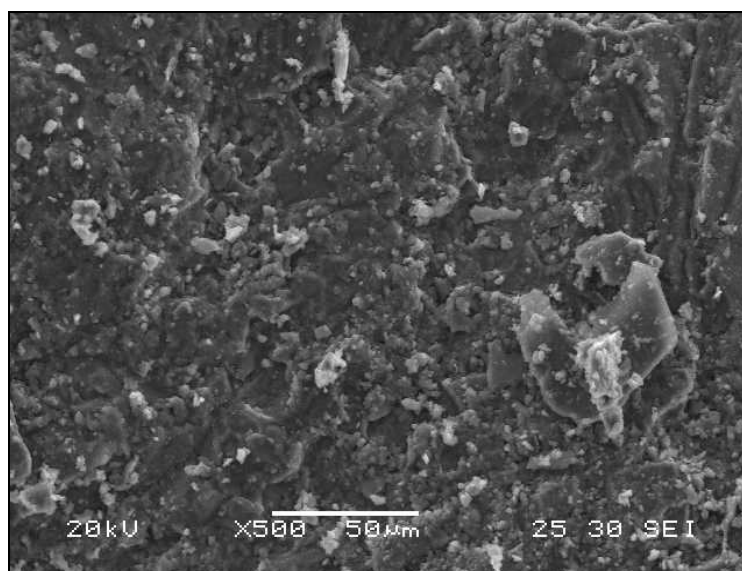
A brita graduada apresentou resultados de durabilidade de 2,37%, indicando possuir maior resistência ao ataque químico se comparado a escória de aciaria.

O ensaio para determinação da densidade real do agregado miúdo foi realizado através do método convencional (remoção das bolhas de ar por fervura) e pelo método adaptado (remoção das bolhas de ar por fervura e aplicação de vácuo). Os resultados encontrados foram praticamente os mesmos, o que demonstra irrelevância na adaptação do ensaio para este tipo de agregado estudado, onde as variações encontradas nos valores de densidades foram praticamente na terceira casa decimal. Uma das hipóteses para explicar os mesmos resultados de densidade encontrados através dois métodos seria pelo fato do agregado pétreo possuir baixa porosidade em relação à escória, tornando o processo de fervura suficiente para a remoção das bolhas de ar dos grãos.

A identificação da morfologia para duas amostras de brita graduada (material retido na peneira de 0,42 mm) é apresentada na Figura 3.18 e a composição química qualitativa do material (Figura 3.19) está disposta na Tabela 3.10. Fica evidente pela análise visual que o gnaiss britado possui uma estrutura cristalina compacta, com menor frequência de ocorrência de poros em relação à escória de aciaria LD.



(a)



(b)

Figura 3.18 – Fotomicrografias dos grãos de gnaiss com ampliações de 500x: (a) grão retido na peneira de 4,76 mm; (b) grão retido na peneira de 0,42 mm

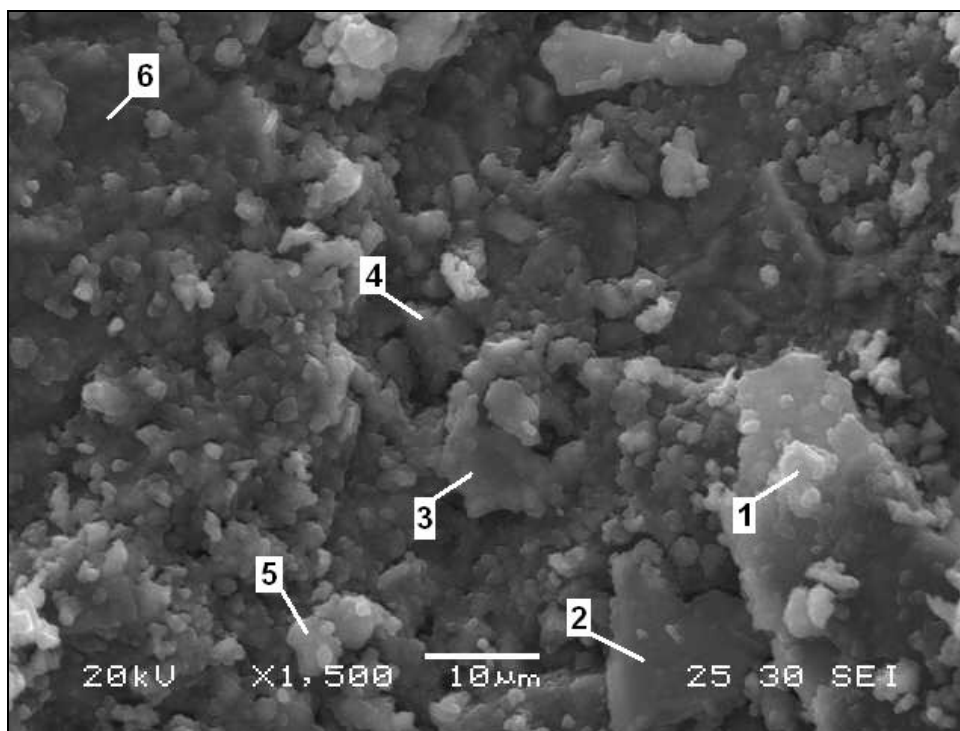


Figura 3.19 – Morfologia da amostra de gnaisse britado na escala de 10 μm

Tabela 3.10 – Análise química qualitativa da amostra de pedra britada

Pedra Britada	Elemento químico (% em massa)								
	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
Pt. 1	48,05	1,26		11,00	24,37	2,63	6,61	3,66	2,41
Pt. 2			1,59	10,75	16,45	6,37	12,82		52,02
Pt. 3	24,38	0,81		20,60	33,04	8,36	9,09		3,72
Pt. 4	38,85		1,66	5,33	23,96	2,58	10,57	10,69	6,36
Pt. 5	40,50	1,08		6,07	48,65	0,66	3,04		
Pt. 6	19,74			18,46	29,40		24,17		8,23

Observa-se na Tabela 3.10 a maior ocorrência dos elementos cálcio, sílica e alumínio presentes na amostra do agregado gnáissico.

### 3.3 – LIGANTE ASFÁLTICO

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi o CAP 50/70, proveniente da Refinaria Gabriel Passos (REGAP), localizada em Betim/MG. A Tabela 3.11 apresenta as especificações do CAP fornecido pelo laboratório da refinaria. A escolha da utilização



deste tipo de ligante betuminoso nesta pesquisa se deve ao fato de o mesmo ser comumente usado nos revestimentos asfálticos executados na região do Quadrilátero Ferrífero.

Tabela 3.11 – Especificações e caracterização do CAP 50/70 (REGAP/Petrobrás)

Característica	Método	Especificação	Resultado
Penetração	D 5	50 a 70	5,3 mm
Ponto de Amolecimento	D 36	46 mín.	48,5 °C
Ductilidade a 25 °C	D 113	60 mín.	> 150 cm
Viscosidade Brookfield - 135 °C (20RPM)	D 4402	274 mín.	334 cp
Viscosidade Brookfield - 150 °C	D 4402	112 mín.	170 cp
Viscosidade Brookfield - 177 °C	D 4402	57 a 285	64 cp
RTFOT Penetração Retida	D5	55 mín.	74%
RTFOT - Aumento do ponto de amolec.	D 36	8 máx.	3,4 °C
RTFOT - Ductilidade a 25 °C	D 113	20 mín.	> 150 cm
RTFOT - Variação em % massa	D 2872	0,5 máx.	-0,04%
Solubilidade no tricloroetileno	D 2042	99,5 mín.	99,9% massa
Ponto de Fulgor	D 92	235 mín.	250 °C
Índice de Suscetibilidade Térmica	X 018	-0,5 a 1,7	-1,4
Aquecimento a 177 °C	X 215	não espuma	não espuma

Também foram realizados alguns ensaios de caracterização do ligante betuminoso no Laboratório de Ferrovias e Asfalto (LFA) da Universidade Federal de Ouro Preto e os valores medidos estão apresentados na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Resultado dos ensaios de caracterização do CAP 50/70

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	ME 003/99	50 a 70	51	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	NBR 6560/85	40 mín.	48	°C
Ductilidade a 25 °C	ME 163/98	60 mín.	> 150	cm
Densidade a 25 °C	ME 193/94	-	1,002	-

Os resultados dos ensaios de viscosidade realizados com amostras do CAP 50/70 utilizado nesta pesquisa foram feitos pelo laboratório da REGAP e estão dispostos na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 – Resultado dos ensaios de viscosidade do CAP 50/70

Característica	Método	Resultado	Unidade
Viscosidade Brookfield a 135 °C (20RPM)	D 4402	327	cp
Viscosidade Brookfield a 150 °C	D 4402	166	cp
Viscosidade Brookfield a 177 °C	D 4402	66	cp
Viscosidade Rotativa a 60 °C	D 4402	178000	cp

### 3.4 – DOSAGEM DAS MISTURAS

A modelagem dos corpos-de-prova foi realizada seguindo a metodologia de dosagem Marshall, conforme a especificação DNER-ME 043/95, por ser este o procedimento mais utilizado nos órgãos rodoviários brasileiros para a determinação do teor de ligante.

Para este trabalho, foi aplicado um esforço de 50 golpes (simular um tráfego médio com pressão de pneu até 7 kgf/cm<sup>2</sup>) por face do corpo-de-prova para a compactação dos mesmos por meio de um compactador Marshall automático. Apesar da norma brasileira DNER-ME 043/95 e a norma ASTM D 5581/89 não especificar nenhuma recomendação com relação à frequência de aplicação dos golpes, a compactação automática evita possíveis interferências nas propriedades volumétricas originadas pelo ritmo de aplicações de golpes manuais (Bernucci *et al*, 2008).

A partir da curva de viscosidade-temperatura (Figura 3.20) foram determinadas as temperaturas de mistura e compactação dos materiais. Para a realização das misturas, a temperatura do ligante asfáltico foi entre 147 °C a 153 °C e a compactação com temperaturas entre 135 °C e 141 °C.

Com o objetivo de melhorar a interação ligante-agregado e simular o efeito do envelhecimento a curto prazo do ligante asfáltico (fenômeno de alteração das suas

propriedades físico-químicas) e que ocorre durante as etapas de usinagem, espalhamento na pista e compactação, as misturas foram condicionadas durante 2 horas dentro de uma estufa na temperatura de 139 °C antes de serem compactadas, procedimento este adotado pela metodologia SUPERPAVE.

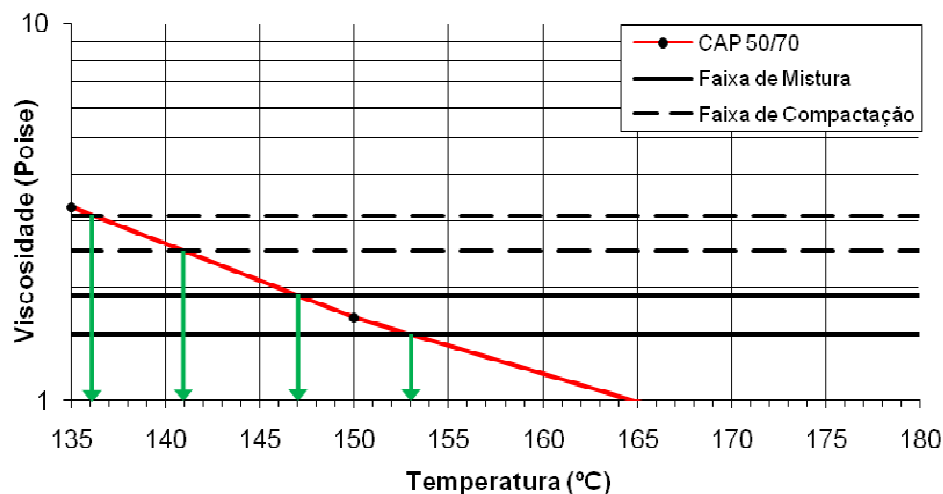


Figura 3.20 – Gráfico viscosidade Brookfield (poise) versus temperatura (°C)

### 3.5 – ENSAIOS MECÂNICOS

O desempenho mecânico das misturas betuminosas foi avaliado por meio dos ensaios de Resistência à Tração estática por compressão diametral (RT), Módulo de Resiliência (MR), fadiga por compressão diametral a tensão controlada e compressão uniaxial estático (*creep* estático).

#### 3.5.1 – Resistência à tração estática por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral foi desenvolvido inicialmente pelo professor Fernando Lobo Carneiro em 1943, para determinar indiretamente a resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de cimento Portland submetidos à solicitação estática, sendo este ensaio conhecido internacionalmente como “ensaio brasileiro”. Posteriormente o método foi adaptado para a caracterização de misturas asfálticas com a utilização de frisos metálicos curvos (Falcão e Soares, 2002; Bernucci *et al*, 2008).

A execução dos ensaios seguiu os procedimentos do DNER-ME 138/94 sendo realizados a temperatura de 25°C. As amostras foram colocadas em uma prensa Marshall (Figura 3.21) e submetidas a uma compressão diametral progressiva, com uma velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s, induzindo um estado de tensão biaxial até que ocorra a ruptura do corpo-de-prova, segundo o plano diametral vertical. A resistência a tração indireta (RT), normalmente expressa em MPa, é calculada através da Equação 3.2.

$$RT = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} \quad (3.2)$$

onde: F é a força aplicada de ruptura, D e H são o diâmetro e a altura média do corpo-de-prova respectivamente.

A metodologia adotada pelo DNER-ME 138/94 considera a ruptura do corpo-de-prova ao longo do diâmetro solicitado sendo devida unicamente às tensões de tração uniformes geradas, admitindo-se um comportamento exclusivamente elástico durante o ensaio. Portanto, a influência dos frisos é desconsiderada no cálculo da resistência a tração. Estudos realizados por Falcão e Soares (2002) em misturas asfálticas demonstraram que o valor da RT varia com a largura dos frisos.



Figura 3.21 – Prensa mecânica utilizada para a realização dos ensaios de resistência a tração

### 3.5.2 – Módulo de resiliência

O módulo resiliente (MR) é conceitualmente definido como a relação entre a tensão de tração ( $\sigma_t$ ) aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a correspondente deformação específica vertical resiliente ou recuperável ( $\varepsilon_r$ ) a uma dada temperatura (T), Equação 3.3.

$$MR = \left( \frac{\sigma_t}{\varepsilon_r} \right)_T \quad 3.3$$

Grande parte dos materiais utilizados na pavimentação não apresentam comportamento elástico, entretanto, se a carga aplicada repetidamente for inferior ao valor da resistência a tração do material, a deformação sofrida pelo material é quase completamente recuperável podendo ser aplicada a teoria da elasticidade (Huang, 1993).

Os ensaios foram realizados em uma câmara climática a uma temperatura de 25 °C seguindo a metodologia adotada pelo Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Engenharia/UFJF. Os cps, com diâmetros entre 10 cm  $\pm$  0,20 cm e alturas entre 6,35 cm  $\pm$  0,13 cm, foram submetidos à compressão diametral distribuída ao longo de duas geratrizes opostas por meio de frisos curvos de carga, com aplicação de carga dinâmica durante 0,1 s e repouso de 0,9 s (frequência de 1 Hz para aplicação das cargas). O carregamento pulsante tem como objetivo simular a passagem da roda dos veículos no revestimento asfáltico.

A aparelhagem necessária para a realização do ensaio é composta por uma prensa com estrutura de suporte metálica, sistema pneumático com controle automatizado dos carregamentos repetidos aplicados por um pistão na frequência de 1 Hz, sistema de medição de deformação das amostras constituído por um transdutor do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) e um quadro-suporte para fixação do transdutor no cp e um sistema informatizado de controle e aquisição de dados.

Segundo Medina e Motta (2005), o módulo de resiliência para corpos de prova com 10,16 cm de diâmetro e carregados diametralmente por meio de um friso curvo de 1,27 cm pode ser calculado pela Equação 3.4.

$$MR = \frac{F}{\Delta \times H} \times (0,9976\mu + 0,2692) \quad (3.4)$$

onde:

MR = módulo de resiliência (MPa);

F = carga vertical repetida aplicada diametralmente no cp (N);

$\Delta$  = deformação resiliente medida ao longo do diâmetro horizontal (cm);

H = altura do CP (cm);

$\mu$  = coeficiente de Poisson (no presente estudo, o valor adotado foi de 0,30).

A metodologia do DNER-ME 133/94 recomenda a aplicação de uma carga repetida com valor de no máximo 30% do valor da RT para determinação da deformação resiliente. Os ensaios realizados com os corpos-de-prova não levaram em consideração os valores de RT, pois o equipamento utilizado só registra o valor do MR quando o deslocamento é superior a um valor mínimo dependente da sensibilidade dos LVDTs. Durante a execução dos ensaios essa sensibilidade foi de 0,003 mm.

### **3.5.3 – Deformação permanente por compressão axial (creep estático)**

O estudo do comportamento de misturas asfálticas quanto à deformação permanente é de suma importância, principalmente em regiões de clima tropical como o Brasil onde predominam altas temperaturas, uma vez que o desenvolvimento da deformação plástica no revestimento asfáltico propicia a formação de trilhas de roda ou a exudação precoce do mesmo.

O ensaio de compressão axial estático (creep estático) não é padronizado no país. Para a realização da análise de deformação permanente de misturas betuminosas desta pesquisa, foi adotada a metodologia do Laboratório de Pavimentação da Faculdade de

Engenharia/UFJF. O equipamento utilizado é o mesmo para ensaios de compressão diametral, entretanto, o sentido de aplicação da carga de compressão é vertical através de uma placa superior com o corpo-de-prova na posição axial apoiado na base da prensa.

Os corpos-de-prova permanecem em estufa a temperatura de 40 °C por no mínimo um período de 4 horas. Posteriormente, aplica-se um carregamento de compressão contínuo e estático, no valor de 0,1 MPa, durante uma hora (3600 s), seguido de uma fase de descarregamento com duração de 15 minutos (900 s) com objetivo de estabilizar as deformações viscosas. O registro da deformação permanente é feita por dois transdutores do tipo LVDT colocados em alças fixadas no corpo-de-prova e ligados a um microcomputador para aquisição automática de dados, conforme indicado na Figura 3.22.

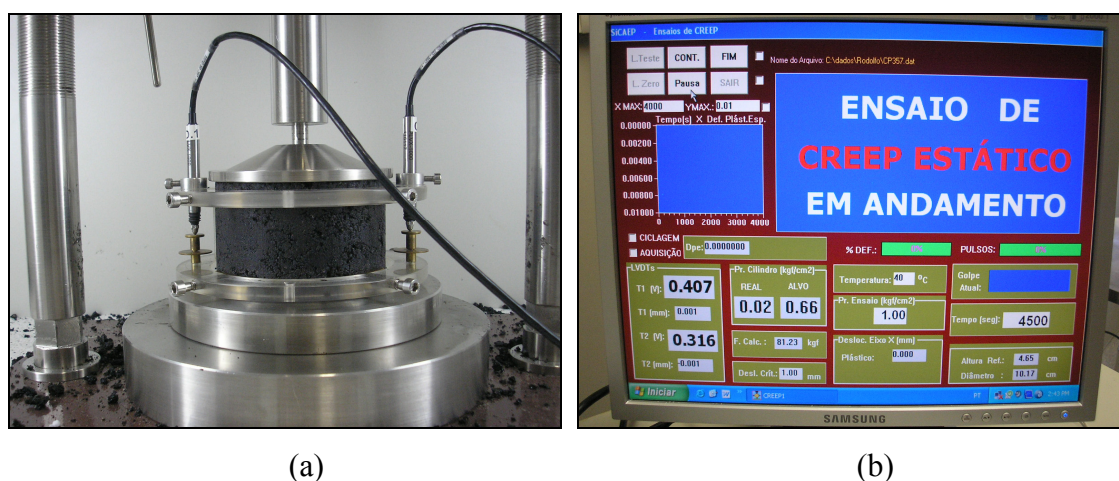


Figura 3.22 – Ensaio creep estático: (a) configuração do cp e dos LVDTs durante o ensaio; (b) tela de apresentação do programa do controle e aquisição de dados do ensaio de deformação permanente

A Figura 3.23 mostra um esquema simplificado do ensaio de creep estático, onde a deformação permanente é medida através do deslocamento vertical sofrido pelo corpo-de-prova ao longo do tempo.

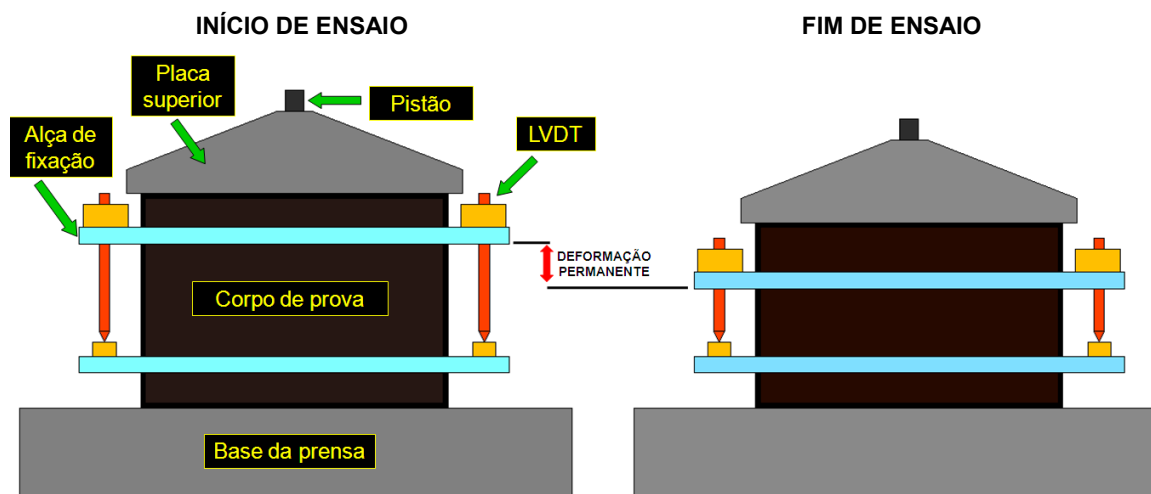


Figura 3.23 – Esquema simplificado do ensaio de deformação permanente (creep estático)

### 3.5.4 – Fadiga por compressão diametral a tensão controlada

Fadiga pode ser descrito como sendo um processo de mudança estrutural permanente, localizada e progressiva de um material quando o mesmo é submetido a um estado de carregamento e deformações repetidas, ocasionando a perda de resistência e o surgimento de trincas ou fraturas após um número suficiente de repetições de carga com amplitudes inferiores a resistência a tração do material (Medina e Motta, 2005).

O ensaio de fadiga a tensão controlada por compressão diametral (TC) é mais utilizado no Brasil por ser mais simples e de fácil execução em relação ao ensaio à deformação controlada (DC). No caso do ensaio a deformação controlada, o carregamento tem o seu valor decrescido ao longo do ensaio de modo a manter constantes as deformações sofridas pela amostra, sendo o critério de vida de fadiga definido como o número de repetições de cargas necessário para diminuir a rigidez do material ao um valor pré-estabelecido (Pinto, 1991).

Na solicitação a carga controlada, o material é submetido a cargas repetidas e as deformações resultantes aumentam progressivamente até a fase de fratura completa do corpo-de-prova. Portanto, a vida de fadiga (N) do material pode ser definida como sendo o número total de aplicações de carga suficiente para levar a amostra a um



colapso estrutural (Pinto, 1991; Pinto e Preussler, 2002), podendo ser expressa mediante as equações 3.5 e 3.6.

$$N = k_1 \left( \frac{1}{\sigma_t} \right)^{n_1} \quad (3.5)$$

$$N = k \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^n \quad (3.6)$$

onde:

$N$  = vida de fadiga (número de aplicações de carga);

$\Delta\sigma$  = diferença de tensões no centro do corpo-de-prova;

$\sigma_t$  = tensão de tração;

$K_1, K_2, n_1$  e  $n_2$  = constantes determinadas experimentalmente.

O ensaio de fadiga a tensão controlada é que melhor representa as condições de carregamento predominantes nas estruturas de pavimentos no país, visto que o revestimento asfáltico se apresenta mais rígido que a camada de base, determinando diretamente a intensidade das deformações. O ensaio tem como finalidade simular a passagem da roda dos veículos sobre o pavimento, pois a maioria dos danos na camada de revestimento está ligada diretamente ao fenômeno de fadiga, que enfraquece e reduz o desempenho global do pavimento (Pinto, 1991; Medina e Motta, 2005).

Segundo Loureiro (2003), a diferença de tensões de compressão e tração na parte inferior do revestimento ( $\Delta\sigma$ ) é o principal fator que origina o aparecimento de trincas e fissuras no revestimento do pavimento.

A sequência para a realização do ensaio é a seguinte:

- Posicionar o corpo-de-prova sobre a base da prensa apoiando-o entre os frisos curvos metálicos;
- Assentar o pistão de carga com o friso superior diametralmente oposto ao friso inferior;

- Aplicar uma carga (F) que induza tensões de tração horizontais com valores entre 10% a 50% da RT pré-determinada até a fratura completa do cp e dada pela Equação 3.7;

$$F = \frac{\pi \times D \times H}{2} \times (\%RT) \quad (3.7)$$

- Frequência de aplicação das cargas sendo de 1 Hz (0,1 s de carregamento e 0,9 s de descarregamento);
- Plota-se um gráfico do tipo log-log entre o número de aplicações de carga (N) e a diferença entre a tensão máxima horizontal e vertical no centro do cp ( $\Delta\sigma$ ), conforme Equação 3.8, para obtenção da curva de vida de fadiga da mistura.

$$\Delta\sigma = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} \quad (3.8)$$

- A curva de vida de fadiga também pode ser representada em função da deformação específica resiliente inicial ( $\varepsilon_i$ ), expressada pela Equação 3.9, versus o número de repetições de carga (N).

$$\varepsilon_i = \frac{\%RT}{MR} \quad (3.9)$$

# Capítulo 4

## PROJETO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

O presente trabalho teve como objetivo avaliar laboratorialmente a influência do tipo de agregado e do tipo de material de enchimento no desempenho de misturas asfálticas do tipo concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). A metodologia Marshall foi adotada para a confecção dos corpos-de-prova, por ser ainda o método mais utilizado no Brasil.

### 4.1 – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Optou-se adotar para todas as misturas asfálticas a mesma curva granulométrica de projeto, visando diminuir o número de variáveis a serem consideradas nas análises. A curva granulométrica escolhida se enquadra dentro dos limites da faixa C do DNIT para concreto asfáltico, tendo como referência a especificação DNIT-ES 031/2006. A Figura 4.1 e a Tabela 4.1 mostram o enquadramento granulométrico selecionado.

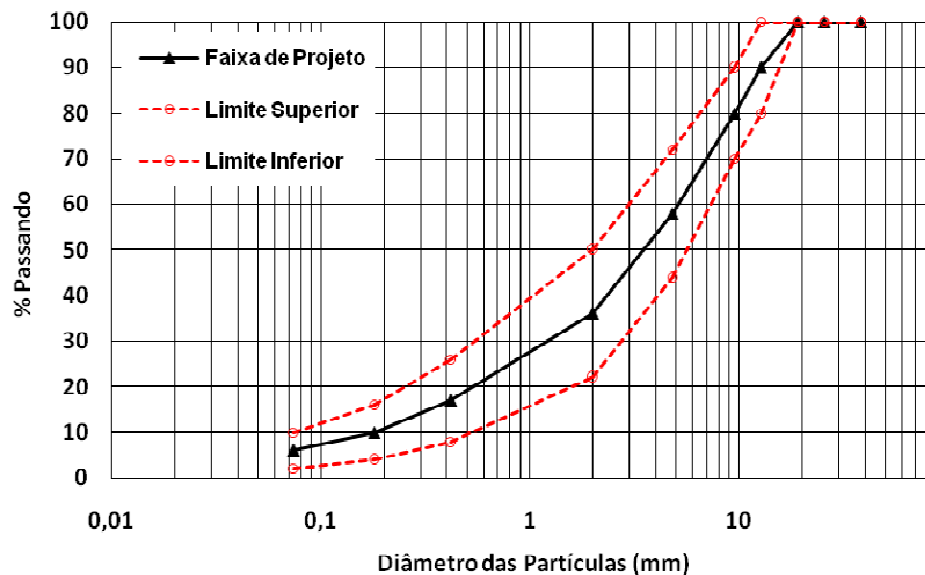


Figura 4.1 – Enquadramento granulométrico das misturas

Tabela 4.1 – Enquadramento granulométrico das dosagens (DNIT-ES 031/2006)

Peneiras pol./#	(mm)	% em massa passando		Variação Permitida
		Faixa C (DNIT)	Faixa de Projeto	
1 <sup>1/2</sup> "	38,1	100	100	± 7%
1"	25,4	100	100	± 7%
3/4"	19,1	100	100	± 7%
1/2"	12,7	80 - 100	90	± 7%
3/8"	9,5	70 - 90	80	± 7%
nº4	4,8	44 - 72	58	± 5%
nº 10	2,0	22 - 50	36	± 5%
nº 40	0,42	8 - 26	17	± 5%
nº 80	0,18	4 - 16	10	± 3%
nº 200	0,075	2 - 10	6	± 2%

A Figura 4.2 apresenta a distribuição granulométrica da faixa de projeto segundo a especificação SUPERPAVE (AASHTO MP2, 2001), onde a abcissa é constituída pelo tamanho das peneiras (mm) elevado à potência de 0,45.

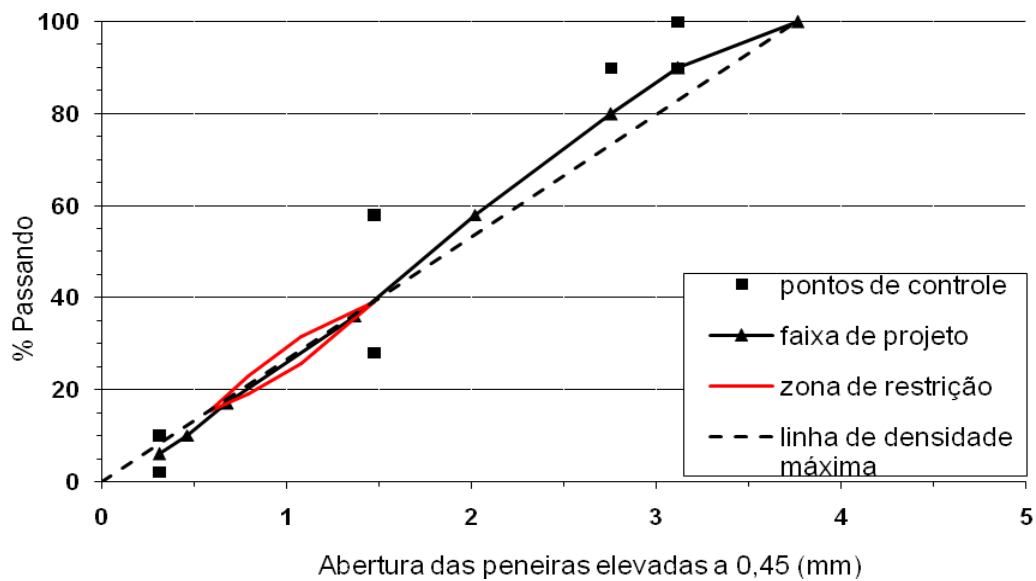


Figura 4.2 – Representação da curva granulométrica de projeto pela especificação SUPERPAVE para tamanho nominal máximo de 12,5 mm

Para o presente trabalho, a curva granulométrica das misturas possui tamanho nominal máximo de 12,5 mm (definido como sendo a peneira imediatamente superior a aquela

que retém mais de 10% dos agregados) e diâmetro máximo de 19,1 mm, além disso, com a curva passando por dentro da zona de restrição. A linha de densidade máxima, representada por uma reta que passa pela origem e vai até o ponto de diâmetro máximo, é definida como a configuração dos grãos mais compacta possível, devendo ser evitada.

A especificação SUPERPAVE recomenda que a granulometria escolhida não passe pela zona de restrição, preferencialmente deve-se situar abaixo desta zona. Misturas que passam através da zona de restrição podem apresentar baixa resistência a deformação permanente e dificuldade de compactação (Marques, 2004).

Segundo Gouveia (2006), apesar das agências de pavimentação dos EUA darem preferência a utilização de misturas mais grossas, que passam abaixo da zona restrita, recentes pesquisas e observações de campo vem comprovando um bom desempenho de pavimentos que utilizam misturas que passam pela zona restrita, demonstrando que não existe relação entre a zona restrita e o desempenho das misturas asfálticas quanto a deformação permanente e à fadiga.

A opção por misturas de granulometria densa e continua justifica-se por serem usualmente as mais empregadas em obras de pavimentação rodoviária na região do Quadrilátero Ferrífero. Este tipo de mistura apresenta um arranjo estrutural com variação progressiva do tamanho dos grãos, de tal forma que as partículas menores preencham os vazios entre as partículas de maior dimensão, proporcionando um baixo volume de vazios.

Para o presente trabalho, foram dosadas quatro misturas de CBUQ apresentando diferenças entre si quanto aos tipos de agregados utilizados na composição do traço, sendo denominadas M1 (mistura comparativa), M2 (mistura com 80% de escória), M3 (mistura com 80% de escória e 6% de rejeito de minério de ferro) e M4 (mistura com 6% de rejeito de minério de ferro). A Tabela 4.2 apresenta a distribuição granulométrica fixada para a composição dos traços das dosagens alternativas e convencional.

A princípio, pretendia-se trabalhar com os agregados graúdos das misturas M2 e M3 compostos somente com escória de aciaria, mas devido a pouca parcela de grãos de escória retidos na peneira de 12,7 mm da amostra coletada (aproximadamente 5%), não teria quantidade suficiente de material para modelagem dos corpos-de-prova previstos. Optou-se então pela utilização da pedra britada.

Tabela 4.2 – Porcentagem em peso dos agregados utilizados nas misturas asfálticas

Peneiras (mm)	Faixa de projeto % Retido	Mistura M1 Comparativa	Mistura M2 80% Escória	Mistura M3 86% Resíduos	Mistura M4 6% Rejeito
12,7	10,0	Brita 1	Brita 1	Brita 1	Brita 1
9,52	10,0	Brita 1	Escória	Escória	Brita 1
4,76	22,0	Brita 0	Escória	Escória	Brita 0
2	22,0	Pó de pedra	Escória	Escória	Pó de pedra
0,42	19,0	Pó de pedra	Escória	Escória	Pó de pedra
0,2	7,0	Pó de pedra	Escória	Escória	Pó de pedra
0,07	4,0	Pó de pedra	Pó de pedra	Pó de pedra	Pó de pedra
Fíler	6,0	Fíler mineral	Fíler mineral	Rejeito minério de ferro	Rejeito minério de ferro

O fracionamento dos agregados (Figura 4.3) para a correção granulométrica tanto do agregado natural quanto da escória foi realizado por peneiramento mecânico e os materiais armazenados em recipientes plásticos, permitindo desta forma a mesma composição dos traços para todas as misturas na granulometria de projeto e respeitando as tolerâncias preconizadas pelo DNIT.

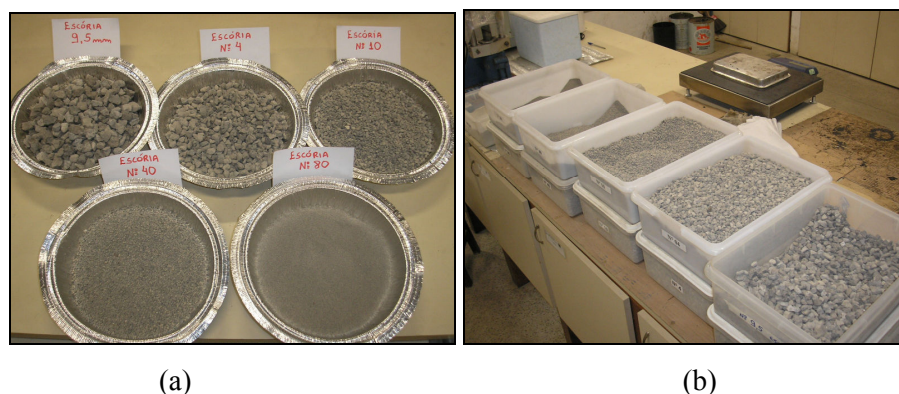


Figura 4.3 – Fracionamento dos agregados: (a) escória e (b) gnaisse britado

## 4.2 – DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA (DMT)

A densidade máxima teórica é um parâmetro de fundamental importância para a determinação do percentual de vazios das misturas asfálticas, visto que, no Brasil a estimativa do teor ótimo de ligante é baseada em parâmetros volumétricos.

O cálculo da DMT é feito mediante formulação teórica por meio de uma equação definida como sendo a razão entre as massas específicas dos componentes da mistura asfáltica e a proporção com que cada um contribui na mistura total, conforme mostrado na Equação 4.1.

$$DMT = \frac{100}{\frac{P_1}{d_1} + \frac{P_2}{d_2} + \frac{P_3}{d_3} + \dots + \frac{P_n}{d_n}} \quad (4.1)$$

Onde:

$P_1, P_2, P_3$  e  $P_n$  = porcentagem de cada componente (agregados e ligante asfáltico) em relação à massa total da mistura;

$d_1, d_2, d_3$  e  $d_n$  = densidades reais de cada material que compõe a mistura (agregados e ligante asfáltico).

Existem outros procedimentos para avaliação da DMT das misturas. A metodologia ASTM 2041/00 descreve os procedimentos para determinação direta da densidade efetiva de misturas betuminosas não compactadas à 25 °C através da aplicação de vácuo, sendo denominada por vários autores brasileiros como Densidade Máxima Medida (DMM) ou densidade Rice (Castelo Braco, 2004; Marques, 2004; Freitas, 2007; Bernucci *et al*, 2008).

A DMT é calculada levando em consideração a soma dos volumes do agregados, vazios impermeáveis e o total de asfalto (Figura 4.4a), enquanto que a DMM, por ser uma medição direta da densidade da mistura, além de considerar os volumes estimados para a DMT, inclui o volume de vazios não preenchidos com ligante (Figura 4.4b).

Consequentemente, o valor esperado para a DMT será numericamente maior ao determinado para a DMM. Dessa forma, deve-se tomar cuidado para não utilizar simultaneamente os dois conceitos de densidade máxima no mesmo projeto de mistura, dando preferência entre um ou outro.

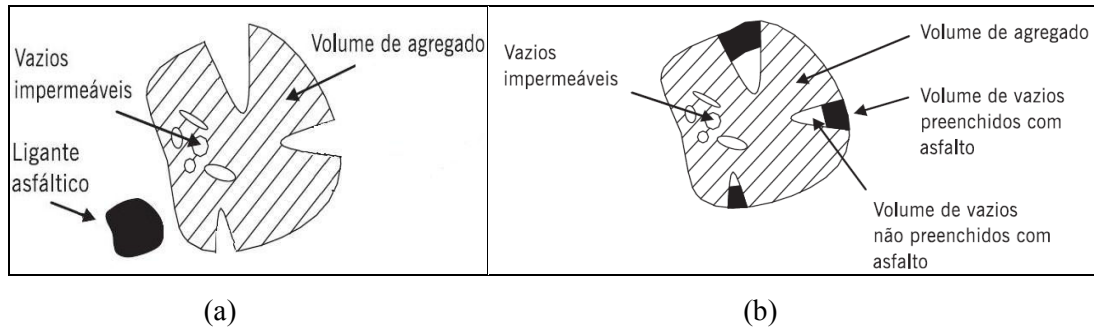


Figura 4.4 – Ilustração dos volumes considerados nas misturas: (a) DMT e (b) DMM  
(Bernucci *et al*, 2008 modificado).

Nos EUA, o método Rice vem sendo utilizado para determinação direta da densidade máxima das misturas, pois os pesquisadores reconhecem que existem erros se, para o cálculo da mesma, somente for considerado a contribuição percentual em peso de cada componente da mistura e suas respectivas densidades relativas (Marques, 2004). A vantagem da utilização da DMM se deve ao fato de não precisar determinar separadamente a densidade de cada componente da mistura e considerar o volume de vazios não preenchidos com asfalto (Castelo Braco, 2004; Freitas, 2007).

O cálculo da DMT através das densidades reais, pressupõe que todos os vazios da mistura estão preenchidos com ligante, o que não é verdade, pois existem vazios nos agregados que são impenetráveis ao ligante asfáltico. Entretanto, se avaliar a densidade máxima teórica com os valores de densidade aparente dos agregados, estará subestimando o valor real, já que neste caso considera-se que não há nenhuma absorção de ligante pelos poros dos agregados, o que também não é verdadeiro. Desse modo, alguns autores recomendam em se trabalhar com um valor de densidade intermediário a esses dois, denominada densidade efetiva.



Pinto (2003) cita como recomendação para o cálculo da DMT por meio da equação 4.1 que se trabalhe com a massa específica efetiva dos agregados (média dos valores de suas massas específicas real e aparente).

Nesta pesquisa, foi utilizado para o cálculo da DMT as densidades reais dos agregados, obtidos pelos procedimentos DNER-ME 081/94, DNER-ME 084/95 e DNER-ME 085/94, uma vez que estes procedimentos determinam a densidade aparente apenas para os agregados graúdos.

As metodologias americanas ASTM C 127-01 e a ASTM C 128-01 fornecem valores de densidade real e aparente para os agregados graúdos e miúdos, inclusive o fíler, possibilitando a determinação da densidade efetiva dos agregados.

As DMTs foram calculadas a partir do método convencional (utilização dos valores de densidades reais dos agregados miúdos pelo processo de fervura) e pelo método adaptado (utilização dos valores de densidades reais dos agregados miúdos pelo processo de fervura e vácuo). Os valores de DMTs encontrados para as misturas são apresentados na Tabela 4.3 e melhor visualizados na Figura 4.5.

Tabela 4.3 – Resultados das DMTs calculadas com os valores de densidades reais de maneira convencional (DMT) e pelo método adaptado (DMT<sub>A</sub>)

% CAP	Mistura							
	M1		M2		M3		M4	
	DMT	DMT <sub>A</sub>	DMT	DMT <sub>A</sub>	DMT	DMT <sub>A</sub>	DMT	DMT <sub>A</sub>
4,5	2,497	2,498	-	-	-	-	2,541	2,542
5,0	2,478	2,479	-	-	-	-	2,521	2,522
5,5	2,459	2,460	2,991	2,995	3,053	3,057	2,501	2,502
6,0	2,440	2,441	2,960	2,964	3,021	3,024	2,481	2,482
6,5	2,422	2,423	2,930	2,933	2,989	2,992	2,462	2,463
7,0	-	-	2,900	2,903	2,957	2,961	-	-
7,5	-	-	2,871	2,874	2,927	2,930	-	-

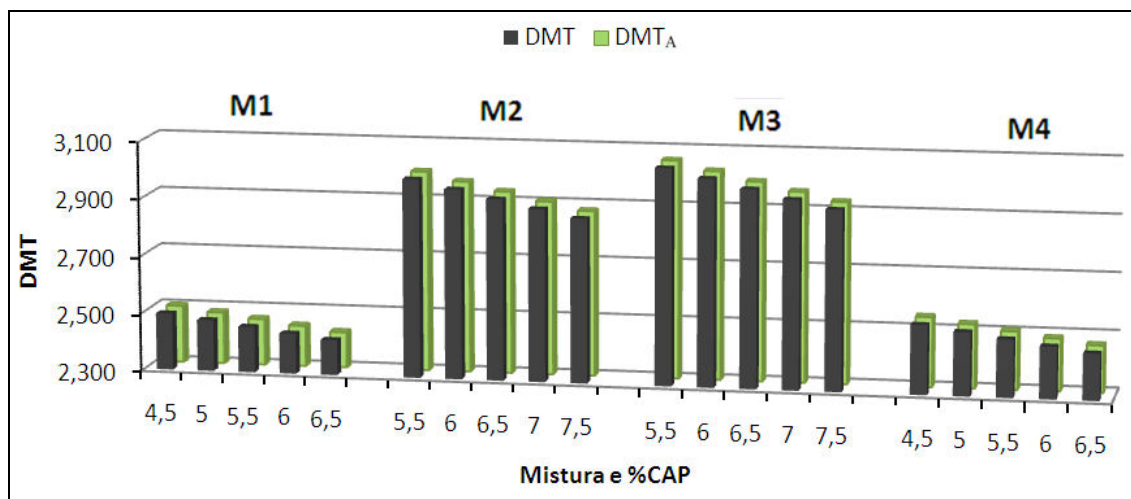


Figura 4.5 – Valores de DTM e DMT\* obtidos para as misturas M1, M2, M3 e M4

Os resultados demonstraram que para as misturas M1 e M4, os valores das DMT<sub>A</sub> foram praticamente iguais aos de DMT, com uma variação desprezível de apenas 0,04%. As misturas M2 e M3 (misturas contendo 80% de escória de aciaria) apresentaram valores de DMT<sub>A</sub> 0,13% superiores aos valores de DMTs. Como era de se esperar, percebe-se que os valores de DMT são maiores para as misturas contendo escória de aciaria, visto que a densidade da escória é mais elevada do que a densidade dos agregados convencionais utilizados. Pelo fato da escória ser mais porosa do que a brita graduada, conforme citado no ítem 3.2.13, as variações encontradas entre os valores de DMT e DMT<sub>A</sub> foram mais significativas para as misturas M2 e M3.

Para o cálculo do teor de projeto das misturas desta pesquisa foram utilizados os valores de DMT<sub>A</sub>, por serem mais consistentes com a realidade, mesmo não apresentando diferenças para os valores de teores de projeto calculados tanto pela DMT quanto pela DMT<sub>A</sub>.

### 4.3 – TEOR DE PROJETO (TP)

Existem diferentes procedimentos para a escolha do teor de projeto por meio da dosagem Marshall. Segundo Roberts *et al.* (1996), o teor de projeto é determinado pela média dos teores de ligante correspondente ao máximo peso específico da amostra

compactada, máxima estabilidade e a um volume de vazios ( $V_v$ ) igual a 4% (ou a média das especificações), enquanto que NAPA (1982) baseia-se na escolha do teor de projeto levando em consideração apenas um volume de vazios ( $V_v$ ) de 4% ou correspondente à médias das especificações.

Os teores de projeto adotados neste trabalho para todas as misturas foram baseados em dois parâmetros volumétricos ( $V_v$  e RBV), seguindo os procedimentos descritos em Vasconcelos e Soares (2005) e convencionalmente adotado pela 3ª Unidade de Infra-estrutura Terrestre do Departamento Nacional de Infra-estrutura Terrestre (DNIT).

O volume de vazios ( $V_v$ ) e a relação betume-vazios (RBV) são determinados a partir das equações 4.2 e 4.3, respectivamente.

$$V_v = \frac{DMT - D_a}{DMT} \times 100\% \quad (4.2)$$

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \times 100\% \quad (4.3)$$

Onde:

DMT = Densidade Máxima Teórica;

Da = densidade aparente da mistura asfáltica compactada;

VCB = Vazios cheios com betume;

VAM = Vazios no agregado mineral.

Sendo:

$$D_a = \frac{P_{ar}}{P_{ar} - P_{imerso}} \quad (4.4)$$

$$VCB = \frac{D_a \times P_{CAP}}{D_{CAP}} \quad (4.5)$$

$$VAM = V_v + VCB \quad (4.6)$$

em que:

$P_{ar}$  = peso seco da mistura compactada;

$P_{imerso}$  = peso imerso da mistura compactada;

$P_{CAP}$  = percentagem de ligante asfáltico na mistura;

$D_{CAP}$  = densidade do CAP.

A determinação da densidade aparente dos corpos-de-prova ( $D_a$ ) seguiu a metodologia DNER-ME 117/94, onde se determinou o peso seco do CP em uma balança eletrônica de precisão ( $P_{ar}$ ) seguido da pesagem hidrostática do mesmo após 3 minutos submerso em água destilada ( $P_{imerso}$ ).

A metodologia dos EUA difere da brasileira em relação ao volume considerado no cálculo da densidade aparente ( $D_a$ ) de misturas betuminosas compactadas. O procedimento ASTM D 2726-00 determina o volume do corpo-de-prova como sendo a diferença entre sua massa na condição de superfície saturada seca e a massa nessa condição posteriormente submersa em água.

Para a determinação do teor de projeto, foram moldados corpos-de-prova com cinco diferentes teores de asfalto, sendo dois teores acima e dois teores abaixo do teor inicial de ligante estipulado, com incrementos de 0,5%. A partir da determinação dos parâmetros Vv e RBV para cada CP, traça-se um gráfico onde a abscissa é representada pelo percentual de ligante da mistura e as ordenadas são dadas em valores de Vv e RBV.

De posse dos valores limites especificados pelo DNIT para os parâmetros avaliados (Vv entre 3% a 5% e RBV entre 75% a 82%), são obtidos quatro valores de teor de ligante asfáltico através de retas verticais originadas da especificação. O TP é calculado como sendo a média dos dois valores centrais de CAP, conforme demonstrado no exemplo da Figura 4.6.

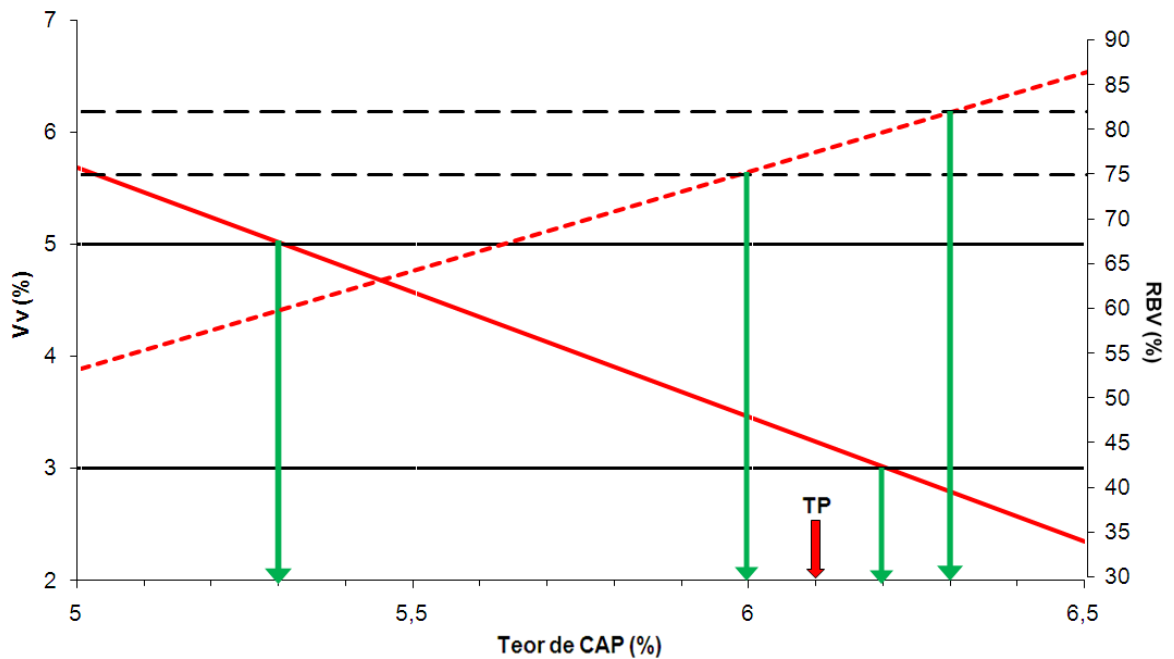


Figura 4.6 – Exemplo de determinação do teor de projeto

O teor de ligante inicial estipulado para M1 e M4 foi de 5,5% e para as misturas M2 e M3 foi de 6,5%. Os teores de ligante utilizados nas dosagens para obtenção dos TPs foram de 4,5 a 6,5% para as misturas M1 e M4 e de 5,5 a 7,5% para as misturas M2 e M3.

Para a confecção dos corpos-de-prova das misturas M1 e M4 no teor de 4,5% encontrou-se dificuldade para misturar os materiais, sendo necessário o limite máximo de 3 minutos de homogeneização estabelecido pela DNER-ME 043/95. Fato também sucedido para as misturas M2 e M3 no teor de 5,5% de ligante.

Foi constatado uma mudança no aspecto das misturas contendo escória de aciaria como agregado, principalmente com teores de 5%, logo após a permanência de 2 horas dentro da estufa para simular o envelhecimento. Apesar do completo recobrimento dos agregados por ligante durante a fase de homogeneização foram detectados grãos superficialmente não-recobertos durante a compactação, fato este possivelmente causado devido a absorção de ligante pela escória durante a permanência na estufa.

O mesmo fenômeno não foi observado para as misturas M1 e M4, o que demonstra a porosidade como sendo principal fator influenciador de absorção de ligante pelo agregado, visto que a escória utilizada possui maior porosidade em relação ao agregado convencional. Este tipo de fenômeno também foi notado por Freitas (2007) que utilizou escória de aciaria como agregado nas misturas asfálticas.

A Figura 4.7 apresenta um corpo-de-prova com recobrimento insuficiente de ligante em alguns grãos (pontos indicados por setas) devido ao processo de envelhecimento na estufa. As misturas nos teores intermediários entre 6,0 a 7,0% apresentaram uma feição mais seca após o envelhecimento de 2 horas em estufa, não sendo observado visualmente qualquer alteração para as misturas no teor de 7,5%.



Figura 4.7 – CP apresentando agregados com recobrimento insuficiente de ligante indicados pelas setas para a mistura M2 no teor de 5,5%.

Conforme observado nos ensaios de MEV no capítulo 3, a escória de aciaria possui maior quantidade de poros presentes nos grãos em relação ao agregado gnaissico. Estudos realizados por Lee (1969) e Lettier et al. (1949) demonstraram que a capacidade de absorção de asfalto está diretamente relacionada com a porosidade da partícula e indiretamente com a composição química dos agregados. Os autores constataram que agregados com alta capacidade de absorção de asfalto possuíam partículas mais porosas, com critérios de granulação grosseira e presença de macroporos

(dimensão maior que 0,5 micron), visto que o mecanismo físico de absorção se dá pela passagem do asfalto por canais inter cristalinos existentes entre os cristais das partículas.

As misturas M2 e M3 com teores de 7,0% e 7,5% apresentaram facilidade de homogeneização e exudação, sendo observado visualmente excesso de ligante na superfície dos corpos-de-prova compactados. O mesmo ocorrendo para as misturas M1 e M4 nos teores de 6,5%.

Para a determinação do TP da mistura comparativa, foram moldados 3 CPs com aproximadamente 1200 g para cada teor de ligante utilizado, totalizando 15 CPs, conforme recomendado pelo DNIT para dosagem de misturas asfálticas. A maior variação de Vv foi de 9,2% para o teor de 6,5%.

O teor de projeto (TP) encontrado foi de 5,8%, este valor já era esperado, visto que o TP estipulado foi de 5,5%. As Figuras 4.8 e 4.9 mostram a variação dos valores de Vv e RBV com o teor de CAP encontrados para a mistura M1, e a Tabela 4.4 apresenta os resultados dos parâmetros volumétricos determinados.

Os resultados demonstram estar coerentes para uma mistura convencional, com o valor de Vv diminuindo e o valor de RBV aumentando, quanto maior o teor de ligante utilizado na mistura.

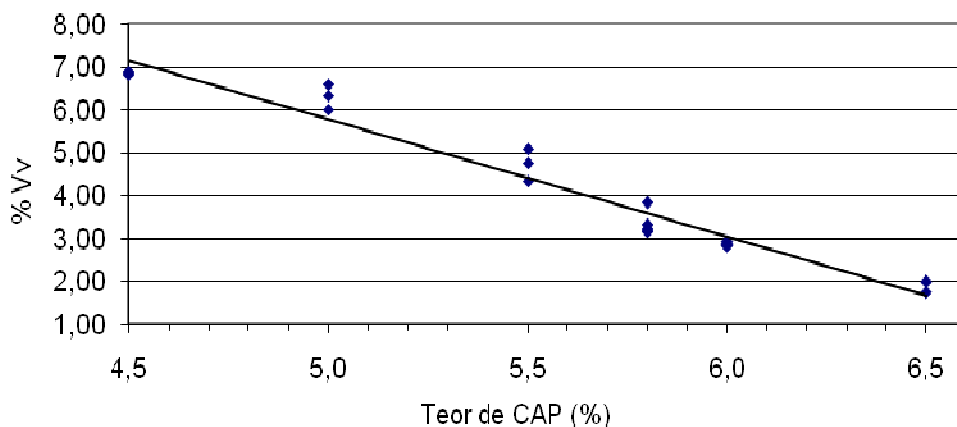


Figura 4.8 – Curva Vv x Teor de CAP para a mistura M1

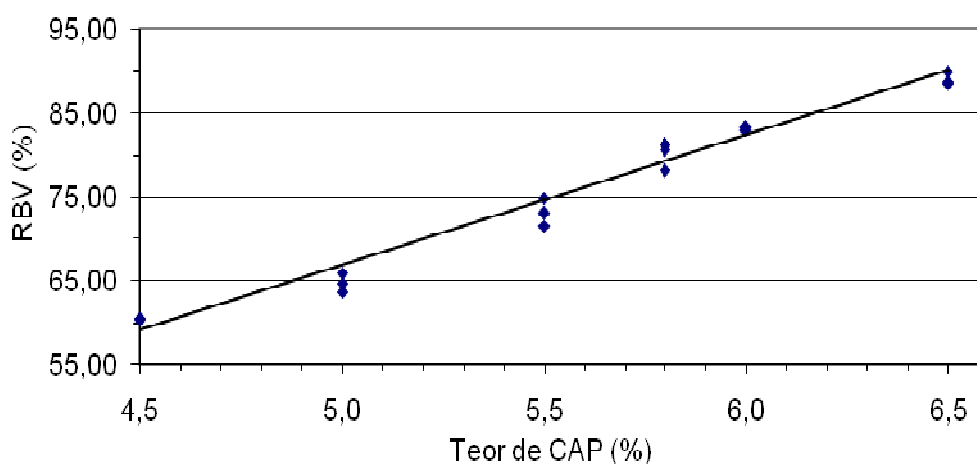


Figura 4.9 – Curva RBV x Teor de CAP para a mistura M1

Tabela 4.4 – Valores médios dos parâmetros volumétricos encontrados para a mistura M1

CAP (%)	$D_{ap}$	$V_v$ (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
4,5	2,327	6,86	10,45	17,31	60,36
5,0	2,323	6,31	11,59	17,90	64,76
5,5	2,344	4,73	12,86	17,59	73,14
6,0	2,371	2,86	14,20	17,06	83,22
6,5	2,377	1,91	15,42	17,33	88,98
TP (%)			5,8		

Foram moldados 60 corpos-de-prova da mistura M2 (80% de escória) para determinação do TP. Os CPs foram moldados com 1440 g para que pudessem atingir a altura especificada pelo DNIT ( $6,35 \text{ cm} \pm 0,13 \text{ cm}$ ). Isto já era previsto, pois a escória de aciaria possui uma densidade maior do que a brita graduada. A maior variação encontrada para o  $V_v$  foi de 15% para a mistura de 7,5%. O comportamento dos parâmetros volumétricos  $V_v$  e RBV (Figuras 4.10 e 4.11) foi coerente e semelhante ao da mistura comparativa, sendo que com o aumento do teor de CAP o  $V_v$  diminuía e o RBV aumentava.

O TP calculado de 6,5% foi superior ao da mistura M1, valor este esperado devido a elevada porosidade da escória, necessitando de maior quantidade de ligante betuminoso para preencher os vazios dos agregados e próximo ao TP de 6,7% encontrado por



Castelo Branco (2004) para uma mistura de CBUQ com 80% de escória de aciaria elétrica. Somente os teores de 6,5% e 7,0% obtiveram Vv com valores entre 3% a 5%. Em relação ao RBV, apenas os teores de 6,0% e 6,5% apresentou valores dentro dos limites estabelecidos pelo DNIT. Na Tabela 4.5 encontra-se os valores dos parâmetros volumétricos determinados para a mistura M2.

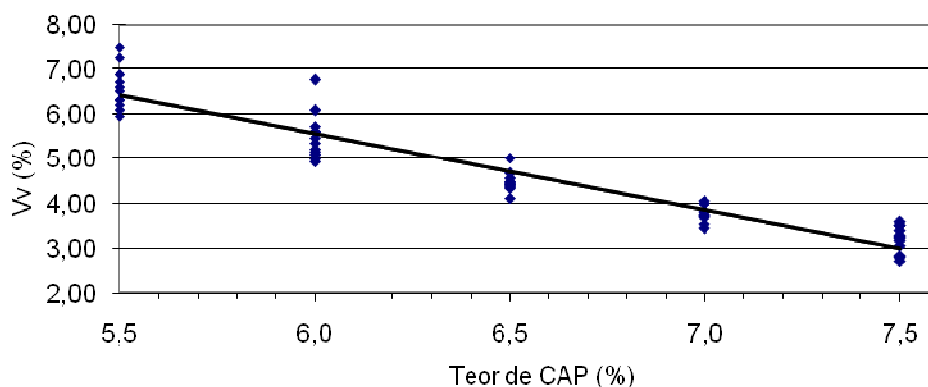


Figura 4.10 – Curva Vv x Teor de CAP para a mistura M2

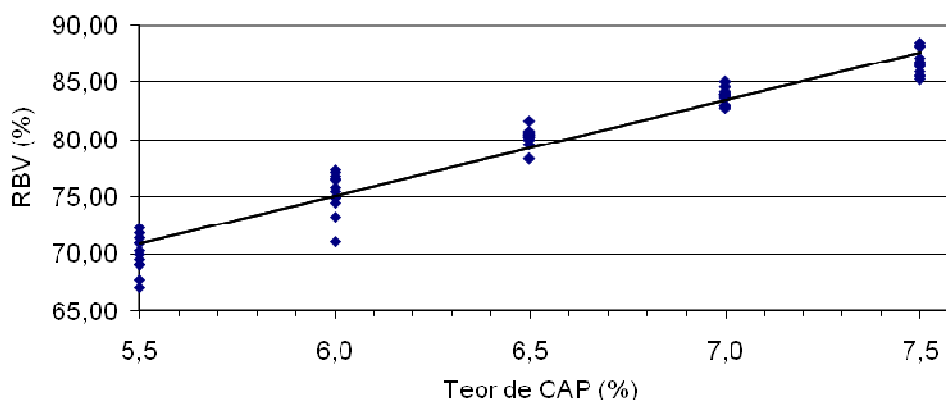


Figura 4.11 – Curva RBV x Teor de CAP para a mistura M2

Tabela 4.5 – Valores médios dos parâmetros volumétricos encontrados para a mistura M2

CAP (%)	Dap	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
5,5	2,797	6,60	15,36	21,95	69,97
6,0	2,805	5,36	16,80	22,16	75,82
6,5	2,802	4,48	18,17	22,65	80,24
7,0	2,793	3,78	19,51	23,29	83,79
7,5	2,782	3,20	20,82	24,02	86,69
TP (%)			6,5		

Para cada teor de ligante da mistura M3 (80% de escória, 6% de rejeito de minério de ferro e 14 % de brita graduada) foram moldados 9 corpos-de-prova, sendo confeccionados 45 CPs para a determinação do TP. Foi necessária a modelagem dos CPs com 1455 g para que a altura dos mesmos se enquadrasse dentro das especificações e foi a mistura que apresentou os maiores valores de densidade aparente. Isto já era esperado, visto que a escória de aciaria e o rejeito de minério de ferro apresentam densidade elevada em relação aos agregados convencionais.

A mudança de visual das misturas de 5,5% antes e após o período de envelhecimento a curto prazo não foi tão evidente e perceptível como foi para a mistura M2, mesmo assim foi notada a absorção de ligante pelo agregado.

A discrepância dos valores encontrados para os parâmetros volumétricos da mistura M3 (Figuras 4.12 e 4.13) foi superior dentre todas as misturas deste estudo, visto que os resíduos utilizados como agregados possuem maior heterogeneidade em relação ao agregado convencional, influenciando diretamente os valores de densidade aparente da mistura e consequentemente nos valores de Vv e RBV. As misturas com teor de ligante de 7,5% apresentaram maior variação de Vv (máximo de 38,5%). Para todos os teores de CAP, foram encontradas variações de densidade aparente das misturas superiores ao limite de 0,02 especificado pela DNER-ME 117/94 para um mesmo teor de ligante. Ressalta-se que todos os CPs utilizados na caracterização mecânica possuíam parâmetros volumétricos com variações admissíveis e dentro dos limites prescritos pelo DNIT.

O TP encontrado para M3 foi de 6,3% , sendo que apenas as misturas nos teores de 6,5% e 7% possuíam valores de Vv de acordo com a especificação. A mistura com 6,0% também apresentou resultados de Vv e RBV próximos e dentro dos limites estabelecidos pelo DNIT, respectivamente. Na Tabela 4.6 estão dispostos os resultados dos parâmetros volumétricos obtidos para a mistura M3.

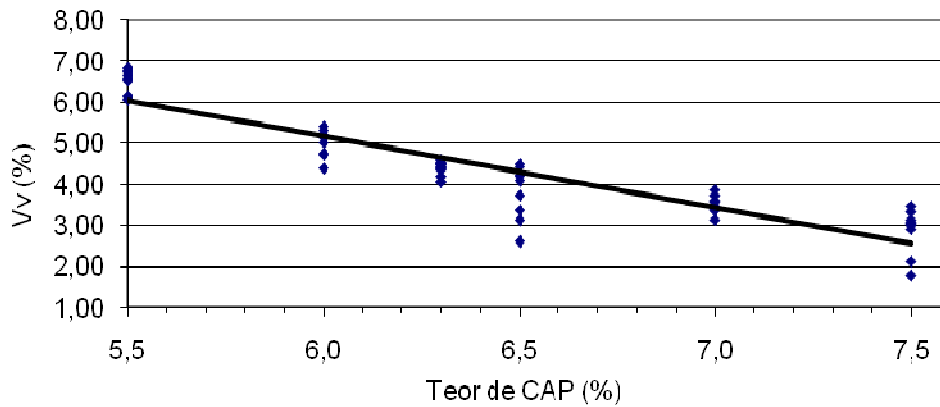


Figura 4.12 – Curva Vv x Teor de CAP para a mistura M3

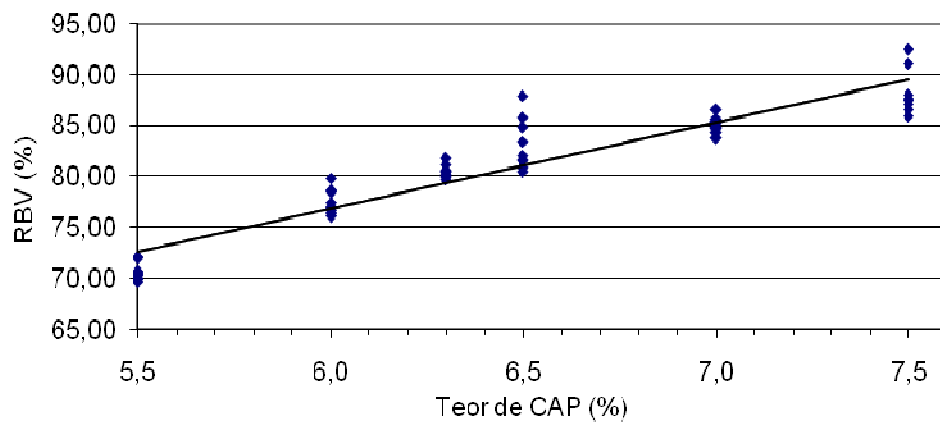


Figura 4.13 – Curva RBV x Teor de CAP para a mistura M3

Tabela 4.6 – Valores médios dos parâmetros volumétricos encontrados para a mistura M3

CAP (%)	Dap	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
5,5	2,857	6,54	15,68	22,23	70,57
6,0	2,873	5,01	17,20	22,21	77,46
6,5	2,878	3,80	18,67	22,47	83,13
7,0	2,857	3,51	19,96	23,47	85,06
7,5	2,846	2,87	21,30	24,17	88,16
TP (%)			6,3		

Foram modelados 35 CPs com cerca de 1210 g para a determinação do TP da mistura M4 (6% de filer alternativo). O Vv apresentou variações de no máximo 22% para o teor de 6%, e apenas as misturas com 5,5% e 6,0% apresentaram resultados de Vv e RBV próximos dos limites estabelecidos pelo DNIT. O TP de 5,8% da mistura M4 foi igual

ao da M1, demonstrando que, em relação a determinação do TP, a substituição do filer convencional pelo rejeito de minério de ferro não altera a quantidade de ligante necessária para a execução do revestimento rodoviário. Os resultados encontrados são mostrados nas Figuras 4.14 e 4.15 e na Tabela 4.7.

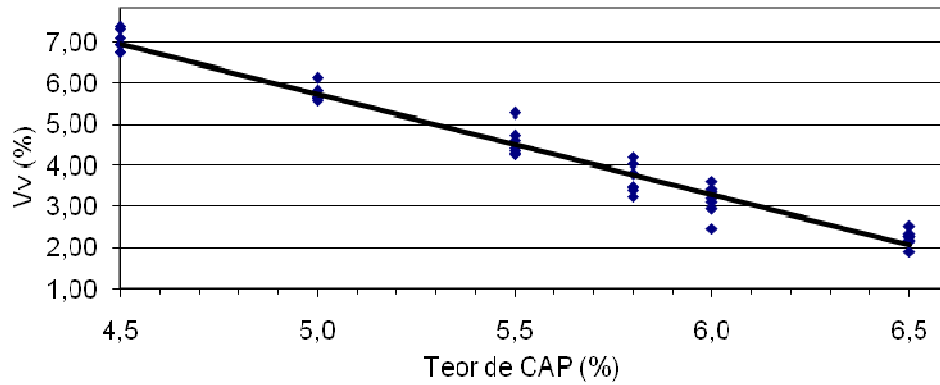


Figura 4.14 – Curva Vv x Teor de CAP para a mistura M4

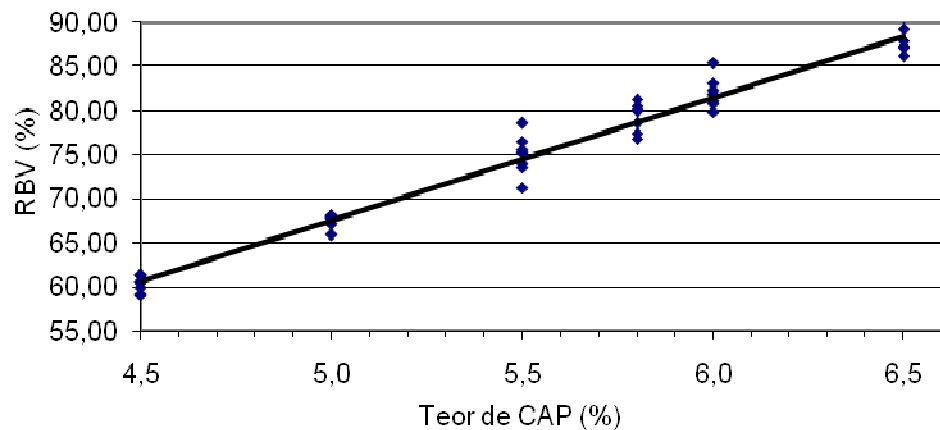


Figura 4.15 – Curva RBV x Teor de CAP para a mistura M4

Tabela 4.7 – Valores médios dos parâmetros volumétricos encontrados para a mistura M4

CAP (%)	Dap	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
4,5	2,364	7,02	10,62	17,63	60,22
5,0	2,378	5,72	11,87	17,58	67,49
5,5	2,388	4,55	13,62	18,17	74,92
6,0	2,404	3,16	14,39	17,55	82,04
6,5	2,408	2,23	15,62	17,85	87,52
TP (%)			5,8		

A Figura 4.16 mostra a comparação dos valores de todos os TP calculados para as misturas. Através dos resultados obtidos para a determinação do TP, percebe-se que a substituição da pedra britada pela escória (misturas M1 e M2) aumentou em 12,1% o consumo de ligante asfáltico e a substituição do fíler natural pelo rejeito de minério de ferro reduziu em 3,1% o consumo de ligante para as misturas contendo escória de aciaria (M2 e M3). O comparativo das misturas M1 e M4 demonstra que não houve variação do TP ao substituir apenas o fíler natural pelo rejeito de minério de ferro.

Portanto, a utilização do rejeito como fíler em misturas betuminosas do tipo CBUQ apresenta grande potencial de uso com ganhos de ordem econômica, em se tratando do consumo de CAP, principalmente para as misturas asfálticas que utilizam escória de aciaria como agregados, pois contribui para uma ligeira redução do consumo de CAP nas massas asfálticas. O fato de não ocorrer a diminuição do TP ao substituir apenas o fíler da mistura convencional pelo rejeito, não deixa de significar o rejeito como material de enchimento alternativo atrativo. Pelo contrário, sua utilização pode se tornar bastante viável analisando os ganhos de ordem ambiental, pela diminuição de volume de deposição do rejeito nas barragens e consequente redução do passivo ambiental.

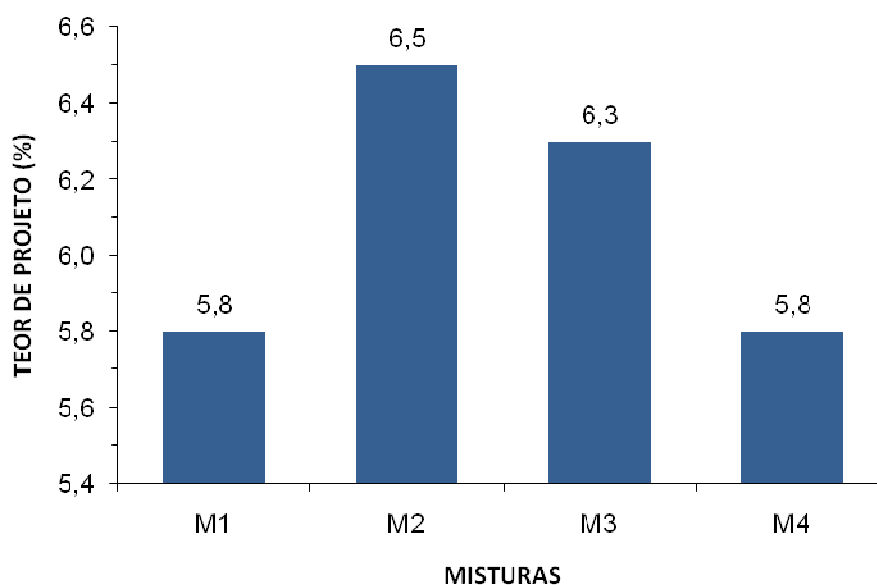


Figura 4.16 – Teores de Projeto das misturas de CBUQ

Os valores dos teores de projeto das misturas contendo escória de aciaria (M2 e M3) são semelhantes aos valores encontrados por Castelo Branco (2004) para misturas de CBUQ com escória de aciaria. A autora encontrou grandes variações nos parâmetros volumétricos das misturas contendo escória do tipo EAF, algumas superiores a 100% sendo atribuída principalmente a grande heterogeneidade dos grãos do resíduo, fato não verificado neste presente estudo por se tratar de uma amostra de escória de aciaria do tipo LD com maior homogeneidade entre os grãos se comparado a escória do tipo EAF.

A incorporação de escória de aciaria do tipo LD nas misturas asfálticas (M2 e M3) contribuiu para um aumento no valor do teor de projeto. Devido ao fato da escória possuir maior porosidade do que o agregado convencional utilizado é necessária maior quantidade de ligante asfáltico para o preenchimento dos vazios e recobrimento dos grãos do resíduo siderúrgico, resultando em maior consumo de CAP, o que leva a maiores valores de TP. Fazendo-se uma análise preliminar de custos, parte do que se economiza com a redução do preço do agregado seria atenuado com o aumento do teor de ligante, devendo-se neste caso, destacar o ganho ambiental, com a diminuição do uso do agregado natural e redução da quantidade de escória estocada em pátios siderúrgicos.

#### **4.4 – INFLUÊNCIA DO TIPO DE FÍLER NO VOLUME DE VAZIOS**

O filer é um material material de enchimento que tem como objetivo melhorar o desempenho estrutural das misturas betuminosas. As propriedades da camada asfáltica de pavimentos estão diretamente relacionadas com o tipo e o teor de filer (Cavalcante e Soares, 2001).

A utilização do filer alternativo de rejeito de minério de ferro em substituição ao filer natural utilizado em misturas compostas por escória de aciaria (M2 e M3), resultou em decréscimo do volume de vazio para todos os teores de ligante, com uma diferença de até 15,2% para o teor de CAP de 6,5%, conforme mostrado na Figura 4.17.

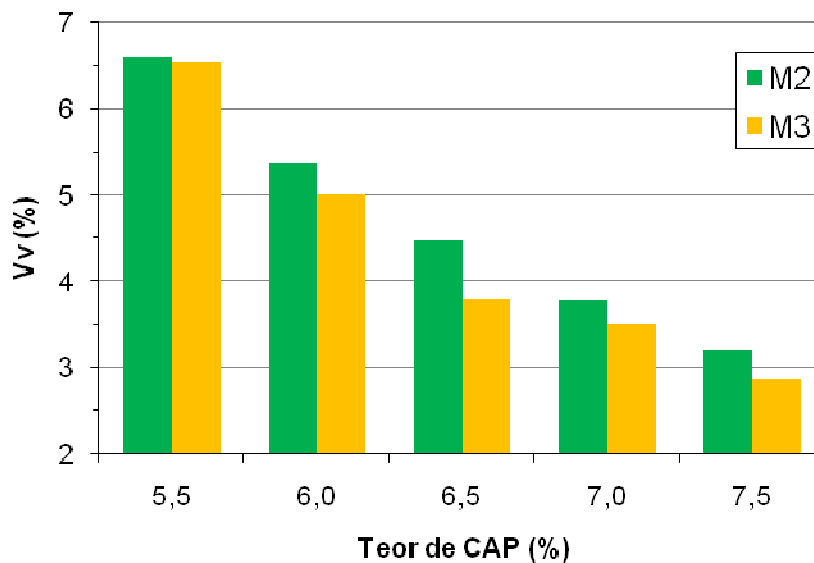


Figura 4.17 – Comparação da variação do Vv com o teor de CAP para as misturas M2 e M3

Comparativamente as misturas M2 e M3, as variações nos valores de Vv encontrados para as misturas M4 e M1 não apresentaram uma tendência de redução de vazios ao substituir o filer convencional. Ao trocar o filer natural pelo rejeito, apenas os teores de 5,0% e 5,5% de CAP apresentaram redução do Vv, sendo encontrado uma variação de até 9,4% para teores de 5,0% de ligante. As misturas com teores de 4,5%, 6,0% e 6,5% tiveram seus Vv aumentados após substituir o filer convencional pelo alternativo (Figura 4.18).

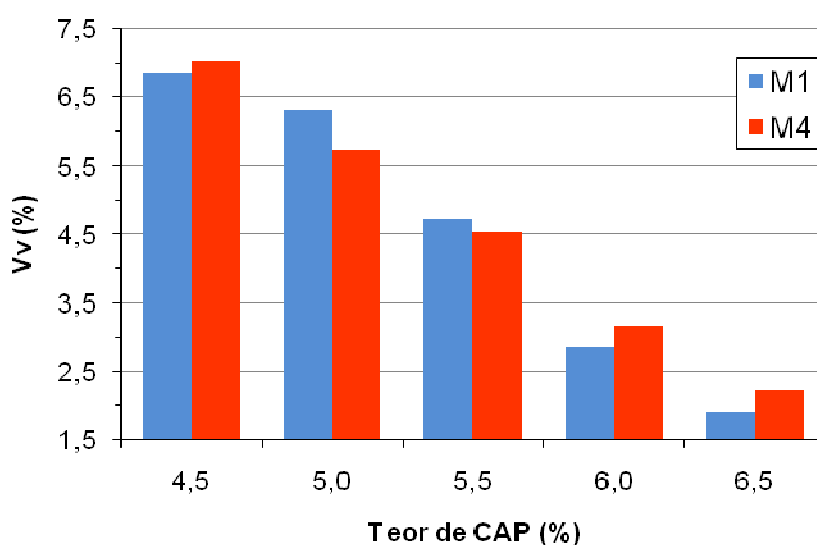


Figura 4.18 – Comparação da variação do Vv com o teor de CAP para as misturas M1 e M4

## Capítulo 5

---

---

### RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de módulo de resiliência (MR), resistência à tração estática por compressão diametral (RT), fadiga por compressão diametral a tensão controlada e deformação permanente por compressão axial (creep estático) de todas as misturas utilizadas nesta pesquisa. Os procedimentos adotados para cada tipo de ensaio estão descritos no item 3.5.

Na Tabela 5.1 está disposto a quantidade de ensaios realizados para a caracterização mecânica das misturas asfálticas. Algumas amostras apresentaram resultados insatisfatórios ou inconsistentes em determinados ensaios, sendo as mesmas excluídas das análises e não quantificadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Quantidade de amostras utilizadas para caracterização mecânica das misturas

Mistura	Ensaio Mecânico				Total de amostras
	MR	RT	Fadiga	Creep Estático	
M1	20	18	8	6	52
M2	25	25	8	4	62
M3	31	30	8	5	74
M4	30	30	9	5	74
M5	-	15	-	-	15
M6	-	15	-	-	15
Total	106	133	33	20	292

#### 5.1 – MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Na Figura 5.1 são visualizados os resultados de módulo de resiliência determinados para a mistura comparativa (M1) e a Tabela 5.2 apresenta os resultados médios dos módulos



de resiliência (MR), bem como o desvio padrão (DP) e o número de amostras ensaiadas (n) para cada teor de ligante.

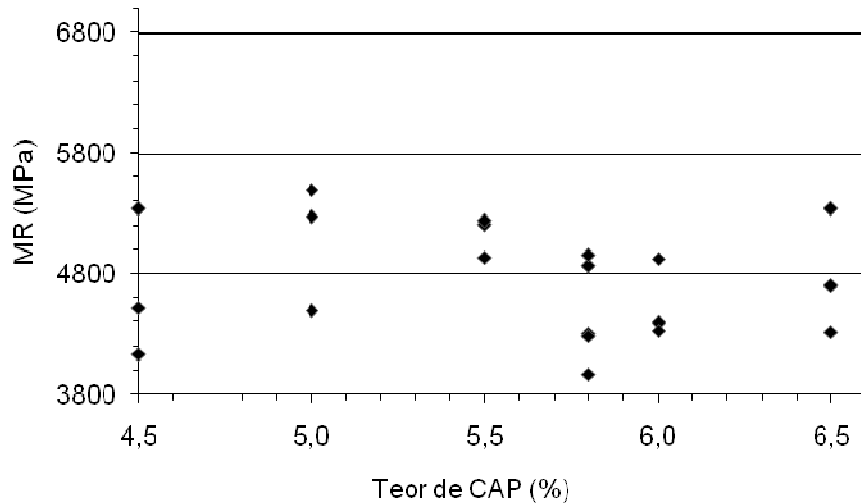


Figura 5.1 – Valores de MR obtidos para a mistura M1

Tabela 5.2 – Valores médios do módulo de resiliência para a mistura M1 a 25°C

Teor de CAP (%)	MR (MPa)	DP (MPa)	Número de amostras (n)
4,5	4664	616	3
5,0	5087	529	3
5,5	5128	165	3
5,8	4478	420	5
6,0	4550	327	3
6,5	4788	514	3

Em relação a média dos valores da Tabela 5.2 para a mistura M1, observa-se que o aumento do teor de CAP de 4,5% para 5,5% levou a um acréscimo no valor de MR. Para variações no teor de CAP de 5,5% para 6,0% houve uma diminuição do valor do módulo de resiliência e novamente um aumento do valor de MR com o aumento do valor de CAP de 6,0% para 6,5%. O maior valor médio de MR encontrado foi para a mistura com teor de CAP de 5,5% e o menor valor para o teor de CAP de 5,8%. A mistura com 4,5% de ligante apresentou as maiores variações dos valores de MR em relação a média dos valores.

As dispersões dos valores de módulo de resiliência da mistura M2 (80% de escória) são apresentados na Figura 5.2 e na Tabela 5.3 estão dispostos os valores médios de MR encontrados para cada teor de ligante asfáltico.

Percebe-se pelos resultados da Tabela 5.2 uma tendência de queda nos valores de módulo de resiliência com o aumento do teor de ligante de 5,5% para 6,0% e de 6,5% para 7,5% e um aumento do valor do MR para variações de CAP nas misturas de 6,0% para 6,5%. Pode-se considerar que essa convergência de menores valores de MR com o aumento do teor de CAP se deve ao fato de que a mistura tem a sua rigidez diminuída com o aumento de teor de ligante na mesma.

As misturas com maiores valores de desvio padrão foram aquelas com baixo teor de CAP (5,5% e 6,0%), onde a dispersão dos resultados foi mais significativa em relação as misturas com elevados teores de CAP. Castelo Branco (2004) supõe que para baixos teores de ligante o mesmo penetra nos poros da escória graúda, faltando ligante para o total recobrimento dos agregados. Assim sendo, a heterogeneidade dos agregados da escória possui bastante relevância e influência direta na dispersão de resultados de MR.

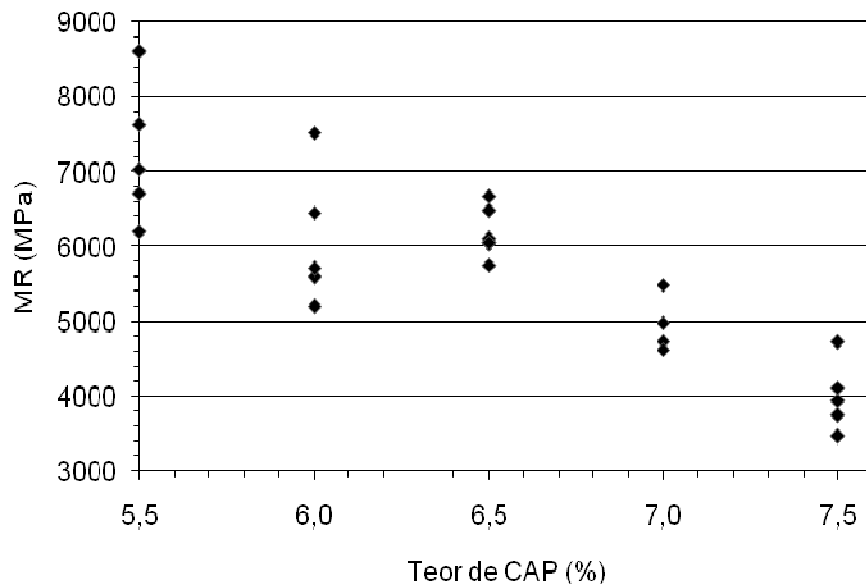


Figura 5.2 – Valores de MR obtidos para a mistura M2

Tabela 5.3 – Valores médios do módulo de resiliência para a mistura M2 a 25°C

Teor de CAP (%)	MR (MPa)	DP (MPa)	Número de amostras
5,5	7241	923	5
6,0	6097	919	5
6,5	6185	334	6
7,0	4957	385	4
7,5	4002	471	5

Em comparação com a mistura M1, para os mesmos teores de CAP, todos os valores médios do módulo de resiliência da mistura M2 foram superiores. Pode-se dizer que a substituição do agregado convencional pela escória de aciaria torna a mistura mais rígida e conseqüentemente leva a maiores valores de MR.

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência da mistura M3 são mostrados na Figura 5.3 e os valores médios apresentados na Tabela 5.4. Os resultados médios de MR obtidos para M3 demonstram que para o aumento do teor de CAP de 5,5% para 6,0%, há um acréscimo no valor do MR. O valor do módulo de resiliência diminui com o aumento do teor de CAP de 6,0% para 7,5%. A maior dispersão dos resultados e o maior valor de MR encontrados foi para a mistura com 6,0% de ligante e o menor valor de MR com as menores variações de resultados foram para a mistura de 7,5% de CAP.

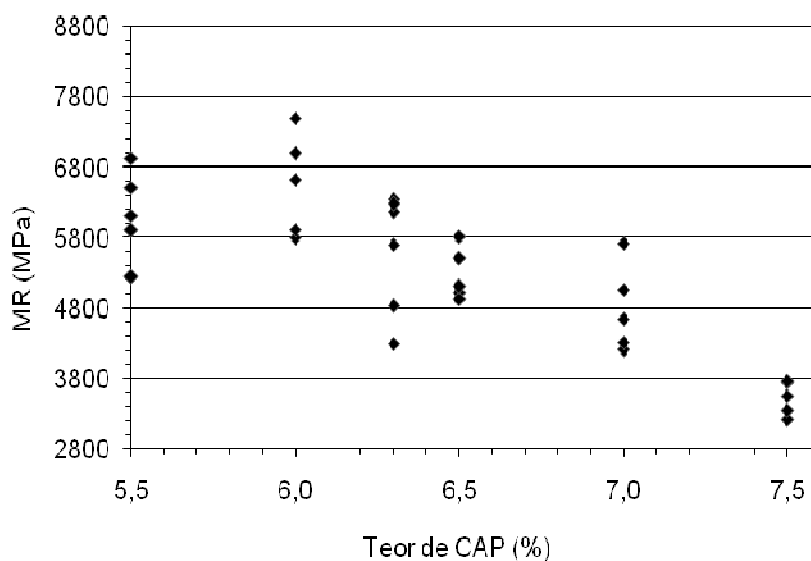


Figura 5.3 – Valores de MR obtidos para a mistura M3

Tabela 5.4 – Valores médios do módulo de resiliência para a mistura M3 a 25°C

Teor de CAP (%)	MR (Mpa)	DP (Mpa)	Número de amostras (n)
5,5	6145	637	5
6,0	6566	716	5
6,3	5603	853	6
6,5	5281	370	5
7,0	4794	618	5
7,5	3523	245	5

Percebe-se que para os mesmos teores de ligante (5,5%, 6,0% e 6,5%), a mistura M3 apresenta valores de módulo de resiliência superiores ao da mistura M1, comportamento semelhante ao da mistura M2 ,visto que as duas misturas possuem 80% de escória de aciaria em suas composições.

A Figura 5.4 e a Tabela 5.5 apresentam os resultados de módulo de resiliência obtidos para a mistura M4. A maior dispersão dos valores encontrados foi para a mistura com 6,5% de ligante. Em relação aos valores médios de MR, a mistura com 5,5% apresentou o maior valor de MR (4954 Mpa). Os valores de MR das misturas M1 e M4 no teor de projeto (5,8%) podem ser considerados iguais devido à pequena diferença de valores médios encontrados para os mesmos.

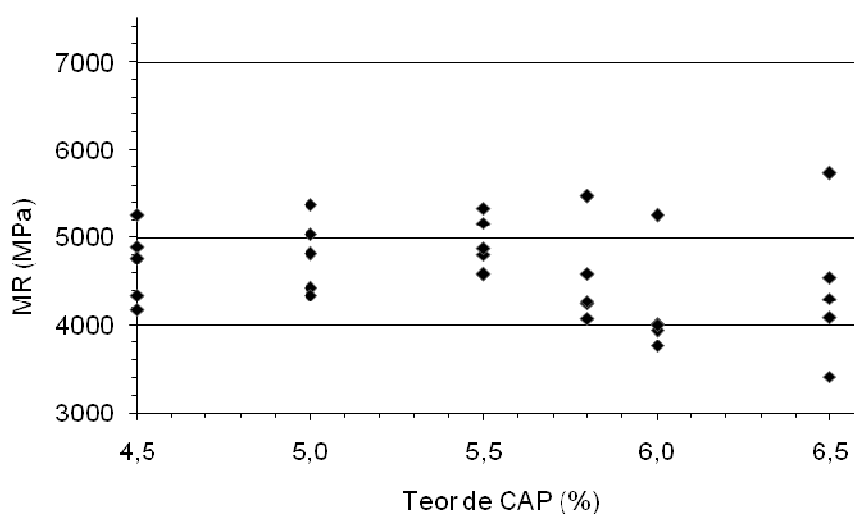


Figura 5.4 – Valores de MR obtidos para a mistura M4

Tabela 5.5 – Valores médios do módulo de resiliência para a mistura M4 a 25°C

Teor de CAP (%)	MR (MPa)	DP (MPa)	Número de amostras
4,5	4688	434	5
5,0	4804	429	5
5,5	4954	296	5
5,8	4530	557	5
6,0	4200	599	5
6,5	4419	850	5

A influência do tipo de filer nos valores de módulo de resiliência das misturas deste estudo pode ser visualizada nas Figuras 5.5 e 5.6. Observa-se que para as misturas contendo escória de aciaria (M2 e M3) há uma diminuição da rigidez das misturas quando o filer utilizado for o rejeito de minério de ferro para todos os teores de ligante, exceto para a mistura com 6,0% de CAP. A maior redução no valor do MR encontrada (15,1%) foi para o teor de 5,5% de ligante. Para as misturas sem escória de aciaria (M1 e M4), a substituição do filer natural pelo rejeito acarreta uma ligeira diminuição nos valores do módulo de resiliência para os teores de CAP com variações de 5,0%, 5,5%, 6,0% e 6,5%, sendo a maior redução de MR encontrada (7,7%) para o teor de 6,0%. Para os teores de 4,5% e 5,8% os valores de MR mantiveram-se praticamente constantes, com variações máximas de MR na ordem de 1,2%.

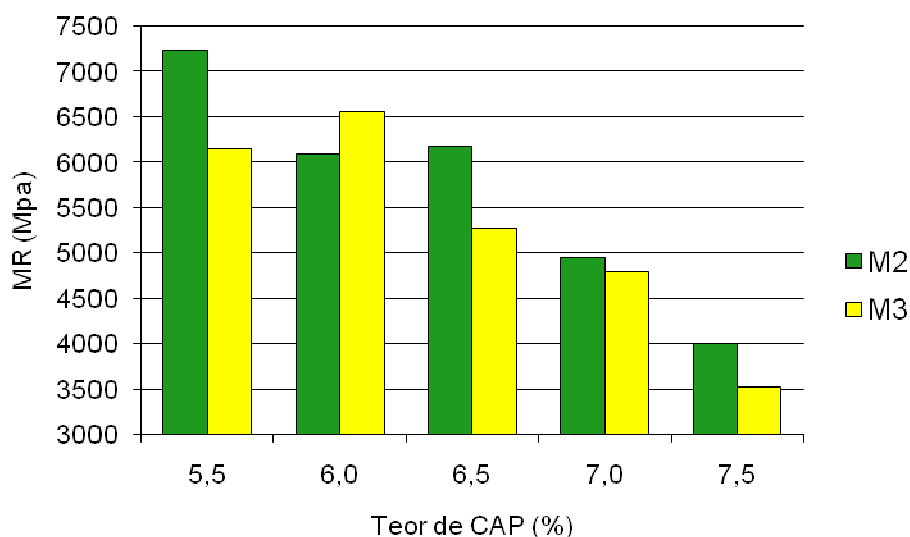


Figura 5.5 – Valores de MR das misturas contendo escória com filer convencional (M2) e com rejeito de minério de ferro (M3)

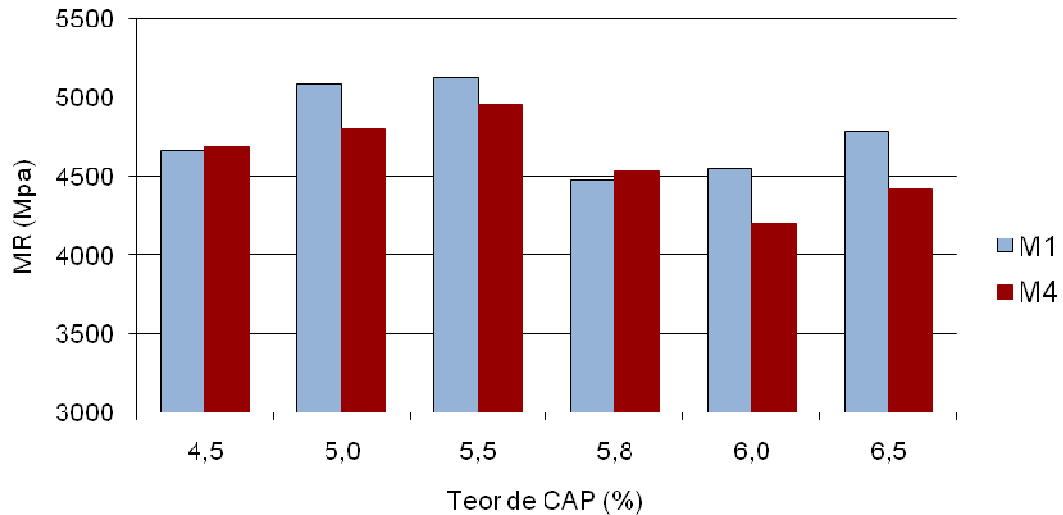


Figura 5.6 – Valores de MR das misturas contendo agregado natural com filer convencional (M1) e com rejeito de minério de ferro (M4)

Segundo Cavalcante e Soares (2001), as propriedades físicas e químicas de cada tipo de filer tem influência direta no desempenho mecânico das misturas betuminosas. A diminuição da concentração volumétrica do sistema filer-betume (C), definida pela expressão 5.1, conduz a um aumento dos volumes de poros e maior afastamento das partículas dos agregados na mistura, resultando em redução da rigidez da mesma. A Tabela 5.6 apresenta a concentração (C) das misturas deste estudo, sendo que as misturas contendo rejeito de minério de ferro (M3 e M4) apresentam menores valores de C em relação as misturas com filer convencional (M1 e M2) devido a maior densidade do rejeito.

$$C = \frac{1}{\frac{\%a}{\%f} \times \frac{D_f}{D_{CAP}} + 1} \quad (5.1)$$

Onde:

C = concentração volumétrica;

% a = porcentagem em peso de ligante asfáltico na amostra total;

% f = porcentagem em peso de filer na amostra total;

$D_f$  = densidade do filer;

$D_{CAP}$  = densidade do ligante asfáltico.

Tabela 5.6 – Concentração volumétrica do sistema fíler-betume (C) das misturas estudadas

Mistura	Teor de asfalto (%)						
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
M1	0,318	0,294	0,274	0,256	0,240	-	-
M2	-	-	0,274	0,256	0,240	0,226	0,213
M3	-	-	0,202	0,187	0,175	0,164	0,154
M4	0,238	0,219	0,202	0,187	0,175	-	-

Os resultados médios encontrados para o módulo de resiliência das misturas deste estudo foram comparados com os das misturas de CBUQ analisadas por Castelo Branco (2004), conforme mostrado na Tabela 5.7, pois a pesquisa desenvolvida pela citada autora é semelhante à linha de pesquisa adotada para o presente trabalho. As misturas dosadas no teor de projeto desta pesquisa apresentaram valores de módulo de resiliência muito superiores aos das misturas estudadas por Castelo Branco (2004), a autora utilizou uma escória com valores de índice de forma e abrasão Los Angeles inferiores à escória utilizada neste estudo, o que pode ter contribuído para menores valores de MR.

Tabela 5.7 – Comparação dos resultados médios de MR das misturas asfálticas

Tipo de mistura	Publicação	TP (%)	MR (MPa)
Convencional	Castelo Branco (2004)	6,4	2051
Convencional (M1)	Presente estudo	5,8	4478
Mistura com 80% de escória EAD	Castelo Branco (2004)	6,7	2188
Mistura com 80% de escória LD (M2)	Presente estudo	6,5	6185

## 5.2 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Para a mistura comparativa M1 foram realizados três ensaios para cada teor de ligante e para as demais misturas foram executados cinco ensaios por teor de ligante, sendo o resultado médio de RT a média aritmética. Os resultados médios de resistência à tração indireta por compressão diametral (RT) e a relação MR/RT obtidos para todas as misturas analisadas estão dispostos na Tabela 5.8. Para a mistura M1, as menores dispersões de resultados encontrados foi para o teor de 5,5% e o maior valor médio de RT encontrado (1,45 MPa) foi para a mistura com teor de 5,0% de ligante (Figura 5.7).

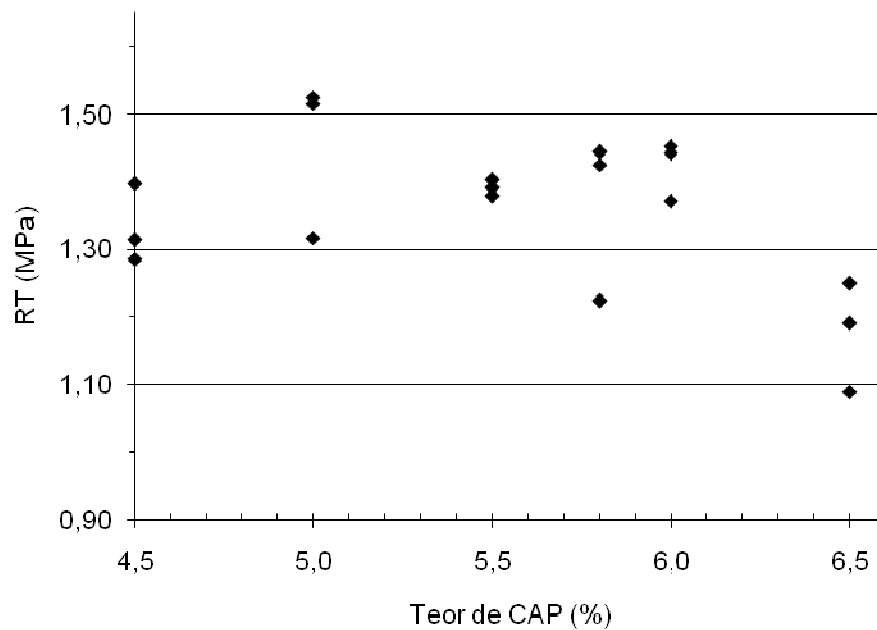


Figura 5.7 – Valores de RT a 25°C da mistura M1 em diferentes teores de CAP

Tabela 5.8 – Resultados médios de resistência a tração obtidos para todas as misturas a 25 °C

Mistura comparativa - M1						
Teor de CAP (%)	4,5	5,0	5,5	5,8	6,0	6,5
RT médio (MPa)	1,33	1,45	1,39	1,36	1,42	1,18
Desvio Padrão (MPa)	0,06	0,12	0,01	0,12	0,04	0,08
MR/RT	3507	3508	3689	3293	3204	4058
Mistura com 80% escória - M2						
Teor de CAP (%)	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	-
RT médio (MPa)	1,54	1,39	1,27	1,04	0,93	-
Desvio Padrão (MPa)	0,15	0,15	0,08	0,05	0,06	-
MR/RT	4702	4386	4870	4766	4303	
Mistura com 80% de escória e 6% de rejeito - M3						
Teor de CAP (%)	5,5	6,0	6,3	6,5	7,0	7,5
RT médio (MPa)	1,44	1,38	1,31	1,24	1,06	0,96
Desvio Padrão (MPa)	0,07	0,13	0,08	0,07	0,04	0,05
MR/RT	4267	4758	4277	4259	4523	3670
Mistura com 6% de rejeito - M4						
Teor de CAP (%)	4,5	5,0	5,5	5,8	6,0	6,5
RT médio (MPa)	1,38	1,36	1,35	1,29	1,31	1,38
Desvio Padrão (MPa)	0,11	0,10	0,09	0,08	0,11	0,08
MR/RT	3397	3532	3670	3512	3206	3202



Como era esperado, para maiores teores de ligante, menores foram os valores de RT encontrados para a M2, conforme mostrado na Figura 5.8. A maior concentração de ligante na mistura tende a tornar a massa asfáltica mais flexível, diminuindo o intertravamento entre as partículas de agregados pelo aumentando do afastamento dos grãos contituíntes, conseqüentemente, reduzindo a resistência à tração estática da mesma. Em relação à mistura comparativa, para os mesmo teores de CAP (5,5% e 6,5%) a M2 apresentou maiores valores de RT e apenas para a mistura de 6,0% apresentou um valor de resistência a tração ligeiramente menor. Observa-se que os menores desvios padrões foram apresentados pelas misturas com altos teores de ligante (7,0% e 7,5%) e as misturas com 5,5% e 6,0% apresentaram as maiores e o mesmo valor de DP. Para a mistura M2, a relação MR/RT variou entre 4303 a 4840.

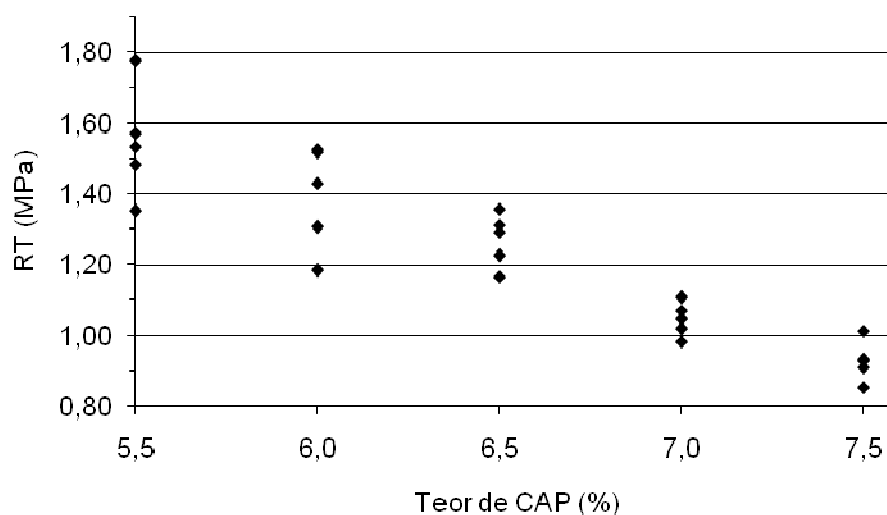


Figura 5.8 – Valores de RT a 25°C da mistura M2 em diferentes teores de CAP

A mistura M3 (80% de escória e 6% de rejeito de minério de ferro) apresentou uma tendência de queda no valor da RT com o aumento do teor de ligante asfáltico (Figura 5.9). O maior valor de desvio padrão apresentado foi para a mistura com 6,0% de teor de CAP. A mistura M3 apresentou valores superiores de RT em relação à mistura comparativa para os mesmo teores de ligante (5,0% e 6,0%), exceto para o teor de 6,0% de CAP, comportamento semelhante e também observado para a mistura M2. A relação MR/RT da mistura M3 variou entre 3670 a 4658.

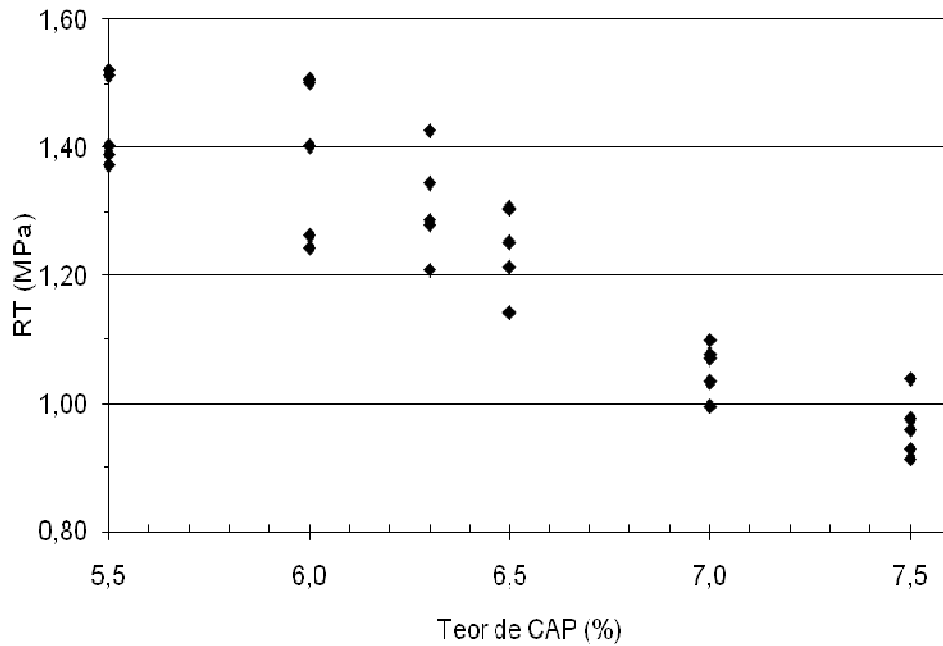


Figura 5.9 – Valores de RT a 25°C da mistura M3 em diferentes teores de CAP

Para a mistura M4, o maior valor médio de RT encontrado foi para as misturas com teor de 4,5% e 6,0% de CAP. A relação MR/RT variou entre 3202 a 3670 e o maior valor de desvio padrão encontrado foi para as misturas contendo 4,5% e 6,0% de ligante asfáltico. Analisando a Figura 5.10, não foi observada uma tendência de queda nos valores de resistência à tração estática para a mistura M4, conforme verificado para as misturas M2 e M3.

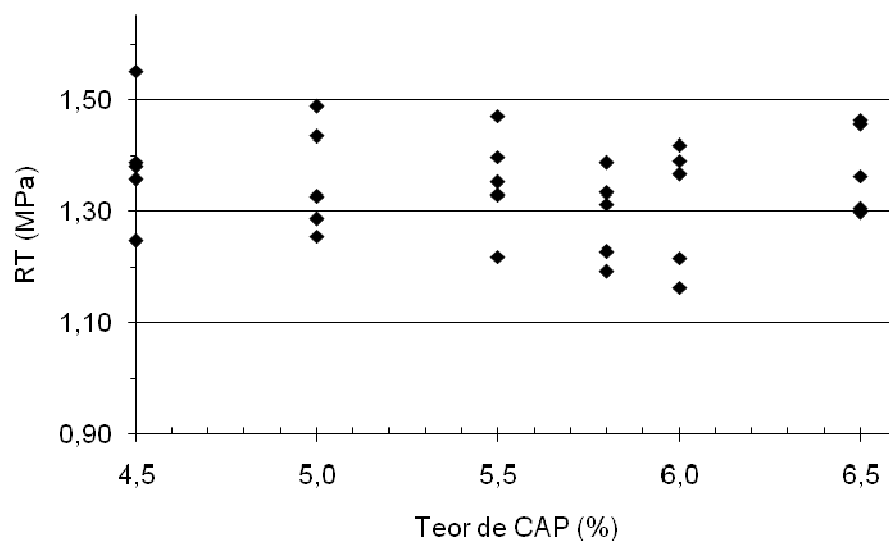


Figura 5.10 – Valores de RT a 25°C da mistura M4 em diferentes teores de CAP

Através dos resultados obtidos, evidentemente pode-se perceber que os valores médios de resistência à tração estática para as misturas contendo escória de aciaria (M2 e M3) tendem a convergir para menores valores. Essa tendência não foi constatada para as misturas contendo o agregado convencional (M1 e M4), que é mais homogêneo e menos poroso em relação à escória. As Figuras 5.7 a 5.10 apresentam as variações dos resultados de resistência à tração estática determinados para todas as misturas.

Para fins de comparação, a Tabela 5.9 apresenta os valores médios RT determinados para as misturas deste trabalho com valores de misturas estudadas em pesquisas anteriores, sendo que todas são misturas do tipo CBUQ, dosadas pela metodologia Marshall na faixa C do DNIT com aplicação de 50 golpes por face de cada CP ensaiado.

Observa-se pelos resultados que todas as misturas desta pesquisa apresentaram um desempenho mecânico superior às misturas citadas de outros trabalhos, no que diz respeito à resistência a tração estática por compressão diametral. Tanto as misturas contendo escória de aciaria (M2 e M3), quanto às misturas contendo rejeito de minério de ferro (M3 e M4) apresentam valores de RT satisfatórios e superiores ao limite mínimo de 0,65 MPa especificado pela norma DNIT-ES 031/2006 para camada de rolamento de pavimentos flexíveis.

Tabela 5.9 – Comparação de valores médios de RT obtidos para misturas de CBUQ

Misturas de CBUQ	Teor de projeto (%)	RT médio (MPa)
M1	5,8	1,36
M2	6,5	1,27
M3	6,3	1,31
M4	5,8	1,29
Cavalcante e Soares (2001) Mistura - 5% de filer pó de pedra	6,1	1,00
Castelo Branco (2004) Mistura convencional	6,4	0,75
Castelo Branco (2004) Mistura - 80% de escória	6,7	0,76

A influência do tipo de filer nos valores de RT analisados pode ser melhor visualizado nas Figuras 5.11 e 5.12.

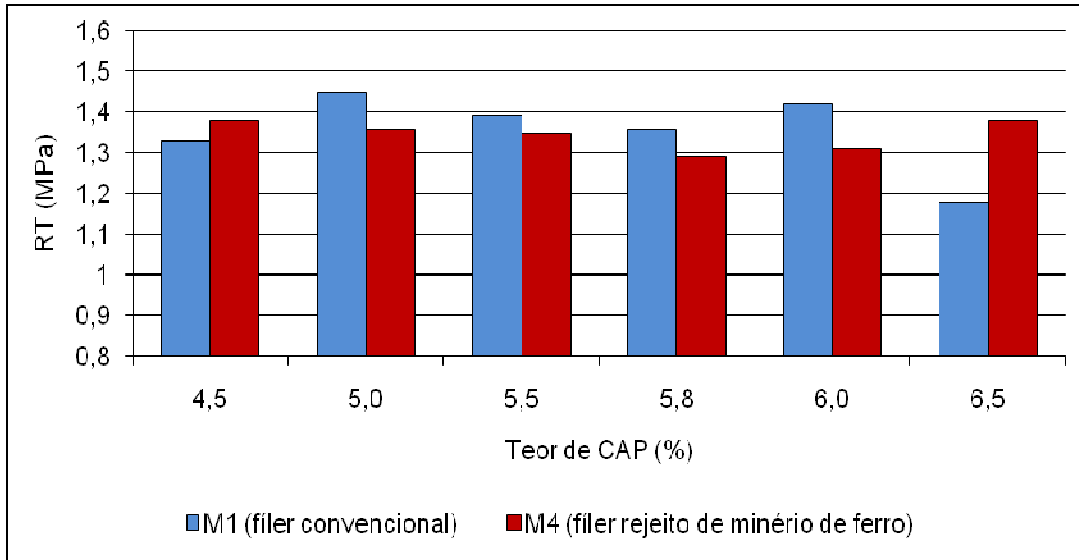


Figura 5.11 – Valores médios de RT a 25°C das misturas sem escória com filer convencional (M1) e com rejeito de minério de ferro (M4)

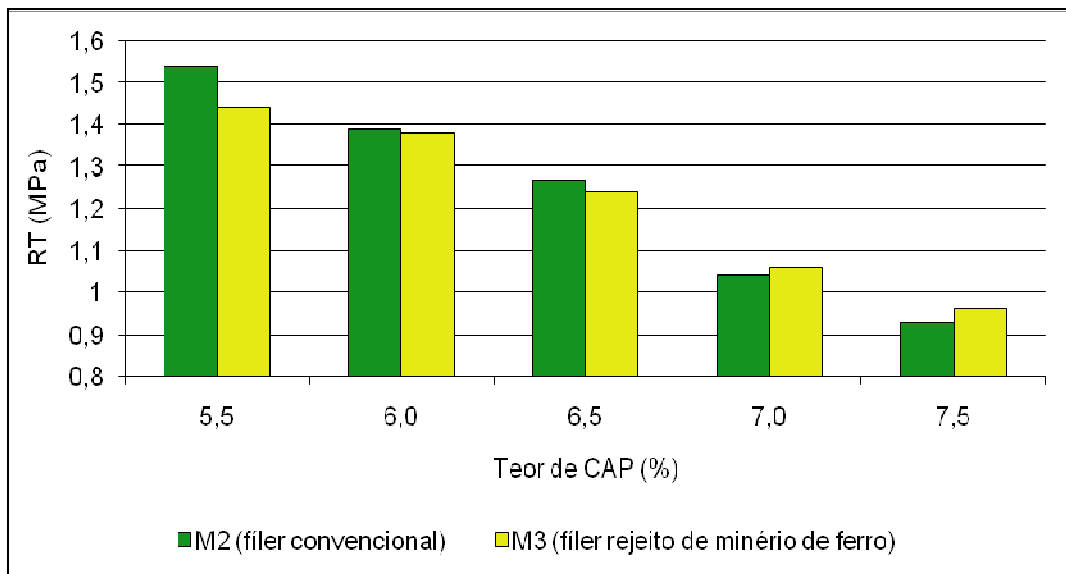


Figura 5.12 – Valores médios de RT a 25°C das misturas contendo escória com filer convencional (M2) e com rejeito de minério de ferro (M3)

Para as misturas que não contêm escória de aciaria na sua composição (M1 e M4), a substituição do filer natural de pó de pedra pelo rejeito de minério de ferro proporcionou

uma diminuição nos valores de RT para as misturas com teor de CAP de 5,0%, a 6,0% e um aumento da resistência à tração para as misturas com teor de ligante de 4,5% e 6,5%. Para a mistura no teor de projeto a redução no valor da RT foi de 5,2% e para a mistura com teor de CAP de 6,5% houve um aumento de 17% no valor da RT. Vale ressaltar que mesmo havendo uma redução da resistência à tração ao substituir o filer natural pelo rejeito para as misturas no TP, o valor da RT continua sendo aceitável, com desempenho semelhante ou superior ao das misturas convencionalmente empregadas na camada de rolamento. Nota-se pela Figura 5.12 que para as misturas contendo escória de aciaria LD (M2 e M3), a troca do filer natural pelo rejeito de mineração propiciou uma redução no valor da RT para as misturas com teor de CAP de 5,5%, 6,0% e 6,5%. O valor da RT foi majorado para as misturas com teor de ligante de 7,0% e 7,5%. A mistura no teor de 5,5% de ligante sofreu uma redução de até 6,5% no valor da resistência à tração estática.

Com o intuito de verificar a influência do teor de filer alternativo de rejeito de minério de ferro na resistência à tração estática das misturas betuminosas, foram dosadas mais duas misturas asfálticas com diferentes teores de filer, sendo denominadas de M5 (4% de filer alternativo) e M6 (2% de filer alternativo), conforme apresentado na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Porcentagem em peso dos agregados utilizados nas misturas asfálticas com filer de rejeito de minério de ferro

Peneiras (mm)	Mistura M4		Mistura M5		Mistura M6	
	Faixa de projeto % passa	Composição (6% de filer)	Faixa de projeto % passa	Composição (4% de filer)	Faixa de projeto % passa	Composição (2% de filer)
19,1	100	-	100	-	100	-
12,7	90	Brita 1	90	Brita 1	90	Brita 1
9,5	80	Brita 1	80	Brita 1	80	Brita 1
4,8	58	Brita 0	58	Brita 0	58	Brita 0
2,0	36	Pó de pedra	36	Pó de pedra	36	Pó de pedra
0,4	17	Pó de pedra	17	Pó de pedra	17	Pó de pedra
0,2	10	Pó de pedra	10	Pó de pedra	10	Pó de pedra
0,07	6	Pó de pedra	4	Pó de pedra	2	Pó de pedra

De certa forma, o aumento do teor de filer de 2% para 6% na composição das misturas induz a maiores valores de RT (Figura 5.13). Somente para as misturas com 6,0% de CAP o valor da resistência à tração estática diminuiu ao aumentar o teor de filer em peso dos agregados de 2% para 4%. As misturas dosadas com 6% de filer alternativo, como é o caso da M4, apresentaram os maiores valores de RT em relação as misturas M5 e M6

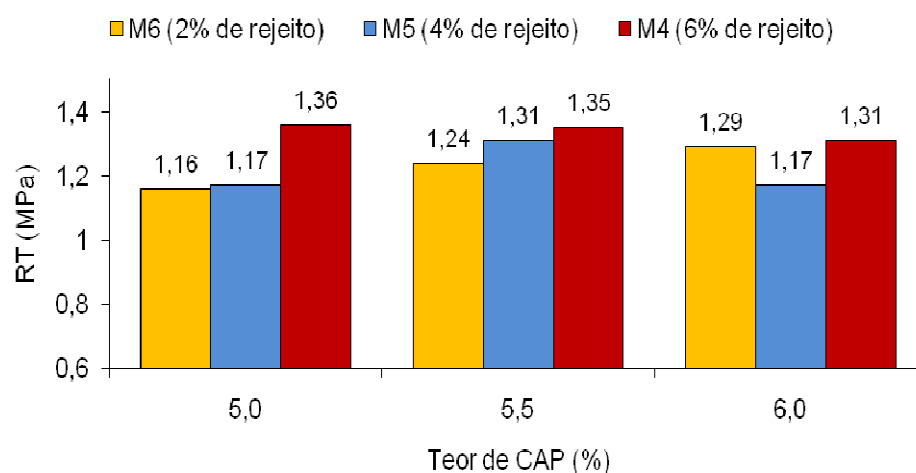


Figura 5.13 – Valores médios de RT das misturas contendo filer de rejeito de minério de ferro em diferentes teores

Também foram realizados ensaios de resistência à tração em corpos-de-prova que foram submetidos previamente ao ensaio de módulo de resiliência visando analisar se há alteração significativa nos valores de RT das misturas após o ensaio de MR. A Tabela 5.11 apresenta os valores médios de resistência à tração de amostras virgens (não submetidas ao ensaio de módulo de resiliência), definido como “RT”, e de corpos-de-prova que foram usados no ensaio de módulo de resiliência, definido como “RT<sub>m</sub>”. Os resultados demonstram que para as misturas no teor de projeto estudadas não houve alteração significativa nos valores de RT, sendo que, para a mistura M3 houve uma redução de 12,2% no valor da resistência à tração.

Marques (2004) também realizou ensaios de resistência à tração estática em misturas asfálticas e os resultados indicaram que o valor da RT não é alterado quando se utiliza corpos-de-prova que foram usados no ensaio de módulo de resiliência.

Tabela 5.11 – Valores médios de RT de amostras virgens e após ensaio de MR

Mistura	Teor de projeto (%)	RT (MPa)	RT <sub>m</sub> (MPa)
M1	5,8	1,36	1,35
M2	6,5	1,27	1,29
M3	6,3	1,31	1,15
M4	5,8	1,29	1,31

### 5.3 – ENSAIO DE FADIGA

Para determinação da vida de fadiga das misturas, as amostras foram submetidas a um nível de tensão que variou entre aproximadamente 15% a 70% do valor da RT, estes resultados encontram-se de forma detalhada no Anexo I. A temperatura de ensaio de vida de fadiga deste estudo foi de 25 °C para todos os corpos-de-prova. Na Tabela 5.12 estão dispostos as constantes (k e n) e o coeficiente de regressão linear ( $R^2$ ) obtidos para as curvas de fadiga (Figuras 5.14 a 5.17) das misturas estudadas e expressadas pela Equação 3.6, descrito no item 3.5.3. Os resultados são referentes apenas as amostras dosadas no teor de projeto de cada mistura.

Tabela 5.12 – Parâmetros das curvas de fadiga das misturas analisadas neste estudo

Mistura	k	n	$R^2$
M1	14979	3,51	0,987
M2	17320	3,27	0,929
M3	20795	3,32	0,960
M4	11548	2,41	0,981

A constante n das misturas contendo escória de aciaria (M2 e M3) apresentam valores bastante próximos, o que confere as curvas de fadiga das mesmas um certo paralelismo, ou seja, praticamente a mesma declividade. O valor de K da mistura M3 foi ligeiramente superior ao da mistura M2, indicando que para todas as variações de valores de diferenças de tensões estudadas, a vida de fadiga da mistura M3 é semelhante à mistura M2. Esperava-se que a vida de fadiga da mistura M2 fosse mais elevada em relação a mistura M3, pelo fato de possuir um valor de MR maior que a mistura M3,

esse fato não foi comprovado nos ensaios de fadiga realizados. As Figuras 5.14 a 5.17 apresentam as curvas de fadiga de todas as misturas deste estudo em função da diferença de tensões geradas no centro dos corpos-de-prova.

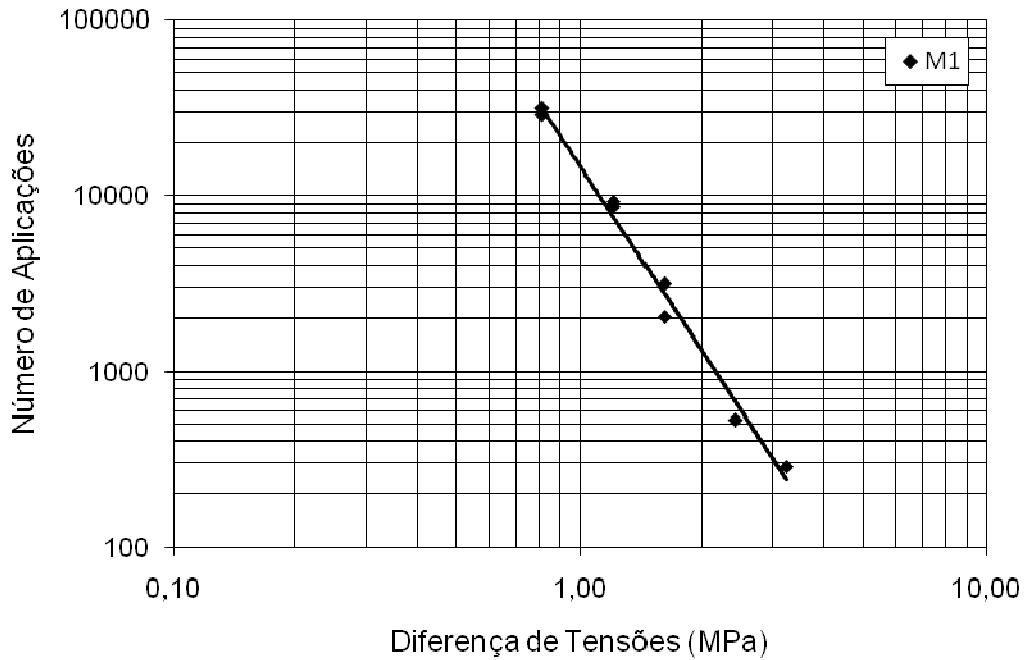


Figura 5.14 – Curva de fadiga da mistura comparativa (M1)

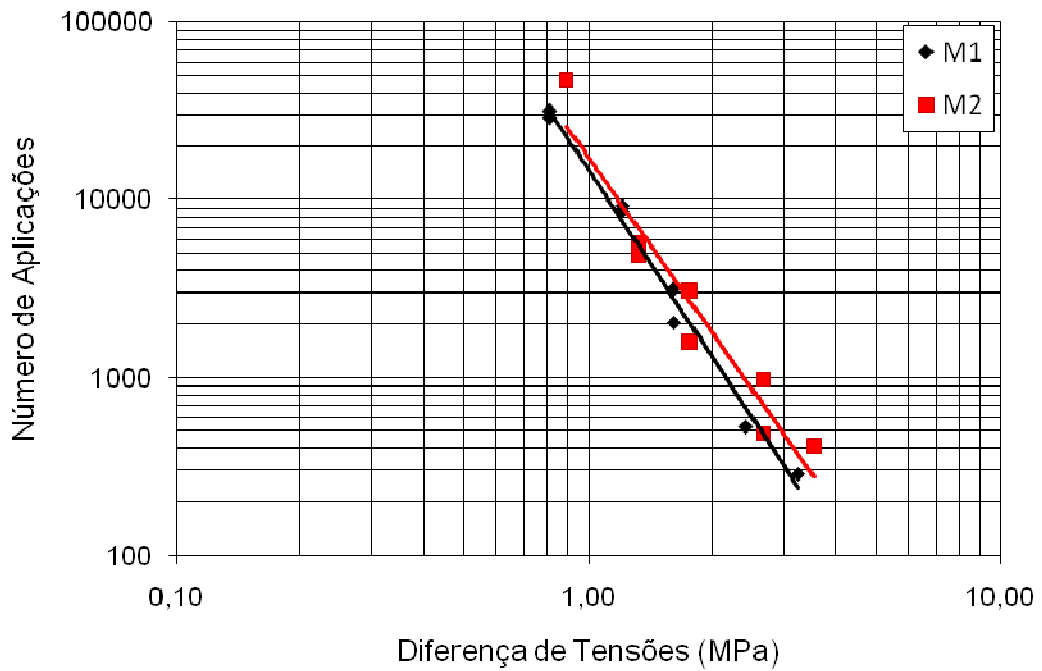


Figura 5.15 – Curva de fadiga das misturas M1 e M2 (80% de escória)



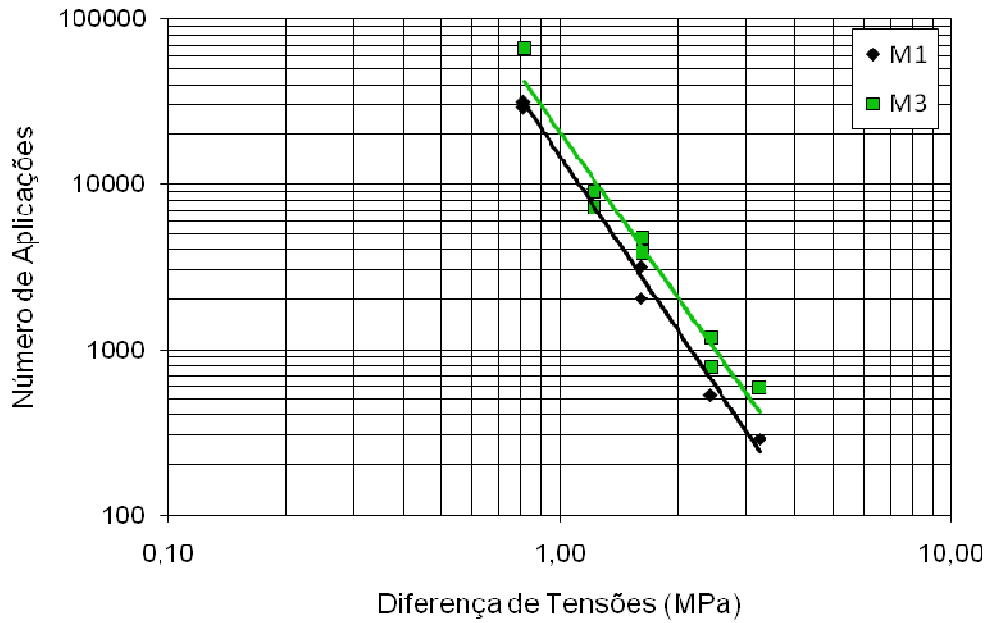


Figura 5.16 – Vida de fadiga das misturas M1 e M3 (80% de escória e 6% de rejeito de minério de ferro)

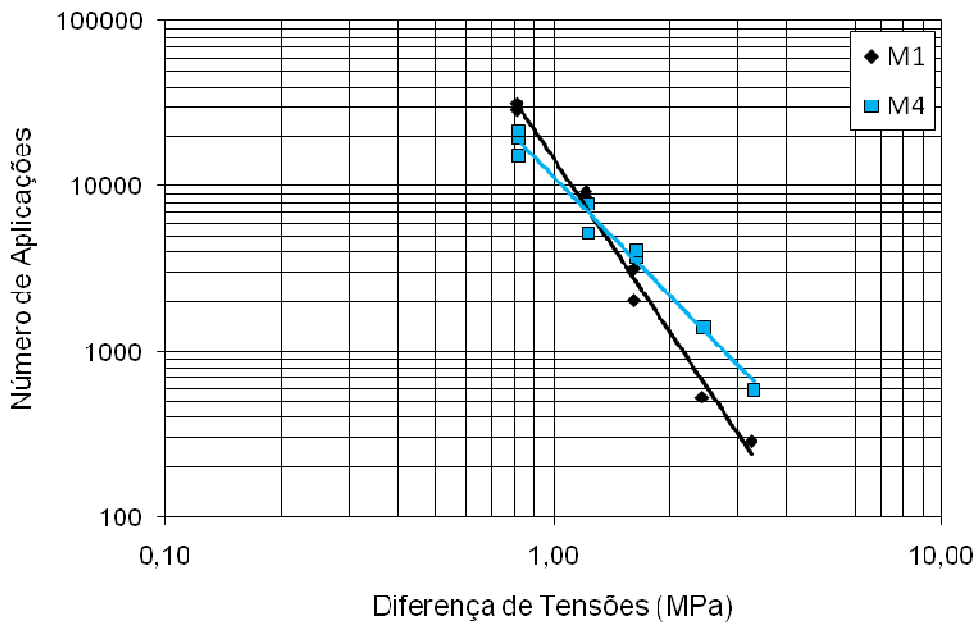


Figura 5.17 – Vida de fadiga das misturas M1 e M4 (6% de rejeito de minério de ferro)

A curva de fadiga da mistura M4 (Figura 5.17) apresenta menor inclinação em relação a mistura M1. Para baixos níveis de tensão e elevado número de aplicações de cargas, a mistura M4 indica vida de fadiga inferior ao da mistura comparativa, porém, para

elevados níveis de tensão, a mesma apresenta um desempenho superior (maior vida de fadiga) ao de todas as misturas analisadas. Era de se esperar que as duas misturas, que possuem praticamente o mesmo valor médio de MR, apresentassem um comportamento de vida de fadiga semelhante, o que não foi comprovado.

Verifica-se pelos resultados demonstrados das misturas sem escória de aciaria que, mantendo-se algumas variáveis constantes (granulometria, agregado graúdo e miúdo, tipo e teor de ligante) e alterando apenas o filer natural pelo rejeito de minério de ferro, a mistura tende a apresentar melhor vida útil ao trincamento por repetições de carregamento para elevados níveis de tensão.

Devido ao fato de possuir o maior valor de  $n$  de todas as misturas, para baixos níveis de tensão e elevados números de aplicação de carga, a mistura M1 tende a apresentar maiores valores de vida de fadiga. Para níveis de tensão elevados, a mistura comparativa (M1) configura-se com o pior desempenho à fadiga, com valores inferiores ao de todas as misturas estudadas. As misturas M1 e M3 tendem a apresentar valores de vida de fadiga muito parecidos para baixos níveis de tensão.

Vale enfatizar que a avaliação do desempenho à fadiga das misturas deve ser feita pela análise de um sistema das camadas constituintes do pavimento e não somente pela curva de fadiga obtida para as misturas, pois as diferenças de tensões geradas dependem da estrutura do pavimento como um todo e do valor da rigidez (MR) de suas respectivas camadas (revestimento e camadas subjacentes). Assim sendo, é apropriado que a avaliação do comportamento da estrutura das misturas possa ser feita para uma mesma conformação de pavimento (Medina e Motta, 2005).

As Figuras 5.18 a 5.20 apresentam uma comparação da curva de vida de fadiga da mistura convencional com as curvas obtidas para as misturas M2, M3 e M4 em função da deformação específica resiliente inicial.

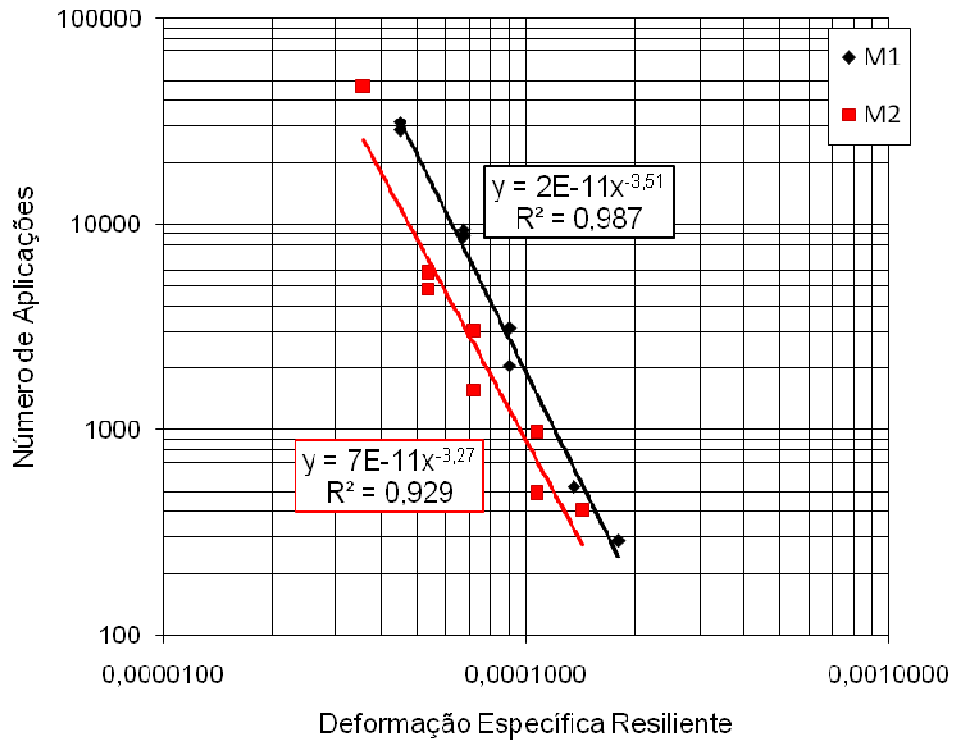


Figura 5.18 – Gráfico vida de fadiga versus deformação específica resiliente das misturas M1 e M2 (80% de escória)

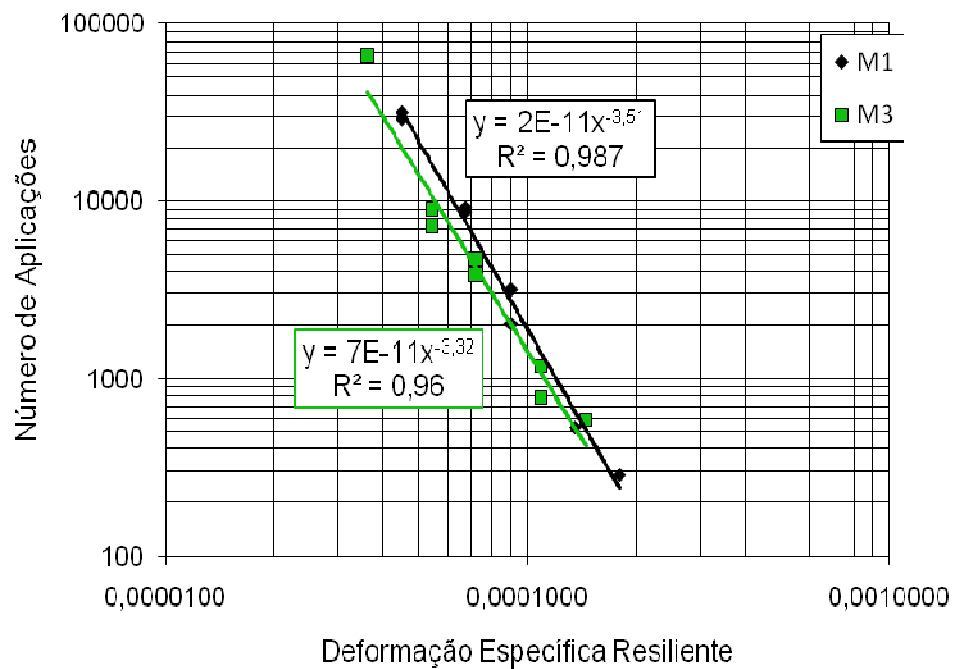


Figura 5.19 – Gráfico vida de fadiga versus deformação específica resiliente das misturas M1 e M3 (80% de escória e 6% de rejeito de minério de ferro)

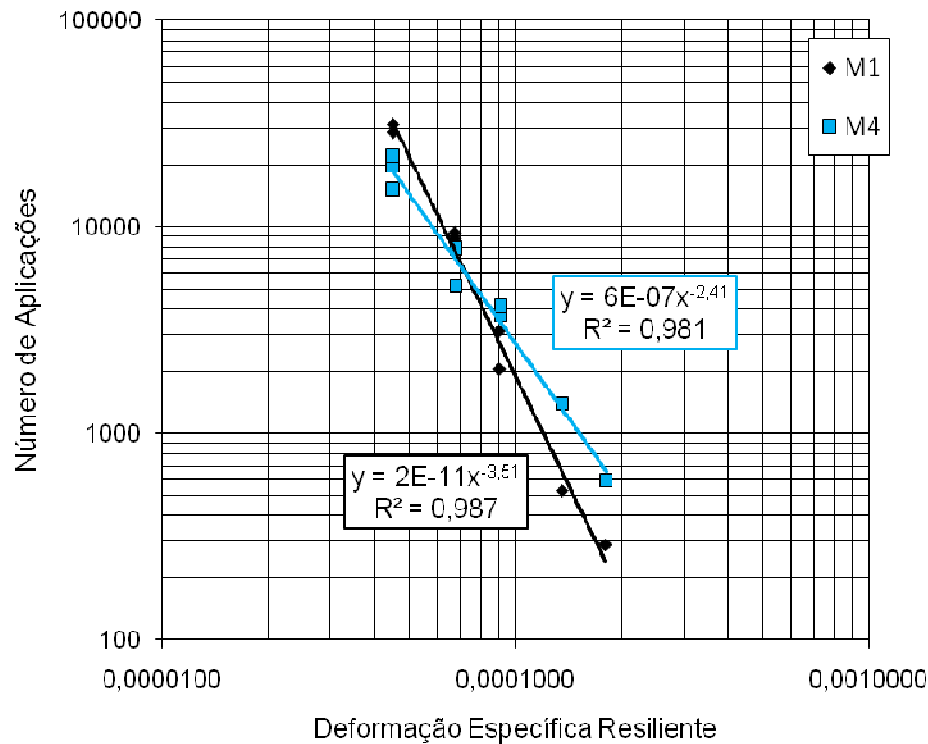


Figura 5.20 – Gráfico vida de fadiga versus deformação específica resiliente das misturas M1 e M4 (6% de rejeito de minério de ferro)

#### 5.4 – ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE (CREEP ESTÁTICO)

O ensaio de deformação permanente foi realizado em corpos-de-prova confeccionados nos teores de projeto correspondentes a cada mistura estudada e os procedimentos seguidos estão descritos detalhadamente no item 3.5.4. As Figuras 5.21 a 5.24 mostram os resultados da deformação específica ao longo do tempo para todas as amostras ensaiadas. Na Tabela 5.13 encontram-se os resultados médios da deformação específica plástica final obtidos para cada tipo de mistura. A princípio, foram realizados 6 ensaios para cada mistura, mas algumas amostras apresentaram resultados e comportamentos irregulares, sendo então excluídas da análise.

O maior valor de desvio padrão encontrado foi para a mistura convencional (M1). Sendo que, a deformação plástica específica variou entre 0,189% a 0,333% da altura. A mistura M3 (80% de escória e 6% de rejeito de minério de ferro) apresentou os menores valores de deformação permanente e desvio padrão. Destaca-se que a mistura M3 apresentou maior rigidez (MR)

dentre todas as mistura. Ao analisar o tipo de filer nas misturas asfálticas, verifica-se pelos resultados obtidos que a substituição do filer natural pelo rejeito de minério de ferro, tanto para as amostras contento escória (M2 e M3) como para as misturas sem escória (M1 e M4), conduz a menores valores de deformação permanente.

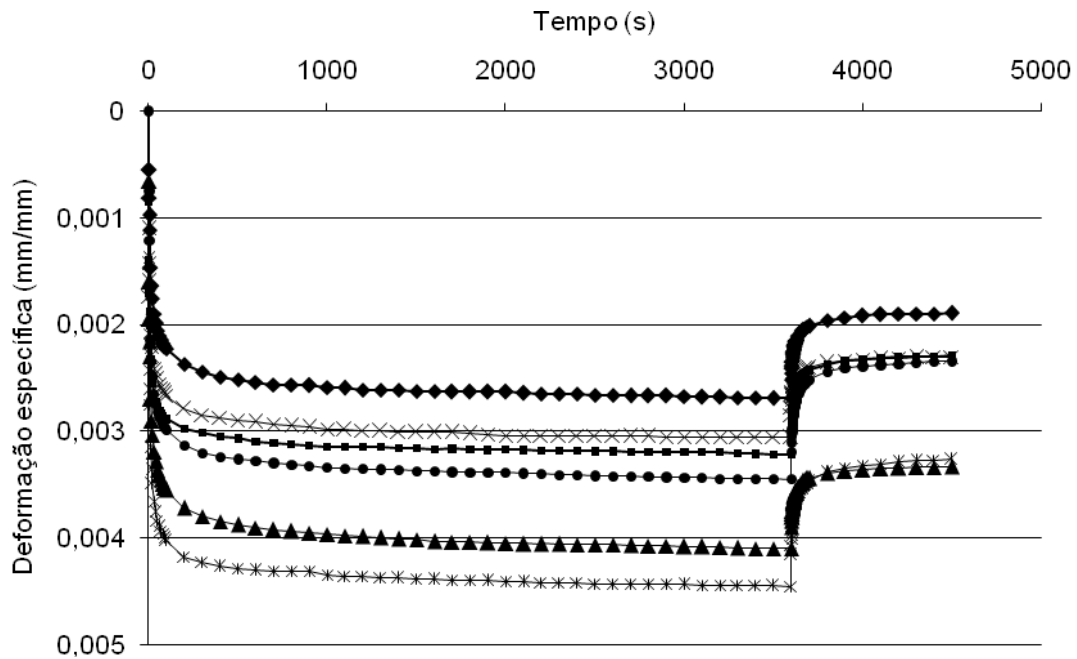


Figura 5.21 – Variação da deformação específica ao longo do tempo para a mistura M1

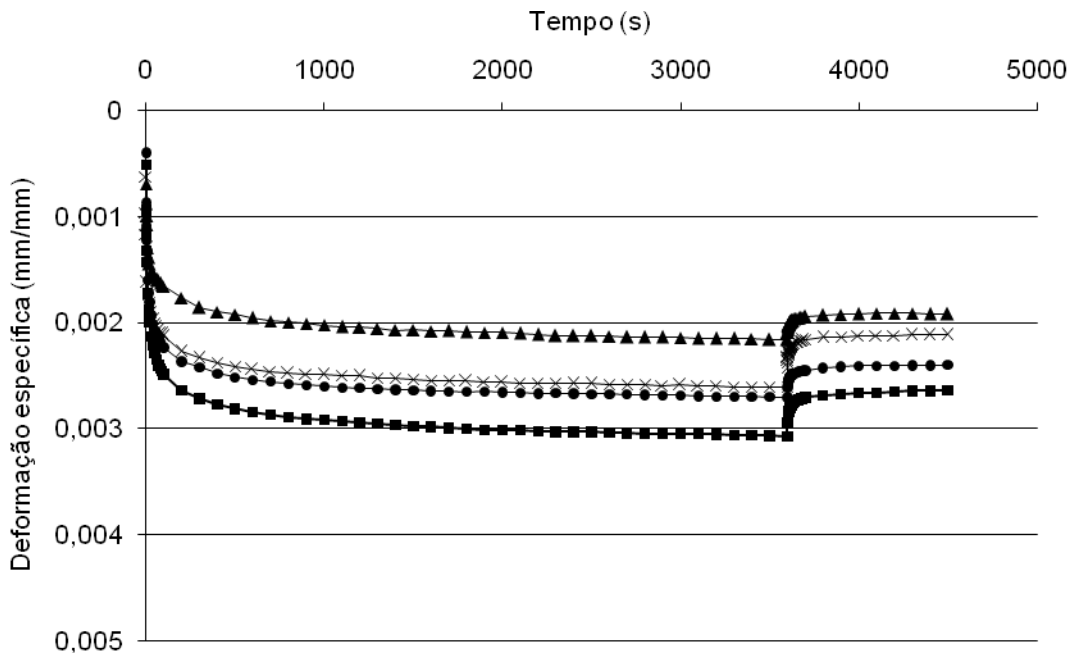


Figura 5.22 – Variação da deformação específica ao longo do tempo para a mistura M2

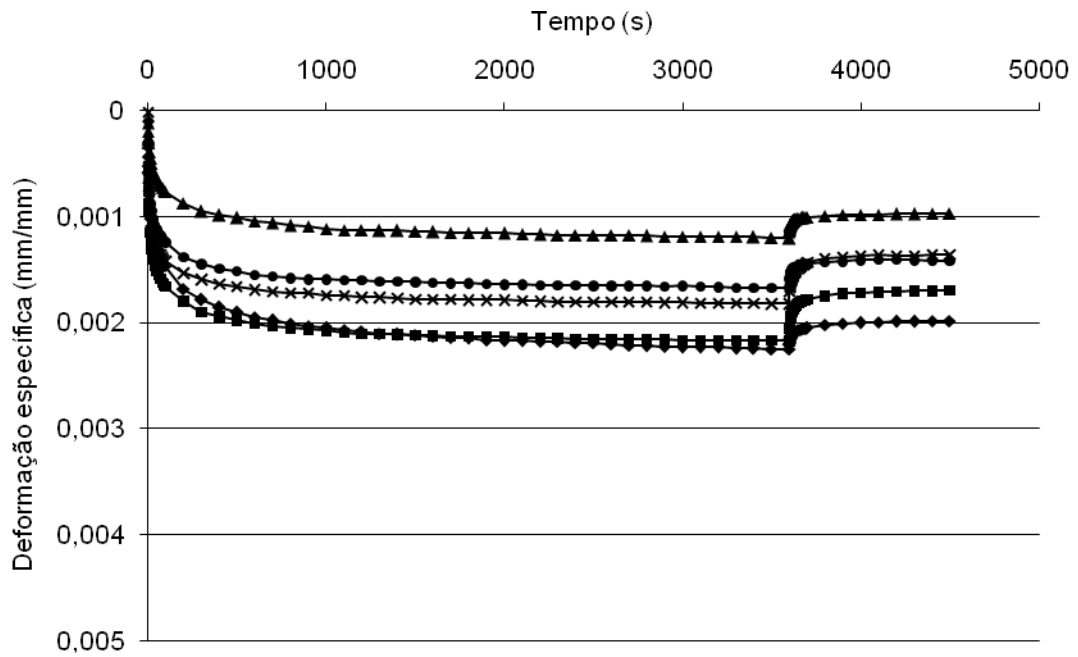


Figura 5.23 – Variação da deformação específica ao longo do tempo para a mistura M3

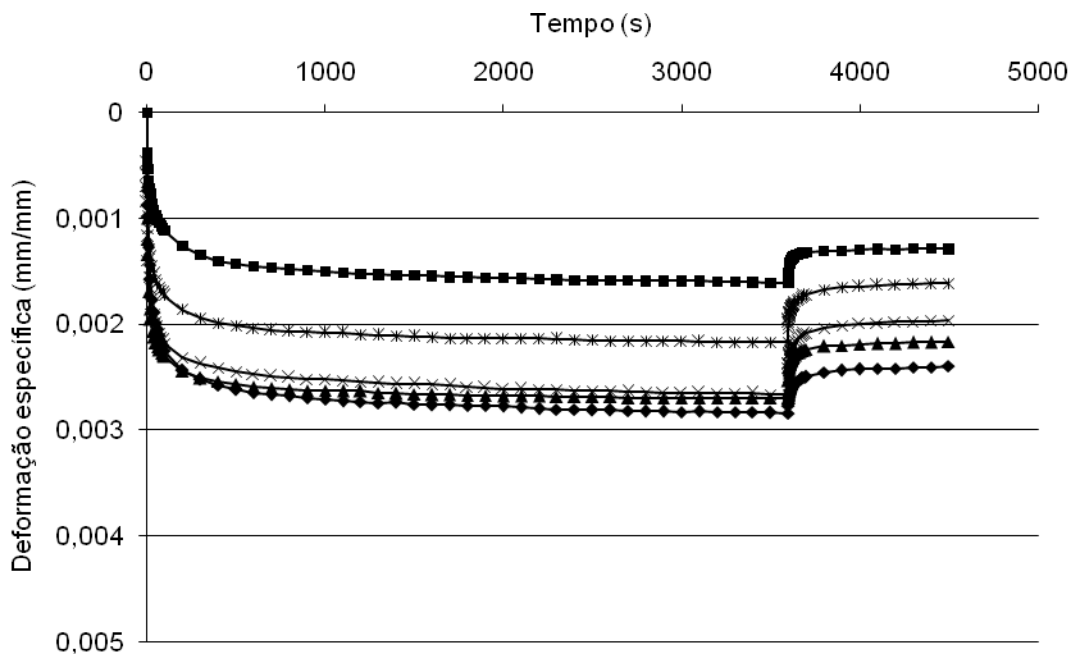


Figura 5.24 – Variação da deformação específica ao longo do tempo para a mistura M4

A princípio, pretendia-se a realização de ensaios de creep estático para vários diferentes teores de ligante asfáltico, afim de analisar a influência do mesmo no comportamento das misturas betuminosas quanto à deformação permanente. Devido a limitação de tempo durante a

realização da pesquisa, só foi possível a execução dos ensaios com amostras nos seus respectivos teores de projeto.

Tabela 5.13 – Resultados da deformação plástica específica das misturas asfálticas deste estudo

Mistura	Teor de CAP (%)	Deformação Específica Plástica (%)	Desvio Padrão (%)	Amostras ensaiadas (n)
M1	5,8	0,257	0,059	6
M2	6,5	0,227	0,032	4
M3	6,3	0,149	0,038	5
M4	5,8	0,189	0,044	5

Segundo Medina e Motta (2005), quanto maior o volume de vazios da mistura e menos consistente for o ligante asfáltico, menor será a resistência à deformação permanente. Os estudos de deformação permanente realizados por Freitas (2007), demonstraram que um maior teor de ligante na mistura contendo escória analisada proporciona um aumento na deformação permanente sofrida pela mesma. A referida autora também encontrou menores valores de deformação permanente para as misturas contendo ligante de maior consistência (menor penetração).

## Capítulo 6

---

---

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da escória de aciaria e do rejeito de minério de ferro em revestimentos asfálticos mostrou-se uma alternativa tecnicamente viável e com ganhos de natureza ambiental.

#### 6.1– CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos por meio de ensaios de laboratório realizados com misturas asfálticas alternativas, utilizando escória de aciaria LD e rejeito de minério de ferro da Mina de Gongo Soco, pode-se concluir que:

(i) quanto aos agregados:

- O rejeito de minério de ferro utilizado como fíler alternativo possui valor elevado de densidade devido principalmente a composição de ferro presente no resíduo. A sua utilização como fíler alternativo contribuiria para a redução de deposição deste resíduo nas barragens de rejeito, o que aumentaria a vida útil das barragens e conseqüente redução da demanda por novas áreas para deposição do rejeito, contribuindo dessa forma, para a conservação do meio ambiente local.
- A escória de aciaria LD apresentou resultados excelentes referentes a sua utilização como agregado para pavimento rodoviário, com valores dentro dos limites estabelecidos pelo DNIT e tão satisfatórios quanto ao agregado convencional, entretanto, o valor de expansibilidade do resíduo encontrado neste estudo foi superior ao limite especificado para sua utilização no concreto asfáltico, o que inviabiliza o uso da escória curada com apenas dez meses



exposta ao ar livre. Uma solução para este empecilho seria a cura do resíduo por um período maior de exposição a céu aberto ou através de outro processo de cura mais eficiente que vise a estabilização volumétrica da mesma.

- Na avaliação dos ensaios de lixiviação e solubilização feitos com a escória demonstraram o seu baixo potencial de contaminação do meio ambiente, sendo classificada como resíduo não perigoso e inerte (Classe IIB).
- Apesar das misturas contendo escória de aciaria consumir maior quantidade de ligante, seu valor de mercado como agregado é mais barato se comparado ao agregado convencional, o que justificaria sua utilização em pavimentação. Além disso, deve-se focar nas vantagens ambientais como: diminuição do uso de agregado natural, o que reduziria a demanda por novas jazidas para obtenção do mesmo e conservação das áreas naturais, diminuição da poluição visual, poluição sonora (uso de explosivos para extração do material) e de emissão de particulado no ambiente.
- O procedimento de determinação da densidade real do agregado miúdo deve ser melhor avaliado quando se tratar de escória de aciaria com elevada porosidade, visto que o método convencional de remoção das bolhas de ar do agregado por fervura induz a resultados que não expressam o real valor da densidade real da escória miúda. A utilização de aplicação de vácuo através de um equipamento mais potente do que o utilizado nesta pesquisa é recomendado para complementar a etapa de fervura no processo de determinação da densidade real, principalmente em trabalhos científicos, visando a obtenção de resultados mais realistas.

(ii) Quanto ao projeto e dosagem das misturas asfálticas:

- Os resultados de DTM encontrados foram praticamente os mesmos quando utilizado os valores de densidade real da escória miúda pelo método convencional e adaptado. Ressalta-se que procedimentos mais eficientes para

determinação da densidade real da escória de aciaria graúda e miúda podem levar a valores de DMTs diferentes do que os obtidos pelo método convencional.

- Observou-se uma diminuição nos valores de volume de vazios para as misturas contendo escória de aciaria (M2 e M3), quando substituído o filer mineral pelo rejeito de minério de ferro. Este comportamento não foi notado para as misturas asfálticas compostas apenas por agregados convencionais (M1 e M4).
- Pela dosagem Marshall, as misturas contendo escória de aciaria (M2 e M3) apresentaram teores de projeto mais elevado do que as misturas contendo apenas o agregado pétreo. Porém, deve-se destacar o ganho ambiental não quantificado, de mitigação de danos com a não fabricação de agregado convencional e a não estocagem do agregado alternativo.
- A substituição do filer natural pelo rejeito de minério de ferro não alterou o valor do TP para as misturas contendo somente o agregado natural e apresentou uma ligeira redução no teor de projeto para as misturas compostas por escória de aciaria.
- Apesar da faixa granulométrica adotada neste estudo, para composição das misturas asfálticas, passar dentro da zona de restrição especificada pela metodologia SUPERPAVE, as mesmas apresentaram desempenho mecânico satisfatório em todos os tipos de ensaios mecânicos realizados nesta pesquisa.

(iii) Quanto ao desempenho mecânico das misturas:

- As misturas contendo escória de aciaria apresentaram valores de MR superiores ao das misturas confeccionadas apenas com o agregado natural, nos seus respectivos teores de projeto. Todas as misturas deste estudo apresentaram valores de módulo de resiliência satisfatórios.

- A incorporação de rejeito de minério de ferro nas misturas asfálticas tende a diminuir a rigidez das mesmas, apresentando queda nos valores de MR determinados.
- Os quatro tipos de misturas analisadas neste estudo apresentaram valores de RT satisfatórios e acima do limite especificado pelo DNIT.
- O aumento da concentração de filer alternativo (rejeito de minério de ferro) nas misturas betuminosas proporcionou as mesmas, de maneira geral, um ganho de resistência quanto à tração estática por compressão diametral.
- Não foi encontrada variação significativa nos valores de RT das misturas virgens quando comparados com os resultados de RT de amostras que foram previamente submetidas ao ensaio de módulo de resiliência.
- A análise e comparação, mesmo que limitada, das curvas de fadiga demonstraram que as misturas contendo escória de aciaria (M2 e M3) apresentaram desempenho superior em relação a mistura convencional e, para elevados níveis de tensão a mistura M4 apresentou maior vida de fadiga se comparado com a mistura convencional.
- Constatou-se significativa influência do rejeito de minério de ferro no desempenho mecânico quanto à deformação permanente. Os resultados obtidos no ensaio creep estático demonstraram uma diminuição da deformação plástica das misturas ao substituir o filer convencional pelo rejeito de minério de ferro aplicado.

## **6.2– SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

- Análise laboratorial do desempenho mecânico de misturas betuminosas contendo diferentes tipos de ligante asfáltico, granulometria e diferentes teores de escória de aciaria e de rejeito de minério de ferro dos quais foram utilizados nesta pesquisa.

- Ensaios mais detalhados para a caracterização físico-química dos agregados tanto da escória como do rejeito de minério de ferro, com realização de ensaios de análise granulométrica a laser dos fileres e análise química quantitativa dos materiais alternativos.
- Construção e instrumentação de trechos rodoviários experimentais para avaliação e comparação do desempenho mecânico das misturas asfálticas com os resultados obtidos em laboratório.
- Avaliação do desenvolvimento de trincas e deformações permanentes em revestimentos asfálticos compostos com agregados siderúrgicos e rejeito de minério de ferro através da utilização de um simulador de tráfego.
- Estudo econômico do uso dos materiais alternativos (escória de aciaria e rejeito de minério de ferro) em pavimentos rodoviários através da elaboração e execução de um projeto rodoviário com análise dos custos.
- Estudo de misturas asfálticas contendo escória de aciaria e rejeito de minério de ferro confeccionadas por compactação giratória, determinação da absorção dos agregados e densidade máxima medida (DMM) com aplicação de vácuo e análise da adesividade dos agregados com o ligante asfáltico pelo método Lottman.

## 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.

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials (2001). MP2, Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 7181. Solo – Análise Granulométrica.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1985). NBR 6560. Materiais Betuminosos – Determinação do Ponto de Amolecimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10004. Resíduos Sólidos - Classificação.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10005. Lixiviação de Resíduos - Procedimento.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10006. Solubilização de Resíduos - Procedimento.

ALBUQUERQUE FILHO, L. H. (2004). Análise do Comportamento Geotécnico de Rejeitos em Pilhas e Barragens de Contenção Através de ensaios CPTU. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 175p.

ARAUJO, A. L. (1997). Manual de Siderurgia – Produção. São Paulo: Arte & Ciência, v. 1.

ASTM - American Society for Testing and Materials (1985). D 242, Specification for Mineral Filler For Bituminous Paving Mixtures.

ASTM - American Society for Testing and Materials (1989). D 5581, Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus.

ASTM - American Society for Testing and Materials (2000). D 2726, Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures.

ASTM - American Society for Testing and Materials (2001). C 127, Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate.

ASTM - American Society for Testing and Materials (2001). C 128, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B. (2008). Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. PETROBRÁS: ABEDA, Rio de Janeiro.

CAMPOS, M. I. B. (2006). Caracterização da Deformação Frágil e Sua Relação com os Processos de Voçorocamento na Porção Sudeste do Complexo Metamórfico Bação – Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 156p.

CASTELO BRANCO, V. T. F. (2004). Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 135p.

CAVALCANTE, V. T. F., SOARES, J. B. (2001). “O Efeito do Tipo e do Teor de Fíler nas Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas”. *33<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação*, Florianópolis, SC.

CNT (2007). CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. Pesquisa Rodoviária CNT. <http://www.cnt.org.br/informacoes/pesquisas/rodoviaria/2007/> - Acessada em 01/12/2008.

D’AGOSTINO, L. F. (2008). Praias de Barragens de Rejeitos de Mineração: Características e Análise da Sedimentação. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo. 374p.

DER (2006). DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Sistema Rodoviário Estadual, Belo Horizonte. Não publicado.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). EM 262, Escórias de Aciaria para Pavimentos Rodoviários.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 078, Agregado Graúdo – Adesividade a Ligante Betuminoso.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 085, Material Finamente Pulverizado – Determinação da Massa Específica Real.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 086, Agregado – Determinação do índice de Forma.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 089, Agregados – Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Soluções de Sulfato de Sódio ou de Magnésio.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 117, Mistura Betuminosa – Determinação da Densidade Aparente.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 133, Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 138, Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 193, Materiais Betuminosos Líquidos e Sólidos – Determinação da Densidade.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1995). ME 043, Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1996). PRO 199, Redução de Amostra de Campo de Agregados para Ensaio de Laboratório.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997). EM 367, Material de Enchimento para Misturas Betuminosas.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997). ME 054, Equivalente de Areia.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997). PRO 120, Coleta de Amostras de Agregados.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). ME 035, Agregados – Determinação da Abrasão *Los Angeles*.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). ME 081, Agregados – Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo.



DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). ME 083, Agregados – Análise Granulométrica.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). ME 163, Materiais Betuminosos – Determinação da Ductilidade.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1999). ME 003, Material Betuminoso – Determinação da Penetração.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1999). ME 399, Agregados – Determinação da Perda ao Choque no Aparelho Treton.

DINIZ, D. H., PEIXOTO, R. A. F., PADULA, F. R. G. (2008). “O Emprego de Agregados de Escória de Aciaria na Fabricação de Blocos Intertravados para Pavimentação”. *39ª Reunião Anual de Pavimentação*, Recife, PE.

DNIT (2006). DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Plano Nacional de Viação - PNV.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (2006). ES 031, Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço.

FALCÃO, M. F. B. e SOARES, J. B. (2002). “Considerações sobre o Ensaio de Compressão Diametral no Estudo de Materiais de Pavimentação”. *XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Natal.

FERNANDES, Gilberto (2005). Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, UnB, Brasília. 250p.

FERREIRA, R. F. (2007). Dimensionamento de um Pavimento Experimental para Tráfego de Caminhões Fora-de-Estrada em Planta de Mina. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 277p.

FREITAS, H. B. (2007). Misturas Asfálticas de Módulo Elevado com Uso de Escória de Aciaria como Agregado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 173p.

GERMANI, D. J. (2002). A mineração no Brasil. Relatório final do programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), Rio de Janeiro, 54 p.

GEYER, R. M. T. (2001). Estudo Sobre a Potencialidade de Uso das Escórias de Aciaria como Adição ao Concreto. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

GIMENES, E. A. M., PEZZIN, N., FILHO, A. R. L., SARTÓRIO, E. A., MENDONÇA, R. L. (2008). “Aplicação de Escória de Aciaria em Sub-Base e Base da ES-446”. *39ª Reunião Anual de Pavimentação*, Recife, PE.

GONTIJO, P. R. A. (2006). “Pavimentos compostos com escórias de aciaria”. *Revista Pavimentação*, ano 1, n.3 (Julho), p. 42-54.

GOMES, R. C., ALBUQUERQUE FILHO, L. H. (2002). Geotechnical analysis of eroded sediments in a exhausted pit mine using CPTU tests. 4th International Congress on Environmental Geotechnics, 4th ICEG, Rio de Janeiro, RJ, 1: 323-328.

HUANG, Y. H. (1993). *Pavement Analysis and Desing*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

IBS, (2008). INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA - [http://www.ibs.org.br/siderurgia\\_usos\\_producao.asp](http://www.ibs.org.br/siderurgia_usos_producao.asp) - Acessada em 23/09/2008.

IPR, INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS (2008). Estudos e Pesquisas de Rochas de Pedreiras para Estabelecimento de Critérios de Qualidade Frente às Normas e Procedimentos Existentes e sua Aceitação. Relatório final. ECL, Rio de Janeiro.

KANDHAL, P. S., HOFFMAN, G. L. (1998). Evaluation of Steel Slag Fine Aggregate in Hot-mix Asphalt Mixtures. Transportation Research Record, Washington, D.C, n. 1583, p. 28-36.

KUEHN, M., DRSSSEN, P., SCHREY, H. (2000). Treatment of Liquid Steel Slag. In: EUROPEAN SLAG CONFERENCE – EUROSLAG, 2., Dusseldorf. Annals. Dusseldorf: EUROSLAG.

LEE, D. Y. (1969). The Relationship Between Physical and Chemical Properties of Aggregates and Their Asphalt Absorption. Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 38, p.242 - 275.

LETTIER, J. A., FINK, D. F., WILSON, N. B., FARLEY, F. F. (1949). Mechanism of Absorption of Bituminous Materials by Aggregate. Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 18, p.278 - 300.

MACHADO, A. T. (2000). Estudo Comparativo dos Métodos de Ensaio para Avaliação da Expansibilidade das Escórias de Aciaria. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 135p.

MARQUES, G. L. O. (2004). Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica – Efeito da Compactação por Impacto e Giratória. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 461p.

MEDINA, J. e MOTTA, L. M. G. (2005). Mecânica dos Pavimentos. 2ª edição, Editora ImaMaker Interactive. Rio de Janeiro.

MENDONÇA, R. L., RODRIGUES, G. L. C., ALVES, J. N. (2008). “Utilização de Escória de Aciaria como Revestimento Primário”. *39ª Reunião Anual de Pavimentação*, Recife, PE.

MONTGOMERY, D. G., WANG, G. (1991). Instant-chilled Steel Slag Aggregate in Concrete – Strength Related Properties. *Cement and Concrete research*, v.21, p. 1083-1091.

MORISHITA, S., KOIDE, H., KOMAI, K. (1998). The development of a New Aging process of steel-making slag. Japão: Catálogo Sumitomo Metal Industries.

MOTTA, L. M. G., TONIAL, I., LEITE, L. M. F., CONSTANTINO, R. S. (2000). *Princípios do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas*. Tradução Comentada, IBP, Rio de Janeiro.

MOURÃO, F. A. L. (2003). *Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

NAPA (1982). *Mix Design Techniques – Part I. NAPA TAS-14*. National Asphalt Pavement Association, Instructors Manual.

NOURELDIN, A. S., McDANIEL, R. S. (1990). Evaluation of Surface Mixtures of Steel Slag and Asphalt. *Transportation Research Record*, n. 1269, pp. 133-149.

OLIVEIRA, F. U (2006). *Avaliação de Três Métodos de Ensaio para Determinação do Potencial de Expansão de Escórias de Aciaria para uso em Pavimentação*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES. 141p.

PANNONI, F. D. (2008). *Aços Estruturais*. Desenvolvimento de Perfis Estruturais da Gerdau Açominas – Artigos Técnicos. Disponível em [http://www.gerdau.com.br/GerdauAcominas/upload/produtos/perfis/caracteristicatecnicapf/artigostecnicos/Aços\\_estruturais.pdf](http://www.gerdau.com.br/GerdauAcominas/upload/produtos/perfis/caracteristicatecnicapf/artigostecnicos/Aços_estruturais.pdf) – Acessada em 23/09/2008.

PARENTE, E. B., SOARES, J. B., BOAVISTA, A. H. (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.I, p. 215-222.

PENA, D. C. (2004). Avaliação da Expansibilidade da Escória de Aciaria Curada a Vapor para Utilização em Peças de Concreto para Pavimentação. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES. 152p.

PINTO, S. (1991). Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro.

PINTO, S. e PREUSSLER, E. S. (2002). Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis. 2ª edição, Copiarte, Rio de Janeiro.

PNLT (2007). PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA E TRANSPORTE. Ministério dos Transportes e Ministério da Defesa.

PRESOTTI, E. S. (2002). Influência do Teor de Ferro nos Parâmetros de Resistência de um Rejeito de Minério de Ferro. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 153p.

PTM – Pennsylvania Testing Method 130 (1978). Método de Ensaio para Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria, Adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais, DMA-1/DER-MG/92.

RAPOSO, C. O. L. (2005). Estudo Experimental de Compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para Uso em Pavimentação. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES. 163p.

RIBEIRO, L. F. M. (2000). Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicados à Barragens de Rejeitos. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, UnB, Brasília. 232p.

ROBERTS, F. L., KANDHAL, P. S., BROWN, R. E., LEE, D., KENNEDY, T. W. (1996). Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction. NAPA. Maryland, USA.

ROHDE, L. (2002). Escória de Aciaria Elétrica em Camadas de Pavimentos – Estudo Laboratorial. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 101p.

ROSENO, J. L. (2005). Avaliação de uma Mistura Asfáltica Porosa com Agregados Calcários e Asfalto-Borracha. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 149p.

SARAIVA, S. L. C. (2006). Metodologia e Análise Experimental do Comportamento Geotécnico da Estrutura de Pavimentos Rodoviários. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 123p.

SHOUSUN, L. (1980). Effect of MgO in Steel Slag on Soundness of Cement, In: 7<sup>o</sup> International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, v. II, p. 39-44.

SILVA, E. A., MENDONÇA, R. L., DOBELE, C. H. M., SIQUEIRA, M., SOARES, J. B. (2003). Uma experiência Inédita: Uso da Escória de Aciaria LD em Todas as Camadas do Pavimento. In: Reunião Anual de Pavimentação, 34., Campinas. Anal... Campinas: ABPv, 2003. p. 238-244.

SILVA, M. G. (2004). Aspectos Técnicos e Ambientais do Uso de Escória de Aciaria. Seminário da Universidade Federal do Espírito Santo.

SILVA, P. D. E. A., MEDEIROS, F. V., GUARÇONI, D. S., CASTRO, L. N., MENDONÇA, R. L., RODRIGUES, G. L.C. (2008). “Aplicação de Escória de Aciaria Produzida na ArcelorMittal Tubarão com Redução de Expansão – ACERITA – Como Camada de Base na Pista Experimental Circular do IPR/DNIT”. *39ª Reunião Anual de Pavimentação*, Recife, PE.

SILVEIRA, N. O., MENDONÇA, R. L., SILVA, E. A., AGRZZI, E. J. *et al.* (2004). “Acerita – Escória de Aciaria LD com Redução de Expansão”. *Revista ABM*, v.1, n.1 (Julho), p. 01-05.

SOUSA, G. M. (2007). Estudo Experimental de Escórias de Aciaria para Fins de Caracterização Tecnológica como Material de Lastro Ferroviário em Vias Sinalizadas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 124p.

VASCONCELOS, K. L., SOARES, J. B. (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*, Campinas, SP.

VASCONCELOS, K. L., SOARES, J. B. (2005). “Efeito do Procedimento de Dosagem no Teor de Projeto e Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas”. *XVII Congresso Brasileiro de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Recife, PE.

WESSELING, D. H. (2005). Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas em Concreto Asfáltico com Incorporação de Resíduos Industriais. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 143p.

## Anexo I – Resultados dos Ensaio de Fadiga

ENSAIO DE VIDA DE FADIGA						
Nº DO CP	TENSÃO APLICADA (MPa)	NÍVEL DE TENSÃO (%)	TENSÃO DE TRAÇÃO $\sigma_t$ (MPa)	DIFERENÇA DE TENSÕES $\Delta t$ (MPa)	VIDA DE FADIGA NÚMERO DE GOLPES	Deformação Específica Resiliente Inicial ( $\epsilon_i$ )
144	0,81	59,41	1,36	3,23	288	0,0001804
145	0,61	44,56	1,36	2,42	530	0,0001353
147	0,20	14,85	1,36	0,81	28800	0,0000451
149	0,40	29,71	1,36	1,62	2048	0,0000902
150	0,30	22,28	1,36	1,21	8728	0,0000677
151	0,30	22,28	1,36	1,21	9326	0,0000677
152	0,20	14,85	1,36	0,81	31448	0,0000451
153	0,40	29,71	1,36	1,62	3148	0,0000902
207	0,884	69,6	1,27	3,536	407	0,0001429
208	0,663	52,2	1,27	2,652	978	0,0001072
282	0,442	34,8	1,27	1,768	3049	0,0000715
285	0,221	17,4	1,27	0,884	46517	0,0000357
289	0,663	52,2	1,27	2,652	490	0,0001072
291	0,442	34,8	1,27	1,768	1563	0,0000715
292	0,331	26,1	1,27	1,324	4864	0,0000535
293	0,331	26,1	1,27	1,324	5793	0,0000535
361	0,812	62,0	1,31	3,248	589	0,0001449
362	0,609	46,5	1,31	2,436	1179	0,0001087
363	0,406	31,0	1,31	1,624	4654	0,0000725
364	0,203	15,5	1,31	0,812	65552	0,0000362
365	0,609	46,5	1,31	2,436	784	0,0001087
366	0,406	31,0	1,31	1,624	3805	0,0000725
370	0,305	23,3	1,31	1,220	7124	0,0000544
368	0,305	23,3	1,31	1,220	8935	0,0000544
414	0,820	63,6	1,29	3,280	586	0,0001810
415	0,615	47,7	1,29	2,460	1404	0,0001358
416	0,410	31,8	1,29	1,640	3733	0,0000905
418	0,308	23,9	1,29	1,232	7831	0,0000680
419	0,410	31,8	1,29	1,640	4095	0,0000905
421	0,205	15,9	1,29	0,820	19597	0,0000453
423	0,308	23,9	1,29	1,232	5226	0,0000680
422	0,205	15,9	1,29	0,820	21873	0,0000453
458	0,205	15,9	1,29	0,820	15086	0,0000453



# Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)