

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
MISTURAS EM CONCRETO ASFÁLTICO COM  
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS**

**Diego Henrique Wesseling**

Porto Alegre

Abril 2005

**DIEGO HENRIQUE WESSELING**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
MISTURAS EM CONCRETO ASFÁLTICO COM  
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre

Abril 2005

WESSELING, Diego Henrique

Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais/ Diego Henrique Wesseling. – Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2005.

n p.143

Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Mestre em Engenharia. Orientador: Jorge Augusto Pereira Ceratti.

1. Pavimentos; Misturas Asfálticas; Resíduos Industriais; Comportamento Mecânico. I. Título

CCAA2

**DIEGO HENRIQUE WESSELING**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
MISTURAS EM CONCRETO ASFÁLTICO COM  
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 26 de abril de 2005

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti  
Dr. pela UFRJ  
Orientador

Prof. Américo Campos Filho  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Glicério Trichês (UFSC)**  
Dr. pelo ITA

**Prof. Luciano Pivoto Specht (UNIJUÍ)**  
Dr. pela UFRGS

**Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)**  
Dr. pela UFRGS

Dedico este trabalho aos meus pais Bruno (*in memoriam*) e Nair, ao meu irmão Daniel e a minha namorada Joice.

## **AGRADECIMENTOS**

Desejo extremar os mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma auxiliaram na realização deste trabalho. Seja através da orientação técnica, seja através de apoio, do incentivo e da amizade, muitas pessoas tiveram papel importante o desenvolvimento desta dissertação.

Ao meu orientador, professor Jorge Augusto Pereira Ceratti, pelo incentivo, motivação e pela orientação segura durante a realização deste trabalho.

Ao professor Luciano Pivoto Specht, pelo incentivo, confiança, sugestões e apoio. Também pelos seus ensinamentos e pela sua dedicação à engenharia.

A equipe técnica do LAPAV: Carlos Ivan H. Ribas, Croaci Souza de Mello, Ivo de Azevedo e Vinicius da Silva Alves pelo auxílio na consecução dos ensaios. Sem a experiência de vocês as coisas teriam sido bem mais complicadas.

Ao mestrando Lélío A. T. Brito, pelo auxílio prestado na realização dos ensaios de módulo de resiliência, resistência à fadiga e compressão uniaxial sob carga repetida.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil que, através de seus professores e funcionários, possibilitam a realização de pesquisas.

À Ipiranga Asfaltos, notadamente ao Engenheiro Leonardo, pelo material cedido à pesquisa.

À Pavicon Construtora e Pavimentadora LTDA, notadamente ao Engenheiro Luciano, pela doação dos agregados empregados na pesquisa.

À União dos Trabalhadores em Resíduos Especiais e Saneamento Ambiental – UTRESA, especialmente ao Engenheiro Rafael Reis, pelo fornecimento dos resíduos industriais e apoio logístico.

Aos colegas do mestrado: Alberto Bernd Lima e Silva, Aline Denardin, Ana Pula Silva dos Santos, Augusta Brenner dos Santos, Daniela de David, Diego Foppa, Fábio Ribeiro, Felipe Gobbi Silveira, Leandro Marcon, Rodrigo Montemezzo, Tais Steckel Retore e Viviane Wickboldt pelo convívio ao longo desta jornada.

Aos colegas doutorandos do Programa de Pós-graduação da UFRGS, Juliana de Azevedo Bernardes, Luciana Rohde e Rodrigo Malysz.

Agradeço a CAPES e ao CNPq pelas bolsas de estudos que possibilitaram à dedicação à pesquisa.

Por fim, agradeço a minha mãe Nair e meu irmão Daniel pelo incentivo e confiança depositados em mim ao longo desta jornada. A minha namorada Joice Halmenschlager pelo apoio, incentivo e carinho. Tenho certeza que esta conquista também é de vocês.

## RESUMO

WESSELING, D.H. **Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais**. 2005. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Esta pesquisa de mestrado analisa, através de um estudo experimental, o comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico, utilizando agregados siderúrgicos (Escória de Aciaria) e Resíduo Areia de Fundação (R.A.F) em combinação com agregados minerais (Basalto). A reutilização destes resíduos industriais traz benefícios ambientais, pois auxilia a questão de deposição destes rejeitos, além de diminuir a degradação ambiental em áreas de extração de agregados pétreos. Foi realizada a dosagem de quatro misturas através da Metodologia Marshall, sendo uma mistura de Referência composta de agregados minerais. Para caracterização e verificação do desempenho das misturas asfálticas foi realizada a moldagem dos corpos-de-prova através da Metodologia Marshall, com uso de CAP 50/60, sendo determinado, além das propriedades Marshall, ensaios de módulo de resiliência à compressão diametral ( $M_r$ ), resistência à tração ( $R_t$ ), resistência à fadiga (tensão controlada), deformação permanente sob carga repetida, abrasão (Cântabro) e adesividade (Metodologia Lottman Modificada) das quatro misturas estudadas. Os resultados obtidos demonstraram que a adição dos resíduos industriais estudados ao concreto asfáltico aumenta o consumo de ligante da mistura. A incorporação de escória de aciaria à mistura em concreto asfáltico apresentou desempenho superior ao da mistura com agregados convencionais nas propriedades mecânicas e de durabilidade. A adição de Resíduo Areia de Fundação (R.A.F) em combinação com escória de aciaria não apresentou desempenho satisfatório neste estudo, uma vez que apresentou consumo de ligante elevado e propriedades mecânicas com desempenho inferior. Através do estudo ficou evidente a viabilidade da incorporação da escória de aciaria em misturas asfálticas apresentando melhora nas características mecânicas e de adesividade.

Palavras-chave: pavimentos; misturas asfálticas; resíduos industriais; comportamento mecânico.



## **ABSTRACT**

WESSELING, D.H. **Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais**. 2005. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

### **A Study of the Mechanical Behavior of Asphalt Concrete with Industrial Residues Incorporated**

This M.Sc. thesis research analyzes, through an experimental project, the mechanical behavior of asphalt concrete mixes with steel slag aggregate and foundry sand incorporated and combined to natural aggregates. The reuse of these industrial residues leads to environmental gains; it not only helps to avoid the open-air deposition of this by-product but it also reduces the environmental degradation in quarry aggregates exploitation. Four mixes were designed using the Marshall methodology; one of them was a reference mix composed only by petreous aggregates. In order to characterize and verify the performance of hot mixes asphalt (HMA) with CAP 50/60 (Brazilian penetration binder), specimens were manufactured and tested according to Marshall Methodology. In addition to Marshall properties, the resilient modulus, tensile strength, fatigue life (controlled stress mode), permanent deformation, weight loss (Cantabro Methodology) and stripping (Modified Lottman Test) of the four mixes were evaluated. The results of this research show that the addition of industrial residues to HMA increases the binder consumption. The incorporation of steel slag to the HMA enhanced the performance of the new mix when compared to that of reference concerning the mechanical properties and durability. The incorporation of foundry sand combined to steel slag did not show satisfactory performance in this research once the binder consumption was high and mechanical properties were of low performance. This research proved to be evident the possibility of adding steel slag to HMA leading to an increase in the mechanical behavior and stripping.

Key-words: pavement; asphalt mix; industrial residues; mechanical behavior.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>17</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>19</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....</b>	<b>20</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA .....	23
1.2 OBJETIVOS DO ESTUDO .....	25
1.2.1 Objetivo Geral.....	25
1.2.2 Objetivos Específicos.....	26
1.2.3 Questões de Estudo .....	26
1.3 SISTEMATIZAÇÃO DO ESTUDO .....	26
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>28</b>
2.1 OS RESÍDUOS INDUSTRIAIS .....	28
2.2 AGREGADOS SIDERÚRGICOS .....	28
2.2.1. Aço .....	28
2.2.2. A Escória de Aciaria .....	30
2.2.3. Benefícios do uso da Escória de Aciaria.....	31
2.2.4 Usos da Escória de Aciaria.....	31
2.2.5 O Uso da Escória de Aciaria na Pavimentação.....	32
2.2.6 A Expansibilidade das Escórias de Aciaria.....	37
2.2.7 Métodos para Avaliação da Expansibilidade das Escórias .....	37
2.3 OS RESÍDUOS AREIA DE FUNDIÇÃO (R.A.F).....	39
2.3.1 Classificação do Resíduo Areia de Fundição (R.A.F) .....	41
2.3.2 O Uso do Resíduo Areia de Fundição (R.A.F) na Pavimentação .....	42
2.4 PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.....	45
2.4.1 Pavimentos Flexíveis .....	45

2.5 MATERIAIS PARA CONCRETO ASFÁLTICO .....	49
2.5.1 Ligante Asfáltico .....	49
2.5.2 Agregado .....	50
2.6 CONCRETO ASFÁLTICO.....	51
2.6.1 Variáveis que Afetam as Misturas Asfálticas .....	51
2.6.1 Dosagem de Concreto Asfáltico.....	53
2.6.2 Método Marshall .....	54
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>56</b>
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	56
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	58
3.2.1 Cimento Asfáltico .....	58
3.2.2 Agregados Minerais .....	61
3.2.3 Agregados Siderúrgicos .....	63
3.2.3.1 Expansibilidade.....	65
3.2.4 Resíduo Areia de Fundição (R.A.F).....	67
3.3 METODOLOGIA.....	69
3.3.1 Metodologia Marshall .....	69
3.3.2 Módulo de Resiliência.....	72
3.3.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	73
3.3.4 Resistência à Fadiga .....	75
3.3.5 Ensaio de Compressão Uniaxial Sob Carga Repetida.....	75
3.3.6 Resistência ao Desgaste – Metodologia Cântabro .....	77
3.3.7 Ensaio de Adesividade – Metodologia Lottman Modificada.....	78
<b>4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>80</b>
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	80
4.2 MISTURA DE REFERÊNCIA (0/0/100) .....	80
4.2.1 Dosagem Marshall .....	81
4.2.2 Módulo de Resiliência.....	84

4.2.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	84
4.2.4 Resistência à Fadiga.....	86
4.2.5 Ensaio de Compressão Uniaxial Sob Carga Repetida.....	88
4.2.6 Resistência ao Desgaste – Metodologia Cântabro .....	89
4.2.7 Ensaio de Adesividade – Metodologia Lottman Modificada.....	89
4.3 MISTURA A (70/0/30) .....	90
4.3.1 Dosagem Marshall .....	90
4.3.2 Módulo de Resiliência.....	94
4.3.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	94
4.3.4 Resistência à Fadiga.....	96
4.3.5 Ensaio de Compressão Uniaxial Sob Carga Repetida.....	98
4.3.6 Resistência ao Desgaste – Metodologia Cântabro .....	98
4.3.7 Ensaio de Adesividade – Metodologia Lottman Modificada.....	99
4.4 MISTURA B (5/25/70).....	100
4.4.1 Dosagem Marshall .....	100
4.4.2 Módulo de Resiliência.....	103
4.4.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	104
4.4.4 Resistência à Fadiga.....	105
4.4.5 Ensaio de Compressão Uniaxial Sob Carga Repetida.....	107
4.4.6 Resistência ao Desgaste – Metodologia Cântabro .....	107
4.4.7 Ensaio de Adesividade – Metodologia Lottman Modificada.....	108
4.5 MISTURA C (85/15/0).....	109
4.5.1 Dosagem Marshall .....	109
4.5.2 Módulo de Resiliência.....	112
4.5.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	113
4.5.4 Resistência à Fadiga.....	114
4.5.5 Ensaio de Compressão Uniaxial Sob Carga Repetida.....	116
4.5.6 Resistência ao Desgaste – Metodologia Cântabro .....	117
4.5.7 Ensaio de Adesividade – Metodologia Lottman Modificada.....	117
<b>5 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>119</b>

5.1 DOSAGEM MARSHALL .....	119
5.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	124
5.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	124
5.4 RESISTÊNCIA À FADIGA.....	127
5.5 ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL SOB CARGA REPETIDA.....	131
5.6 RESISTÊNCIA AO DESGASTE – Metodologia Cântabro .....	133
5.7 ENSAIO DE ADESIVIDADE – Metodologia Lottman Modificada.....	134
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>137</b>
6.1 CONCLUSÕES .....	137
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	139
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>140</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Evolução anual da produção mundial de aço (Adaptado de Ministério de Minas e Energia, 2004). .....	29
Figura 2.2: Produção nacional de aço nos últimos cinco anos (Adaptado de IBS 2004).....	29
Figura 2.3: Principais aplicações da escória de aciaria no Brasil (Fonte: Caselato, 2004). ....	32
Figura 2.2: Influência do agregado e do ligante no desempenho do CBUQ (Fonte: FHWA 2002).....	53
Figura 3.1: Curvas granulométricas das quatro misturas estudadas.....	57
Figura 3.1: Relação entre temperatura e viscosidade rotacional do ligante utilizado. ....	60
Figura 3.2: Viscosímetro Brookfield, utilizado para verificação da viscosidade do CAP. ....	60
Figura 3.3: Localização da jazida e do derrame basáltico no Rio Grande do Sul. ....	61
Figura 3.4: Curvas granulométricas dos agregados minerais utilizados no estudo. ....	63
Figura 3.5: Granulometria do agregado siderúrgico utilizado no estudo. ....	65
Figura 3.6: Expansão volumétrica da escória de aciaria empregada no estudo. ....	67
Figura 3.7: Curva granulométrica do Resíduo Areia de Fundação (R.A.F) empregado no estudo.....	68
Figura 3.8: Prensa para rompimento dos corpos-de-prova Marshall do LAPAV. ....	70
Figura 3.9: Batedeira mecânica com cuba aquecida do LAPAV, utilizada para mistura.....	71
Figura 3.10: Compactador mecânico utilizado para compactação dos corpos-de-prova Marshall.....	71
Figura 3.11: Equipamento para ensaio de módulo de resiliência de misturas asfálticas.....	73
Figura 3.12: Equipamento para ensaio de resistência à tração em materiais cimentados e misturas asfálticas.....	74
Figura 3.13: Sistema de fixação dos corpos-de-prova e medição do deslocamento para ensaio de compressão uniaxial sob carga repetida.....	77
Figura 3.14: Equipamento para saturação dos corpos-de-prova, através da Metodologia Lottman Modificada. ....	79
Figura 4.1: Curva do Volume de Vazios, para mistura de Referência. ....	81
Figura 4.2: (a) Curva dos vazios do agregado mineral para mistura de Referência. (b) Curva da relação betume/vazios, para mistura de Referência.....	82
Figura 4.3: Curva da massa específica aparente para mistura de Referência.....	82
Figura 4.4: (a) Curva de Estabilidade (kN) para mistura de Referência. (b) Curva da Fluência (mm) para mistura de Referência. ....	83

Figura 4.5: Curva da relação Estabilidade/Fluência para mistura de Referência.....	83
Figura 4.6: Módulo de resiliência para a mistura de Referência.....	84
Figura 4.7: Curva da resistência à tração para a mistura de Referência.....	85
Figura 4.8: Curva da relação $M_r/R_t$ para a mistura de Referência.....	85
Figura 4.9: Relação entre vida de fadiga e tensão de tração para a mistura de Referência.....	87
Figura 4.10: Relação entre vida de fadiga e diferença de tensões para a mistura de Referência. .....	87
Figura 4.11: Relação entre vida de fadiga e deformação específica inicial para a mistura de Referência.....	88
Figura 4.12: Curva do volume de vazios, para Mistura A.....	91
Figura 4.13: (a) Curva dos vazios do agregado mineral para Mistura A. (b) Curva da relação betume/vazios, para Mistura A.....	91
Figura 4.14: Curva da massa específica aparente para Mistura A.....	92
Figura 4.15: (a) Curva de Estabilidade (kN) para Mistura A. (b) Curva da Fluência (mm) para Mistura A.....	93
Figura 4.16: Curva da relação Estabilidade/Fluência para Mistura A.....	93
Figura 4.17: Curva do módulo de resiliência para a Mistura A.....	94
Figura 4.18: Curva da resistência à tração para a Mistura A.....	95
Figura 4.19: Curva da relação $M_r/R_t$ para a Mistura A.....	95
Figura 4.20: Relação entre vida de fadiga e tensão de tração para a Mistura A.....	96
Figura 4.21: Relação entre vida de fadiga e diferença de tensões para a Mistura A.....	97
Figura 4.22: Relação entre vida de fadiga e deformação específica inicial para a Mistura A.....	97
Figura 4.23: Curva do volume de vazios, para Mistura B.....	100
Figura 4.24: (a) Curva dos vazios do agregado mineral para Mistura B. (b) Curva da relação betume/vazios, para Mistura B.....	101
Figura 4.25: Curva da massa específica aparente para Mistura B.....	102
Figura 4.26: (a) Curva de Estabilidade (kN) para Mistura B. (b) Curva da Fluência (mm) para Mistura B.....	102
Figura 4.27: Curva da relação Estabilidade/Fluência (MN/m) para Mistura B.....	103
Figura 4.28: Curva do módulo de resiliência para a Mistura B.....	103
Figura 4.29: Curva da resistência à tração para a Mistura B.....	104
Figura 4.30: Curva da relação $M_r/R_t$ para a Mistura B.....	104
Figura 4.31: Relação entre vida de fadiga e tensão de tração para a Mistura B.....	105
Figura 4.32: Relação entre vida de fadiga e diferença de tensões para a Mistura B.....	106

Figura 4.33: Relação entre vida de fadiga e deformação específica inicial para a Mistura B. .....	106
Figura 4.34: Curva do volume de vazios, para Mistura C.....	109
Figura 4.35: (a) Curva dos vazios do agregado mineral para Mistura C. (b) Curva da relação betume/vazios, para Mistura C. ....	110
Figura 4.36: Curva da massa específica aparente para Mistura C.....	110
Figura 4.37: (a) Curva de Estabilidade (kN) para Mistura C. (b) Curva da Fluência (mm) para Mistura C.....	111
Figura 4.38: Curva da relação Estabilidade/Fluência para Mistura C.....	112
Figura 4.39: Curva do módulo de resiliência para a Mistura C.....	112
Figura 4.40: Curva da resistência à tração para a Mistura C.....	113
Figura 4.41: Curva da relação $M_r/R_t$ para a Mistura C.....	114
Figura 4.42: Relação entre vida de fadiga e tensão de tração para a Mistura C.....	115
Figura 4.43: Relação entre vida de fadiga e diferença de tensões para a Mistura C. ....	115
Figura 4.44: Relação entre vida de fadiga e deformação específica inicial para a Mistura C. .....	116
Figura 5.1: Resultado do teor de ligante de projeto ( $VV = 4,0\%$ ) para as quatro misturas estudadas.....	120
Figura 5.2: Resultado da percentagem de Vazios do Agregado Mineral no teor de ligante de projeto para as quatro misturas estudadas. ....	120
Figura 5.3: Resultado da Relação Betume Vazios no teor de ligante de projeto para as quatro misturas estudadas. ....	121
Figura 5.4: Resultado da massa específica aparente no teor de ligante de projeto ótimo para as quatro misturas estudadas.....	121
Figura 5.5: Resultado da Estabilidade Marshall no teor de ligante de projeto para as quatro misturas estudadas. ....	122
Figura 5.6: Resultado da fluência no teor de ligante de projeto para as quatro misturas estudadas.....	123
Figura 5.7: Resultado da relação Estabilidade/Fluência no teor de ligante de projeto para as quatro misturas avaliadas.....	123
Figura 5.8: Resultado do ensaio de módulo de resiliência para as quatro misturas estudadas, no teor de ligante de projeto. ....	124
Figura 5.9: Resultado do ensaio de resistência à tração para as quatro misturas avaliadas. ..	125



Figura 5.10: Resultado da relação módulo de resiliência e resistência à tração para as quatro misturas.....	126
Figura 5.11: Resultados da relação #200/Betume para as quatro misturas estudadas.....	126
Figura 5.12: Relação entre vida de fadiga e tensão de tração das quatro misturas estudadas	128
Figura 5.13: Relação entre vida de fadiga e diferença de tensões das quatro misturas estudadas.....	129
Figura 5.14: Relação entre vida de fadiga e deformação específica inicial das quatro misturas estudadas.....	130
Figura 5.15: Resultados da deformação plástica (T=45°C) das quatro misturas analisadas, obtidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida.....	132
Figura 5.16: Curvas de deformação versus número de aplicações do carregamento obtidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida para Mistura A.....	132
Figura 5.17: Resultados da perda de massa Cântabro das misturas analisadas.....	134
Figura 5.18: Resultados da resistência à tração das misturas estudadas. ....	135
Figura 5.19: Resultados obtidos no Ensaio Lottman Modificado para as quatro misturas avaliadas. ....	136

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Divisão modal no transporte de cargas do país. ....	23
Tabela 2.1: Geração de resíduos sólidos industriais Classe II, por setor industrial no Rio Grande do Sul (Adaptada de FEPAM, 1996). ....	40
Tabela 2.2: Destino dos resíduos sólidos industriais Classe II no Rio Grande do Sul (Adaptada de FEPAM, 1996). ....	40
Tabela 2.3: Fatores intervenientes nas características de adesividade. ....	48
Tabela 3.1: Composição das quatro misturas estudadas. ....	56
Tabela 3.2: Viscosidades de mistura e compactação para cimentos asfálticos convencionais e modificados com polímeros. ....	59
Tabela 3.3: Análises granulométricas dos agregados minerais. ....	62
Tabela 3.4: Análise granulométrica do agregado siderúrgico. ....	64
Tabela 3.5: Análise granulométrica do Resíduo Areia de Fundação (R.A.F). ....	68
Tabela 4.1: Composição da mistura de Referência. ....	80
Tabela 4.2: Constantes do modelo de fadiga (curva de Wöhler) para a mistura de Referência. ....	86
Tabela 4.3: Valores da deformação permanente para mistura de Referência, obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida (T=45°C). ....	88
Tabela 4.4: Valores da inclinação do trecho entre 100s e 3600s para mistura de Referência, obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida (T=45°C). ....	89
Tabela 4.5: Resultados do ensaio de perda de massa (T=25°C) para mistura de Referência. ....	89
Tabela 4.6: Resultado obtido no ensaio de adesividade – Metodologia Lottman Modificada para mistura de Referência. ....	89
Tabela 4.7: Composição de agregados da Mistura A. ....	90
Tabela 4.8: Constantes do modelo de fadiga (curva de Wöhler) para a Mistura A. ....	96
Tabela 4.9: Valores da deformação permanente para Mistura A obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida (T=45°C). ....	98
Tabela 4.10: Valores da inclinação do trecho entre 100s e 3600s, obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida para Mistura A (T=45°C). ....	98
Tabela 4.11: Resultados do ensaio de perda de massa (T=25°C) para a Mistura A. ....	98

Tabela 4.12: Resultado obtido no ensaio de adesividade – Metodologia Lottman Modificada para a Mistura A.....	99
Tabela 4.13: Composição de agregados da Mistura B.....	100
Tabela 4.14: Constantes do modelo de fadiga (curva de Wöhler) para a Mistura B.....	105
Tabela 4.15: Valores da deformação permanente para Mistura B obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida (T=45°C).....	107
Tabela 4.16: Valores da inclinação do trecho entre 100s e 3600s, obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida para Mistura B (T=45°C).....	107
Tabela 4.17: Resultados do ensaio de perda de massa (T=25°C) para a Mistura B.....	107
Tabela 4.18: Resultado obtido no ensaio de adesividade – Metodologia Lottman Modificada para a Mistura B.....	108
Tabela 4.19: Composição de agregados da Mistura C.....	109
Tabela 4.20: Constantes do modelo de fadiga (curva de Wöhler) para a Mistura C.....	114
Tabela 4.21: Valores da deformação permanente obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida (T=45°C) para Mistura C.....	116
Tabela 4.22: Valores da inclinação do trecho entre 100s e 3600s, obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica (T=45°C) para Mistura C.....	117
Tabela 4.23: Resultados do ensaio de perda de massa (T=25°C) para a Mistura C.....	117
Tabela 4.24: Resultado obtido no ensaio de adesividade – Metodologia Lottman Modificada para a Mistura C.....	117
Tabela 5.1: Constantes do modelo de fadiga (curva de Wöhler) para as quatro misturas estudadas.....	127
Tabela 5.2: Valores da deformação permanente para as misturas estudadas, obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida (T=45°C).....	131
Tabela 5.3: Valores da inclinação do trecho entre 100s e 3600s, obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida (T=45°C) para as quatro misturas avaliadas.....	131
Tabela 5.4: Resultados dos ensaios de perda de massa Cântabro das misturas estudadas.....	133
Tabela 5.5: Resultados dos ensaios obtidos através da Metodologia Lottman Modificada das misturas estudadas.....	135

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Variáveis que afetam as propriedades das misturas asfálticas. ....	52
Quadro 3.1: Quantidade de amostras preparadas para Dosagem Marshall e ensaio de Mr e Rt. ....	57
Quadro 3.2: Quantidade de amostras preparadas para ensaios especiais. ....	58
Quadro 3.3: Características do ligante utilizado na pesquisa. ....	59
Quadro 3.4: Características tecnológicas dos agregados minerais. ....	63
Quadro 3.5: Características tecnológicas do agregado siderúrgico. ....	65
Quadro 4.1: Resumo dos resultados das propriedades finais da mistura de Referência. ....	90
Quadro 4.2: Resumo dos resultados das propriedades finais obtidos para a Mistura A. ....	99
Quadro 4.3: Resumo dos resultados das propriedades finais da Mistura B. ....	108
Quadro 4.4: Resumo dos resultados das propriedades finais obtidos para a Mistura C. ....	118

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABGE: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AFS: *American Foundrymens Society*

AI: *Asphalt Institute*

ASTM: *Americam Society of Testing and Materials*

ATR: Afundamento de Trilha de Roda

BOF: *Blast Oxigen Furnace*

CAN: Cimento Asfáltico Natural

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado à Quente

CEC: *Centro de Estudios Carreteras*

DAER/RS: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul

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

DMT: Distância Média de Transporte

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

EAF: *Eletric Arc Furnace*

ECA: Efeito Calor e Ar

EGC: Escória com Granulometria Corrigida

Est: Estabilidade

EVA: Copolímero Etileno – Acetato de Vinila

FEPAM: Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Rio Grande do Sul

FHWA: *Federal Highway Administration*

Flu: Fluência

HMA: *Hot Mix Asphalt*

Hz: Hertz

IBS: Instituto Brasileiro de Siderurgia

ISC: Índice de Suporte Califórnia

LAPAV: Laboratório de Pavimentação

LD: *Linz e Donawitz*

LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*

M<sub>E</sub>: Massa Específica

MME: Ministério de Minas e Energia

Mr: Módulo de resiliência

NBRI: *National Building Research Institute*

N<sub>r</sub>: vida de fadiga

OH: *Open Heart*

PTM: *Pennsylvania Testing Method*

R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinação

R.A.F: Resíduo Areia de Fundação

RBV: Relação Betume Vazios

REFAP: Refinaria Alberto Pasqualini

rpm: rotações por minuto

RRT: Resistência Retida à Tração

Rt: Resistência à tração por compressão diametral

s: segundos

SBR: Borracha – Butadieno – Estireno

SGC: Compactador Giratório Superpave

SUPERPAVE™: *Superior Performance Asphalt Pavements*

T: Temperatura

TSD: Tratamento Superficial Duplo

μ : Coeficiente de Poisson

UTRESA: União dos Trabalhadores em Resíduos Especiais e Saneamento Ambiental

VAM: Vazios de Agregado Mineral

VV: Volume de Vazios

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Ao analisar-se o atual sistema rodoviário brasileiro, torna-se evidente a pequena extensão de rodovias pavimentadas, que totalizam apenas 9,5% do total da malha rodoviária existente. A razão para tal fato está diretamente relacionada com a escassez de recursos públicos e com os altos custos dos materiais empregados na pavimentação de estradas.

Há uma profunda relação entre transportes e desenvolvimento econômico, uma vez que sem transportes não há qualquer possibilidade de pleno aproveitamento do potencial de uma região ou país.

O transporte rodoviário é bastante flexível, tanto em relação à qualidade das vias quanto ao tamanho e valor das cargas, além de ser o único que permite operações de transportes desde a origem até o destino final. No Brasil a opção rodoviária acabou prevalecendo na repartição modal das cargas, mais pela deficiência dos demais modais do que pelas suas próprias virtudes, conforme representado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Divisão modal no transporte de cargas do país.

<b>MODAL</b>	<b>% do tráfego</b>
Aéreo	0,3
Aquaviário	11,7
Dutoviário	4,0
Ferrovário	21,0
Rodoviário	63,0

(Fonte: Mello, 2001).

A utilização constante de recursos naturais (exploração de jazidas e derivados de petróleo) na pavimentação asfáltica traz para o setor de pavimentação a necessidade de combinar soluções de engenharia e preservação do meio ambiente, uma vez que na pavimentação são



empregados grandes volumes de materiais. Desta maneira, pode-se dar destino adequado a resíduos e subprodutos - escória de aciaria, areia de fundição, polímeros, elastômeros, entre outros - gerados por diversos tipos de indústrias.

O aproveitamento destes resíduos torna-se vantajoso para as empresas que geram o resíduo, uma vez que as indústrias podem agregar valor ao rejeito e diminuir os gastos com estocagem e tratamento do resíduo. Para a construção, a vantagem seria a queda do preço do material granular, além de poder usufruir de um agregado tecnicamente competitivo.

A utilização da escória de aciaria tem servido para as mais variadas aplicações como: estabilização de solos, fertilizantes, matéria prima para produção de cimento e agregado para construção de leito ferroviário (Rohde, 2002).

Dentre as aplicações destaca-se o emprego da escória de aciaria como agregado para pavimentação. Vários estudos verificaram a possibilidade de adição de escória de aciaria, tanto na massa asfáltica como para material de base e sub-base, podendo-se destacar nacionalmente as pesquisas de Lima *et al.* (2000), Silva *et al.* (2002), Rohde (2002), Cavalcante *et al.* (2003), Castelo Branco (2004) e Nóbrega *et al.* (2004). No âmbito internacional destacam-se as pesquisas de Nouman *et al.* (1992), Kandhal e Hoffmann (1998), Khan e Wahhab, (1998) e Bagampadde *et al.* (1999).

O emprego de Resíduo Areia de Fundição (R.A.F) em pavimentação é bastante atraente para as indústrias geradoras, pois na pavimentação são utilizados grandes volumes de materiais. Haveria ainda redução de riscos de acidentes ambientais, uma vez que as areias de fundição são altamente poluidoras, mas quando utilizadas em misturas asfálticas tornam-se encapsuladas, deixando de liberar os contaminantes presentes na areia de fundição.

Bonet (2002) atestou a viabilidade técnica e ambiental da utilização de Resíduo Areia de Fundição (R.A.F) em misturas asfálticas do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). De Reis e Ferreira (2004) estudaram o uso de resíduos (Escória de Aciaria, Areia de Fundição e polímeros) na composição de revestimentos asfálticos ecogênicos do tipo pré-misturado a frio (PMF). Outros estudos incorporando resíduo areia de fundição em misturas asfálticas foram realizados por Ciesielki e Collins (1994), Javed *et al.* (1994) *apud* Stefenon (2003), Miller (1998) e Stefenon (2003).

O desempenho de um pavimento é fortemente condicionado pelas características mecânicas

que suas camadas exibem. Essas características dependem dos materiais utilizados (solo, agregados, finos e ligantes), da dosagem da mistura em Concreto Asfáltico, de suas condições de compactação e do processo construtivo. No caso de falha, principalmente no que diz respeito às camadas asfálticas e cimentadas, por serem componentes de alto custo e com importante função estrutural, o insucesso no desempenho de pavimento é marcante.

O aumento do preço dos materiais de construção empregados na pavimentação, a redução dos recursos naturais, a legislação vigente no país e as novas exigências na construção e manutenção de pavimentos rodoviários incentivam a busca por novas soluções para otimizar a relação custo/benefício na produção do pavimento. Com isto cada vez mais é necessário o estudo da incorporação de resíduos industriais em todos os segmentos da construção civil, buscando o uso racional dos recursos naturais e a diminuição dos impactos ambientais decorrentes do processo construtivo, além da diminuição do custo e prolongamento da vida útil do pavimento.

Desse modo, realizar-se-á um estudo visando verificar o comportamento mecânico de misturas do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) utilizando agregados siderúrgicos (Escória de Aciaria) e Resíduo Areia de Fundação (R.A.F) em combinação com agregados minerais (Basalto).

## 1.2 OBJETIVOS DO ESTUDO

### 1.2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico e de adesividade de misturas em concreto asfáltico do tipo CBUQ com a utilização de agregado siderúrgico (Escória de Aciaria) e Resíduos Areia de Fundação (R.A.F) em combinação ao agregado mineral através da dosagem de misturas através da metodologia Marshall.

## 1.2.2 Objetivos Específicos

Este estudo teve os seguintes objetivos específicos:

- a) Verificar as propriedades do CBUQ produzido com incorporação de agregado siderúrgico;
- b) Verificar as propriedades do CBUQ produzido com a adição de Resíduo Areia de Fundação (R.A.F);
- c) Verificar as propriedades do CBUQ produzido com diferentes percentagens de agregado;
- d) Avaliar o consumo de ligante de projeto de cada uma das misturas estudadas.

## 1.2.3 Questões de Estudo

Algumas questões norteiam a realização deste estudo: qual a influência da incorporação da escória de aciaria no comportamento da mistura em concreto asfáltico? Qual a influencia da adição de Resíduo Areia de Fundação (R.A.F) no comportamento da mistura em concreto asfáltico?

## 1.3 SISTEMATIZAÇÃO DO ESTUDO

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, apresentando a seguinte estrutura:

No capítulo 1, Introdução, são apresentados os problemas de pesquisa, seguidos do objetivo geral e dos objetivos específicos.

No capítulo 2, Revisão Bibliográfica, a partir do referencial teórico, são comentados temas que envolvem o estudo, como resíduos industriais, mecanismos de degradação de misturas asfálticas, materiais utilizados em uma mistura, dosagem de concreto asfáltico e algumas considerações sobre o método Marshall.

No Capítulo 3, Materiais e Métodos, é apresentada a descrição do programa experimental, a descrição e caracterização dos materiais empregados no estudo, a metodologia utilizada para preparação das amostras e as técnicas experimentais adotadas para realização dos ensaios.

No capítulo 4, Apresentação dos Resultados, são expostos os resultados obtidos das quatro dosagens realizadas através da Metodologia Marshall e dos ensaios especiais realizados nesta dissertação.

O capítulo 5, Análise dos Resultados, apresenta uma análise comparativa dos resultados das quatro dosagens estudadas, buscando-se uma comparação das misturas com incorporação de resíduos industriais com a mistura de Referência.

No Capítulo 6, Considerações Finais, são apresentadas as conclusões obtidas a partir dos resultados obtidos na pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 OS RESÍDUOS INDUSTRIAIS**

Na última década do século passado, cresceu significativamente a preocupação com questões relativas a conservação ambiental. As empresas são cada vez mais pressionadas pelos órgãos ambientais e sociedade em geral a buscar soluções que minimizem os danos causados ao meio ambiente.

O principal caminho para minimizar os danos gerados pelos resíduos é a sua reutilização ou reciclagem. Nesta etapa, colaboram as obras de engenharia, uma vez que utilizam grandes quantidades de materiais, apresentando desta forma um potencial para emprego dos mais diversos resíduos gerados pela indústria.

A possibilidade de reutilização de resíduos tem motivado o desenvolvimento de tecnologias capazes de reaproveitar estes resíduos na pavimentação, podendo destacar o emprego da escória de aciaria e Resíduo Areia de Fundição (R.A.F), ambos empregados neste estudo.

### **2.2 AGREGADOS SIDERÚRGICOS**

#### **2.2.1. Aço**

O aço é uma liga metálica formada de ferro e pequenas quantidades de carbono (até 2,0%) e variadas quantidades de outros elementos. A produção mundial de aço bruto em 2003 somou 964,7 milhões de toneladas, segundo o Ministério de Minas e Energia (2004). Na Figura 2.1 pode ser visualizada a evolução anual da produção mundial de aço. Para 2004, a projeção do Instituto Brasileiro de Siderurgia é de que a produção mundial poderá alcançar 1 bilhão de toneladas pela primeira vez (IBS, 2004).

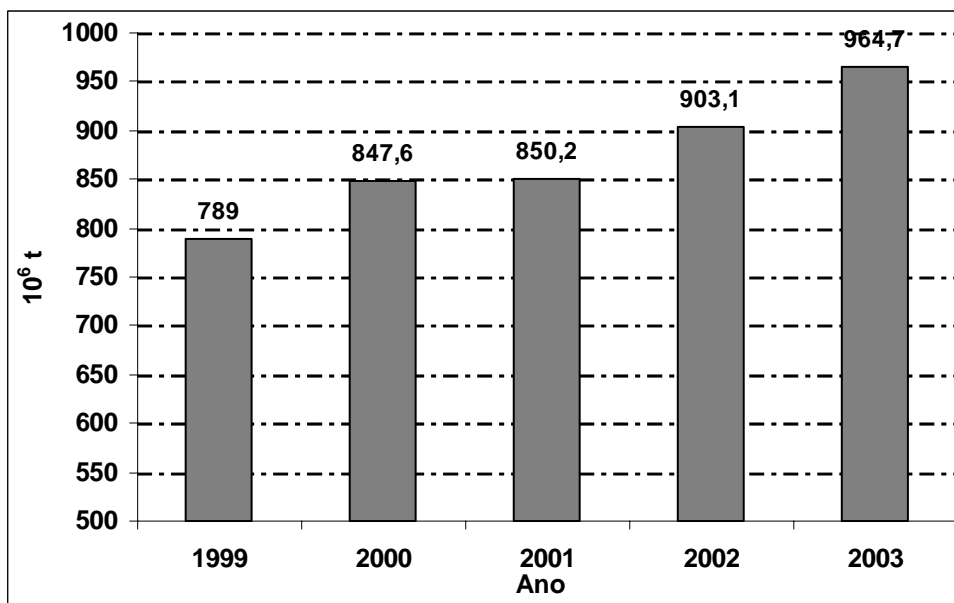


Figura 2.1: Evolução anual da produção mundial de aço (Adaptado de Ministério de Minas e Energia, 2004).

No Brasil, em 2003, a produção de aço bruto alcançou 31,1 milhões de toneladas, sendo um recorde histórico, superando em 5,2% a produção do ano de 2002 (IBS, 2004). A produção brasileira representou em 2003 o equivalente a 3,2% do total de aço produzido pela indústria siderúrgica mundial e 52,3% da produção siderúrgica na América Latina, ocupando assim a quarta posição na exportação mundial de aço. (MME, 2004).

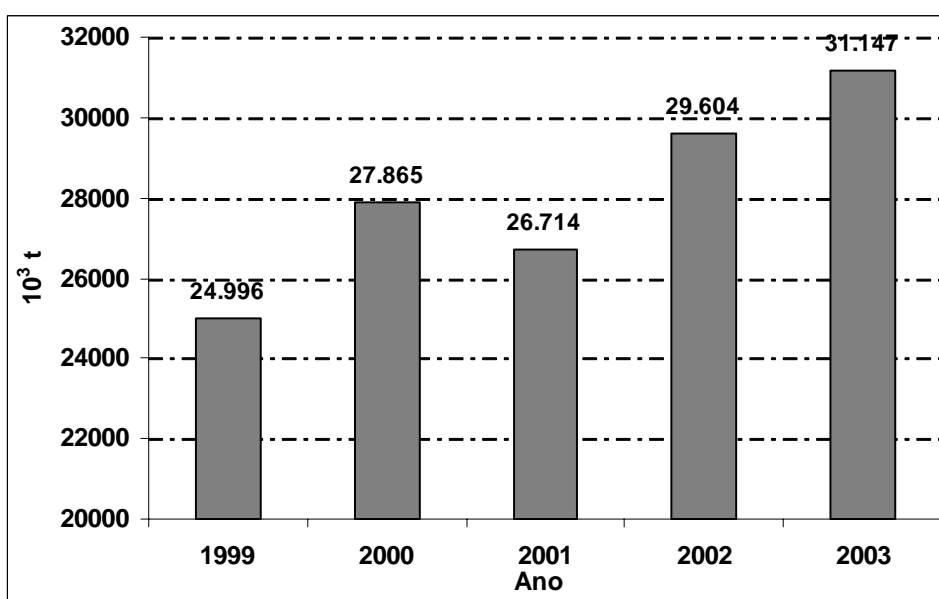


Figura 2.2: Produção nacional de aço nos últimos cinco anos (Adaptado de IBS 2004)

Conforme Masuero (2001), no ano de 2000 o Rio Grande do Sul foi responsável por 2,3% da produção brasileira de aço.

### 2.2.2. A Escória de Aciaria

As características das escórias de aciaria geradas dependem basicamente do processo utilizado para produção do aço. Rohde (2002) descreve os três grandes processos existentes pra fabricação do aço, diferenciados pelo diferente tipo de forno empregado no refino: o Siemens-Martin (*Open Heart – OH*), o conversor a oxigênio (*Linz e Donawitz – LD* ou *Blast Oxygen Furnace – BOF*) e o forno elétrico a arco (*Electric Arc Furnace*).

Os fornos elétricos a arco são largamente utilizados por empregar a fusão e o refino de sucata, juntamente com os conversores a oxigênio que utilizam o ferro-gusa líquido. Os fornos Siemens-Martin estão em desuso.

Conforme descreve Machado (2000), existem dois tipos de escorias siderúrgicas produzidas em larga escala, decorrentes do processo utilizado:

- alto forno: resultante da fusão redutora dos minérios para obtenção do ferro-gusa (alto teor de carbono); e
- aciaria: resultante da produção do aço. Pode ser obtida em fornos elétricos e conversores a oxigênio, durante a conversão de sucata em aço. As escórias de aciaria podem ser ainda divididas em oxidantes (produzida através da injeção de oxigênio no aço fundido para oxidar o carbono, silício e enxofre) e redutoras (gerada após o vazamento da escória oxidada e adição de oxido de cálcio (CaO) e fluorita (CaF<sub>2</sub>)).

As escórias siderúrgicas são sub-produtos gerados por processos industriais destinados a obter, em primeiro lugar o ferro gusa (ferro de primeira fusão) e em segundo lugar o aço. Segundo Silva *et al.* (2002) a principal diferença entre eles é a quantia de carbono presente (gusa, 4% e aço, até 1,7%).

No Rio Grande do Sul, as siderúrgicas são do tipo semi-integrada, operando apenas na etapa de refino e conformação do aço, não na produção de ferro primário, gerando escória de aciaria elétrica, conforme descreve Masuero (2001).

A quantia de escória gerada é independente do tipo de processo utilizado, variando entre 100 e 160 kg de escória por tonelada de aço líquido (Machado, 2000; Silva *et al.*, 2002; Castelo Branco, 2004).

### 2.2.3. Benefícios do uso da Escória de Aciaria

A reutilização da escória de aciaria traz os seguintes benefícios:

- Ambientais: auxilia a questão de deposição deste rejeito, além de diminuir a degradação ambiental em áreas de extração de agregados pétreos. As escórias de aciaria devem passar por avaliação através de processos de lixiviação e solubilização. Masuero (2001) e Rohde (2002) classificaram as escórias de aciaria utilizadas em seus estudos como resíduo classe II (não inerte).
- Técnicos: os grãos da escória, devido a sua forma e textura, apresentam maior resistência à derrapagem e ao desgaste superficial, são 100% trituráveis e de boa graduação, baixa abrasão *Los Angeles*, boa resistência ao desgaste; alta estabilidade; resistência mecânica; excelentes propriedades de atrito e facilidade de compactação (Machado, 2000; Nouman *et al.*, 1992; Khan e Wahhab, 1998; Silva, 2001).
- Econômicos: Segundo Lima *et al.* (2000), as escórias de aciaria são um material com custo bem inferior ao da brita, tornando-se competitiva até uma certa Distância Média de Transporte (DMT), e considerando-se o modal de transporte rodoviário, essa distância seria de 80km.

### 2.2.4 Usos da Escória de Aciaria

Entre as diversas aplicações das escórias de aciaria destacam-se o emprego como agregado na pavimentação, tanto em misturas asfálticas como para base e sub-base de rodovias, agregado para construção de leito ferroviário, estabilização de solo, fertilizante e matéria-prima para produção de cimento.

As principais aplicações da escória de aciaria no Brasil estão representadas na Figura 2.3, onde se observa que 46,60% da escoria de aciaria é utilizada como base de estradas, e outros 30,90%, estocados, não tendo utilização imediata (Caselato, 2004).



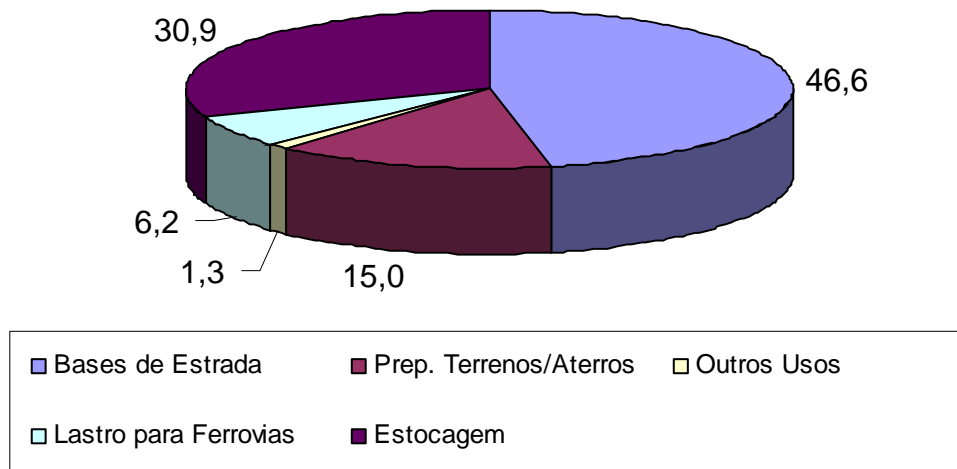


Figura 2.3: Principais aplicações da escória de aciaria no Brasil (Fonte: Caselato, 2004).

### 2.2.5 O Uso da Escória de Aciaria na Pavimentação

Desde o final da década de 70 a escória de aciaria vem sendo utilizada na infraestrutura de estradas em países como Estados Unidos, Inglaterra, Japão e Canadá. (Cavalcante *et al.*, 2003; Castelo Branco, 2004). No Brasil, o uso deste rejeito teve início em 1986, com a execução de 100Km de base e sub-base no estado do Espírito Santo. (Silva, 2001).

Conforme Nouman *et al.*, 1992; Silva, 2001; Cavalcante *et al.*, 2003, e Castelo Branco, 2004 alguns países como Grã-Bretanha, Alemanha, Polônia, França, Japão, Estados Unidos e Rússia, possuem normalização para utilização de escória de aciaria, sozinha ou combinada, como agregado em revestimentos asfálticos. Segundo Nouman *et al.*, (1992) misturas asfálticas que utilizam escória de aciaria têm sido largamente empregada nestes países, principalmente em áreas próximas às usinas produtoras de aço.

O agregado produzido com escória de aciaria apresenta partículas ásperas, angulares e duráveis, tornando-o apropriado para aplicação em pavimentação, além de apresentar características de superfície melhores que os agregados convencionais (Khan e Wahhab, 1998).

De acordo com Nouman *et al.* (1992), as escórias de aciaria apresentam uma série de propriedades que se adequam, de modo geral, ao emprego em pavimentação: as escórias de

aciaria são 100% trituráveis e de boa graduação; boa resistência ao desgaste; alta estabilidade; resistência mecânica; excelentes propriedades de atrito (resistência à derrapagem) e facilidade de compactação.

Como desvantagens do uso deste material, Nouman *et al.* (1992) e Khan e Wahhab (1998) descrevem: o acréscimo no consumo de ligante, decorrente das características de ser um material bastante absorvente e poroso, elevando o custo final do concreto asfáltico. Outros fatores como textura superficial, angulosidade; alta variação na composição química das escórias e seu alto potencial expansivo também são propriedades negativas desse material.

Nouman *et al.* (1992) estudaram oito misturas em concreto asfáltico, das quais cinco utilizaram escória de aciaria, variando a proporção de agregados graúdo e miúdo. Foi avaliado o comportamento quanto à resistência a tração, módulo de resiliência, fluência, estabilidade, fadiga e dano induzido por umidade das misturas.

Com os resultados obtidos, os autores afirmam que as escórias de aciaria são viáveis para utilização em misturas asfálticas, pois apresentaram melhor qualidade, em todas as propriedades avaliadas, que os agregados normalmente utilizados na região de estudo, o Canadá.

Kandhal e Hoffman (1998) propuseram o uso da parcela fina (passando na peneira de 4,8 mm) curada deste material para a produção de misturas asfálticas a quente. Fizeram também uma correlação entre a expansão das parcelas fina e grossa (retida na peneira de 4,8 mm) indicando o uso da parcela fina curada deste material. A obtenção destes resultados foi conseguida através da realização de ensaios de expansão e resistência à tração retida por umidade induzida – Metodologia Lotmann (AASHTO T-283) com materiais oriundos de diferentes origens, a fim de verificar possíveis problemas ocasionados pela expansibilidade e pela umidade.

Os estudos conduzidos por estes autores revelaram que as misturas asfálticas a quente contendo agregado miúdo de escória de aciaria apresentaram estabilidade Marshall até 35,0% superior às das misturas contendo agregados convencionais. Após este estudo, algumas recomendações sobre o agregado miúdo de escória de aciaria foram incorporadas às normas do Departamento de Transportes da Pensilvânia, tais como: apresentar qualidade e densidade uniformes, expansão não superior a 0,5% (método PTM 130/78 do Departamento de

Transportes da Pensilvânia), percentual retido da estabilidade Marshall a 60°C superior a 75,0% e expansão dos corpos-de-prova quando imersos em água a 71°C durante 48 horas, de no máximo 1,0%.

A aplicação de escória de aciaria pura ou misturada também foi estudada por Khan e Wahhab (1998). Os autores avaliaram a combinação da escória de aciaria com agregados calcários na parte oriental da Arábia Saudita para realização de selagens com lama asfáltica. O estudo verificou que a combinação dos agregados apresentou resultados melhores do que quando utilizados individualmente, uma vez que suas qualidades são complementares. O agregado calcário apresenta boa afinidade com o betume e a escória apresenta alta resistência ao esmagamento e baixa abrasão. As misturas que não utilizavam a combinação dos agregados não apresentaram bom desempenho. A mistura de melhor desempenho foi obtida com a mistura de agregado calcário e escória de aciaria passando na peneira nº 30 (abertura de 0,6mm) com 15% de emulsão catiônica.

Bagampadde *et al.* (1999) avaliaram oito tipos de misturas utilizando escória de aciaria. As misturas estudadas utilizaram, além de agregados calcários e aditivos, diferentes proporções e diferentes formas (tanto como agregado graúdo como miúdo) a escória de aciaria.

Os autores verificaram que misturas com a parcela grossa da escória, agregados calcários e CAP modificado com polímero demonstraram maior vida de fadiga (carga dinâmica, tempo de ciclo 0,1s) e maior resistência à deformação permanente (*creep* dinâmico). Já as misturas com o uso de cal e polímero apresentaram maior resistência à umidade, sendo que as misturas que utilizaram CAP modificado com polímero ainda apresentaram menor susceptibilidade térmica.

A mistura que utilizou apenas escória de aciaria como agregado não se mostrou adequada para ser utilizada no local da pesquisa, visto que a mesma apresentou a maior deformação permanente (*creep* dinâmico) e não suportou ser ensaiada em tensões acima de 689,5 kPa. A este fato os autores atribuíram ao aspecto muito áspero dos grãos da escória, que leva a maiores tensões cisalhantes nas misturas.

Lima *et al.* (2000) avaliaram dois pavimentos, sendo um em Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) e outro em Tratamento Superficial Duplo (TSD), executados com escória de aciaria nas camadas de base e sub-base. A comparação foi feita com um terceiro pavimento que utilizava agregados convencionais. As comparações foram feitas com base em avaliações

estruturais, através da retroanálise do módulo resiliente “*in situ*” de todas as camadas do pavimento, utilizando o programa RETRAN5-L, com base nas bacias de deformação obtidas com a Viga Benkelman. Os autores concluíram que pavimentos delgados feitos com a utilização de escória de aciaria são equivalentes aos espessos executados com agregados convencionais, além de contribuir significativamente para a preservação do meio ambiente.

Silva *et al.* (2002) apresentaram a dosagem Marshall de uma mistura em concreto asfáltico do tipo CBUQ, enquadrada na faixa C do DNER, utilizando 97,0% de escória de aciaria com graduação menor do que 12,5 mm, 3,0% de filer calcário e CAP 20. A escória utilizada foi envelhecida durante mais de 3 anos, apresentando expansão de 1,83%, ficando abaixo do limite de 3,0% estabelecido pela norma do DNER (ME 262/94).

Rohde (2002) avaliou a utilização da escória de aciaria elétrica como material de base e sub-base de pavimentos, enquadrados na faixa C do DNER. A escória de aciaria teve sua granulometria corrigida, denominada EGC, devido aos valores de ISC encontrados (menores que 100%) não serem similares aos encontrados na bibliografia que indica valores de ISC de até 300%. Após a correção granulométrica a escória de aciaria estudada apresentou melhorias nas propriedades avaliadas. O módulo de resiliência ( $M_r$ ) do material estudado apresentou-se superior ao de materiais como basalto, saibro e granito.

Cavalcante *et al.* (2003) avaliaram o desempenho de uma mistura em concreto asfáltico do tipo CBUQ, composta de 56% de escória de aciaria e 43% de areia de campo e CAP 50/60 com adição de DOPE. A comparação desta mistura foi realizada com uma mistura de referência composta por agregados convencionais. Os autores verificaram que a mistura contendo escória de aciaria obteve um teor de ligante cerca de 10% superior ao da mistura comparativa. Os valores de  $M_r$  e  $R_t$  encontrados para a mistura composta com escória de aciaria foram inferiores ao da mistura comparativa. Os autores atribuem a heterogeneidade do rejeito às influências no teor de projeto, parâmetros mecânicos e propriedades volumétricas.

Castelo Branco (2004) estudou seis misturas asfálticas do tipo CBUQ, enquadradas na faixa C do DNER. A proporção de escória de aciaria variou entre 40%, 60% e 80%, sendo que três misturas foram moldadas com compactador mecânico e três misturas em compactador manual. Segundo o autor, este procedimento foi realizado a fim de verificar a influência do método de compactação nos parâmetros volumétricos das misturas, uma vez que havia grande dispersão entre os parâmetros avaliados. Contudo, as variações dos parâmetros volumétricos

persistiram. As misturas contendo escória de aciaria foram comparadas com uma mistura composta por agregados convencionais.

No Brasil já existem rodovias onde foi utilizada escória de aciaria como agregado para pavimentação, podendo-se destacar: BR-293 (Volta Redonda-Três Rios); RJ-157 (Barra Mansa-divisa RJ/SP); RJ-141 (BR-393-Vargem Alegre); BR-116 (Volta Redonda-divisa RJ/SP); varias ruas do município de Volta Redonda e várias cidades da região Sul Fluminense (Alvarenga, 2001 *apud* Castelo Branco, 2004).

Para emprego das escórias de aciaria em pavimentação, o material deve estar de acordo com a especificação do DNER (ME 262/94), a qual fixa os seguintes requisitos:

- Potencial de expansão determinado através do método PTM 130 (*Pennsylvania Testing Method*), adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG): máximo de 3% ou valor determinado pela especificação particular de projeto;
- Teor de impurezas: as escórias de aciaria devem estar isentas de impurezas orgânicas, de contaminação com escórias de alto forno, solos e outros materiais que possam prejudicar os valores especificados em projeto;
- Granulometria: a composição granulométrica da escória de aciaria deve se manter na proporção de 40% na faixa de 0 a 1,27cm (1/2") e 60% na faixa de 1,27cm a 5,08cm (2") de abertura nominal, e deve atender à granulometria de projeto. A granulometria da escória de aciaria destinada a revestimento deverá ser definida em estudos de laboratório, de modo a atender as características exigidas em projeto;

Condições específicas: a escória de aciaria deve, ainda, obedecer aos seguintes limites:

- Absorção de água: máximo de 1% a 2% em peso. Determinada pelo método ABNT MB-2698, de 1987;
- Massa específica: de 3,0g/cm<sup>3</sup> a 3,5g/cm<sup>3</sup>. Determinada pelo método ABNT MB-2698, de 1987.
- Massa unitária: de 1,5g/cm<sup>3</sup> a 1,7g/cm<sup>3</sup>. Determinada pelo método ABNT MB-1665, de 1982;
- Desgaste por abrasão *Los Angeles*: deve ser no máximo de 25% para sub-base e revestimento. Determinada pelo método ABNT MB-170, de 1983;
- Durabilidade ao sulfato de sódio, cinco ciclos: máximo de 5%. Determinada pelo método ASTM C88-76.

### 2.2.6 A Expansibilidade das Escórias de Aciaria

O maior empecilho quanto à utilização da escória de aciaria em obras de pavimentação é o seu alto potencial de expansibilidade. Segundo Silva *et al.* (2002), a expansão deste material pode chegar a 10%, sendo que o uso deste material com expansão superior a 3% é indevido. Ainda, segundo os autores, o uso de material com expansão superior a 3% poderá gerar “vulcões” na pista de rolamento, chegando a ter levantamento da capa em mais de 10cm em relação ao greide acabado.

De acordo com Kandhal e Hoffman (1998) e Silva (2001), a formação de defeitos no pavimento ocasionados pela expansão pode ocorrer tanto quando a escória é utilizada em base e/ou sub-base, ou como agregado em revestimentos asfálticos. Segundo os autores, neste segundo caso, apesar de inicialmente o ligante impermeabilizar os grãos da escória, com o desgaste, ocorre o contato entre a escória e a água provocando reações de hidratação e, conseqüentemente, a expansão do material.

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

### 2.2.7 Métodos para Avaliação da Expansibilidade das Escórias

Devido ao alto poder de expansibilidade das escórias de aciaria, sendo esta a principal limitação do seu uso em pavimentação, foram desenvolvidos diversos métodos para avaliação deste fenômeno.

Estudo comparativo dos métodos para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria foi realizado por Machado (2000), podendo-se destacar os seguintes métodos:

- JIS A 5015/92: norma japonesa que especifica o método de ensaio e critérios de expansão para escórias de aciaria. O método avalia a expansão de corpos-de-prova, que depois de imersos em água, são aquecidos a 80°C em ciclos de 6 horas diárias. A norma recomenda uma expansão máxima de 2,5% aos dez dias para que o pavimento não sofra perda de resistência, para misturas asfálticas do tipo CBUQ. Absorção de água deve inferior a

3,0% e a perda por abrasão menor que 30,0% são alguns parâmetros fixados pela norma;

- ASTM D 4792/95 (*Potencial Expansion of Aggregates from Hydration Reactions*): consiste na imersão de corpos-de-prova cilíndricos em água à temperatura de  $71\pm 2^{\circ}\text{C}$  e verificação da variação volumétrica dos mesmos em função da altura do corpo-de-prova;
- ASTM 1260/94 e NBR 11582/91: são métodos adaptados da avaliação da expansão da escória em concretos. O primeiro é a avaliação do potencial da reatividade álcali-agregado e o segundo é a determinação da expansibilidade nas agulhas de *Lê Chatelier* em corpos-de-prova de argamassa de Cimento Portland e água;
- Método das Barras: este método foi adaptado do *National Building Research Institute* (NBRI). O método consiste na moldagem de barras (NBR 9773) de argamassa que após 24 horas são desmoldadas e medidas. Posteriormente, estas barras são colocadas em água a  $80^{\circ}\text{C}$ . Durante doze dias são realizadas leituras. Ao final do ensaio a expansão deve ser inferior a 0,11%. (Masuero, 2000);
- Ensaio de Autoclave: consiste em colocar corpos-de-prova de pasta de cimento (após 24 horas) em autoclave durante 3 horas com pressão de 2 MPa. Posteriormente as amostras são condicionadas a  $23^{\circ}\text{C}$  durante 15 minutos. São realizadas leituras antes e após o condicionamento. (Masuero, 2000); e
- PTM 130/78 do Departamento de Transportes da Pensilvânia, adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG): o método consiste em imergir corpos-de-prova cilíndricos em água à temperatura de  $(71\pm 3)^{\circ}\text{C}$  por um período de 7 dias, sendo realizadas leituras diárias da variação volumétrica. Após 7 dias, o corpo de prova é removido da água, mas mantido na condição saturada. As medições são realizadas por mais 7 dias nesta condição. A expansão volumétrica total é igual a variação volumétrica específica após os 14 dias de ensaio. Este método considera que alguns materiais podem apresentar maior expansão na condição saturada que em submersão (Kandhal e Hoffman, 1998).

De acordo com Rohde (2002), a determinação de diferentes valores de expansão apresentada entre os métodos acima descritos pode ser atribuída à diversidade de condições experimentais de cada método empregado e a grande heterogeneidade apresentada pelas escórias de aciaria. Todavia, os métodos confirmam a instabilidade das escórias e com isso, a necessidade de critérios específicos para avaliação deste fenômeno para emprego de escórias de aciaria em obras de pavimentação.

Nesta dissertação, optou –se por utilizar o método PTM 130/78, adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG) para avaliação da expansibilidade da escória de aciaria empregada neste estudo.

Este método foi escolhido por ser o mais utilizado, sendo ele parte da especificação DNER (ME 262/94) e recomendado na bibliografia (Kandhal e Hoffmann, 1998; Lima *et al.*, 2000; Silva, 2001; Cavalcante *et al.*, 2003; Castelo Branco, 2004).

### 2.3 OS RESÍDUOS AREIA DE FUNDIÇÃO (R.A.F)

A geração do Resíduo Areia de Fundição (R.A.F) acontece na etapa de desmoldagem de peças metálicas e em processos de fundição metalúrgica, sendo um dos principais problemas atualmente a quantidade significativa de resíduos gerados pelas indústrias de fundição.

Segundo FEPAM, (1996) em relatório denominado “Diagnóstico Preliminar da Geração e Destinação Final dos Resíduos Sólidos Industriais no Estado do Rio Grande do Sul”, no qual foram levantadas a geração e destinação dos Resíduos Classes I (perigosos) e Classe II (não inertes), verificou-se que 41,23% das empresas analisadas (47.935 empresas) geram algum tipo de resíduo sólido, número este que corresponde a 19.762 empresas. Destas, 59 trabalham no setor de fundição, gerando 10.472 ton/ano de Resíduo Areia de Fundição (R.A.F).

Segundo Bonin *et al.* (1995) as areias de fundição são normalmente classificadas como Resíduo Classe II (não inerte) através da norma ABNT – NBR 10.004 (1987) da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

O estado do Rio Grande do Sul, através de seu setor industrial, gera em média 20.951,227 ton/ano (FEPAM, 1996), de Resíduos Classe II, distribuídos nos mais diversos segmentos da indústria, conforme apresentado na Tabela 2.1.

A Tabela 2.2 apresenta os destinos dos resíduos industriais Classe II no Rio Grande do Sul, onde se observa que para 90% dos resíduos gerados no estado não há destino conhecido pelo órgão ambiental competente. Apenas 7,6% dos resíduos sólidos gerados possuem algum tipo de reaproveitamento, demonstrando pouco incentivo científico e tecnológico para melhor aproveitamento de resíduos e manutenção do meio ambiente.



Tabela 2.1: Geração de resíduos sólidos industriais Classe II, por setor industrial no Rio Grande do Sul (Adaptada de FEPAM, 1996).

<b>Setor Industrial</b>	<b>Quantidade média gerada (ton/ano)</b>	<b>(%)</b>
<b>1 – Indústria Alimentar</b>	16.361.696	78,1
<b>2 – Indústria da Madeira</b>	2.491.482	11,9
<b>3 – Indústria Metal Mecânica</b>	1.254.561	6,0
<b>4 – Indústria de Bebidas</b>	399.076	1,9
<b>5 – Indústria Couro Calçadista</b>	98.047	0,47
<b>6 – Indústria da Celulose e Papel</b>	227.990	1,1
<b>7 – Beneficiamento de Fibras</b>	46.278	0,22
<b>8 – Indústria Química</b>	53.539	0,25
<b>9 – Indústria do Fumo</b>	9.455	0,04
<b>10 – Indústria da Borracha</b>	8.242	0,04
<b>11 – Indústria do Plástico</b>	961	0,004
<b>TOTAL</b>	<b>20.951.227</b>	<b>100</b>

Tabela 2.2: Destino dos resíduos sólidos industriais Classe II no Rio Grande do Sul (Adaptada de FEPAM, 1996).

<b>Destino</b>	<b>Quantidade (ton/ano)</b>	<b>(%)</b>
<b>1 – Não Informado</b>	18.955.585	90,0
<b>2 – Reaproveitamento</b>	1.597.415	7,6
<b>3 – Centrais de Tratamento de Resíduos</b>	98.992	0,47
<b>4 – Queima</b>	93.379	0,44
<b>5 – Incorporação ao solo</b>	91.401	0,43
<b>6 – Lixão Particular</b>	61.074	0,29
<b>7 – Estocagem</b>	24.170	0,11
<b>8 – Aterro Industrial Próprio</b>	14.197	0,07
<b>9 – Tratamento Biológico</b>	7.775	0,04
<b>10 – Lixão Municipal</b>	7.240	0,04
<b>TOTAL</b>	<b>20.951.227</b>	<b>100</b>

De acordo com dados da FEPAM (1996), os destinos dos resíduos areia de fundição no estado do Rio Grande do Sul são:

- Aterros licenciados pela FEPAM - 81%;
- Aterros particulares - 8%;

- Reaproveitamento - 6%;
- Aterros Municipais - 3%; e
- Estocados - 2%.

Através destes dados pode-se perceber o impacto ambiental gerado pelo setor industrial, através do consumo de matéria-prima e posterior geração de resíduos. A quantidade de resíduos gerados por essas empresas nos leva cada vez mais a buscar soluções para o reaproveitamento de resíduos e conseqüentemente a preservação do meio ambiente.

### **2.3.1 Classificação do Resíduo Areia de Fundição (R.A.F)**

Segundo Lo Ré (1978) *apud* Bonet (2003), os Resíduos Areia de Fundição podem ser classificados segundo os critérios de origem, uso, emprego na caixa de fundição e qualidade do metal, os quais estão descritos a seguir:

- a) Quanto à origem, as areias de fundição podem ser:
  - Areias Naturais: são originadas de arenitos de cimento argiloso ou de alteração de rochas feldspáticas (saibros), que são usados diretamente na moldagem, sofrendo apenas uma correção na umidade;
  - Areias Semi-sintéticas: são resultantes das modificações introduzidas nas areias naturais, por meio de adição de substâncias que visam corrigi-las, a fim de melhorar sua qualidade; e
  - Areias Sintéticas: são obtidas pela mistura da areia-base e aglomerantes em proporção adequada e umidade determinada.
- b) Quanto ao uso, podem ser:
  - Areia nova: quando utilizada pela primeira vez na fundição; e
  - Areia usada: quando recuperada de fundições anteriores.
- c) Quanto ao emprego na caixa de fundição, as areias de fundição podem ser classificadas em:
  - Areia de faceamento: é a parte da areia que faceia o modelo e entra em contato com o metal de vazamento;
  - Areia de enchimento: é a parte da areia que constitui o restante da caixa de moldagem; e

- Areia de macho: é areia destinada ao preparo dos machos, conformadores das cavidades internas das peças.
- d) Quanto ao estado de umidade da areia, podem ser:
- Areia úmida ou verde: é obtida no momento do vazamento, aproximadamente a mesma umidade do preparo; e
  - Areia estufada: é aquela preparada com composição adequada para macho e moldes e que sofrem cozimento em estufa antes do vazamento.
- e) Quanto à qualidade do metal, podem ser:
- Areias para metais ferrosos: (ferro de fundido cinzento, maleável e aço); e
  - Areia para metais não ferrosos: (bronze e latão, cobre e níquel, alumínio e magnésio).

### **2.3.2 O Uso do Resíduo Areia de Fundição (R.A.F) na Pavimentação**

Conforme estudos da *American Foundrymens Society* – AFS (1991) *apud* Stefenon (2003), a procura de alternativas para o uso dos resíduos areia de fundição teve início na década de 90, não se tendo nenhum registro anterior do uso deste material em misturas asfálticas. Foram então realizadas pesquisas com a incorporação de 10% de areia de fundição em Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) sendo os resultados avaliados e comparados com uma mistura padrão, com uso de areia natural. Os autores verificaram que as propriedades avaliadas através do método Marshall (estabilidade, fluência, volume de vazios e vazios de agregado mineral) foram semelhantes em ambas as misturas.

Ciesielki e Collins (1994) realizaram pesquisas utilizando areia de fundição como subprodutos em misturas asfálticas. Os autores verificaram que a adição de até 15% de resíduo areia de fundição em misturas asfálticas usinadas a quente pode resultar em desempenho satisfatório. Os autores verificaram, ainda, que para teores acima de 15% as amostras tornam-se suscetíveis à umidade. Os autores atribuíram esse fenômeno ao desprendimento da película de asfalto dos agregados, fazendo com que haja deteriorização da mistura. A solução seria o uso de aditivo melhorador da adesividade.

Javed *et al.* (1994) *apud* Stefenon (2003) realizaram estudos da incorporação de diversas areias de fundição em misturas asfálticas. O estudo constituiu em substituir uma parcela dos agregados finos da mistura em concreto asfáltico convencional por areia de fundição. Os

resultados ficaram dentro das especificações para a incorporação de até 15% de resíduo em relação ao peso de agregados da mistura. Para valores acima de 15%, valor este considerado como máximo de resíduo possível de ser incorporado às misturas estudadas, a adição de areia de fundição provocava aumento do volume de vazios e diminuição da densidade, fluência e estabilidade Marshall. O estudo foi realizado em misturas asfálticas com até 30% de resíduo areia de fundição. As amostras apresentaram redução da resistência à tração (após imersão em banho de água quente), o que levaria a misturas suscetíveis à desagregação através da perda de adesividade entre o agregado e o ligante, pela ação da água.

Miller (1998) pesquisou o potencial de uso de areias de fundição descartadas em misturas asfálticas, em substituição à areia natural. O autor avaliou as propriedades de 17 diferentes tipos de areias de fundição, oriundas de 13 fundições do estado de Wisconsin. Deste montante, o autor selecionou 6 areias de fundição para incorporação em misturas asfálticas.

O autor realizou a dosagem de 8 misturas, através da metodologia SUPERPAVE™ (SUperior PERformance Asphalt PAVements), sendo seis com os resíduos selecionados previamente, uma com areia de fundição nova e uma mistura padrão com areia natural para comparação dos resultados. Através dos resultados, o autor concluiu que os resíduos areia de fundição empregados no estudo podem substituir as areias naturais, com as mesmas propriedades da mistura padrão. Quanto aos danos causados pela umidade em misturas asfálticas, o autor relata a necessidade de novos estudos, uma vez que a mistura padrão também apresentou resultado insatisfatório, necessitando de novos ensaios para compreender a influência das areias de fundição na suscetibilidade das misturas à água.

O resultado do estudo feito por Miller foi encaminhado para as indústrias da construção de estradas e de empresas de fundição locais, para possível reutilização deste resíduo.

Bonet (2002) analisou a viabilidade técnica do reaproveitamento de Resíduo Areia de Fundição (R.A.F) em misturas asfálticas do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). Os resultados obtidos pelo autor nos ensaios de lixiviação e solubilização realizados nas misturas asfálticas, onde foi comparado o comportamento dos resíduos areia de fundição, antes e após sua incorporação no CBUQ, mostrou-se satisfatório, uma vez que envolveu totalmente os agregados da mistura, evitando que os mesmos fossem liberados a meio ambiente com possível contaminação.

O autor avaliou ainda a incorporação de 8% de resíduo areia de fundição na mistura em concreto asfáltico, através da metodologia Marshall e avaliação mecânica da mistura através de ensaios de Módulo de Resiliência (Mr) e Resistência à Tração (Rt). Neste estudo, o autor atesta a viabilidade técnica e ambiental da incorporação de 8% resíduo areia de fundição em misturas asfálticas. O autor sugere que sejam realizados trabalhos futuros para uma avaliação de longo prazo (ensaio de envelhecimento e desgaste da mistura) das propriedades da mistura em concreto asfáltico, verificando a possibilidade de desprendimento da película de ligante asfáltico do resíduo areia de fundição, com possível liberação de fenóis e metais pesados ao meio ambiente.

Stefenon (2003) estudou a incorporação de resíduos industriais em misturas asfálticas do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). Os resíduos estudados por Stefenon foram o Resíduo Areia de Fundição (R.A.F) e laminas de fibra de vidro. Foram estudados quatro projetos do tipo CBUQ, sendo um para cada tipo de areia incorporada, comparada com uma mistura de referência. As misturas com incorporação de fibra de vidro foram analisadas variando a percentagem de fibra (0%, 1%, 2% e 3%) em relação ao peso de agregados, totalizando quatro misturas. A avaliação mecânica das oito misturas estudadas foi realizada através de ensaios de Módulo de Resiliência (Mr) e Resistência à Tração (Rt).

As misturas com incorporação de resíduo areia de fundição apresentaram aumento do módulo de resiliência em relação à mistura convencional de cerca de 20%, e apresentaram diminuição da estabilidade e aumento da fluência. As misturas que utilizaram fibra de vidro praticamente mantiveram os mesmos padrões da mistura comparativa. O autor verificou, ainda, que as misturas que incorporam resíduos tiveram um aumento do teor de ligante.

De Reis e Ferreira (2004) apresentaram um estudo para a incorporação de materiais residuais na composição de revestimentos asfálticos ecogênicos. Os resíduos empregados no estudo são constituídos de escória de aciaria, areia de fundição e materiais compostos por polímeros termoplásticos, elastoméricos e cargas minerais provenientes da indústria de calçados e de pneumáticos (EVA, poliuretanos e SBR). A avaliação do estudo está baseada na produção de misturas asfálticas pelo processo a frio e na construção de trechos experimentais das vias de acesso e internas da União dos Trabalhadores em Resíduos Especiais e Saneamento Ambiental – UTRESA. O estudo descreve aspectos do projeto de dosagem e executivo das etapas de produção e aplicação das misturas asfálticas, além do monitoramento do impacto ambiental.

## 2.4 PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

O pavimento é uma estrutura constituída por uma ou mais camadas, com características para receber as cargas aplicadas na superfície e distribuí-las, de modo que as tensões resultantes fiquem abaixo das tensões admissíveis dos materiais que constituem a estrutura (Pinto e Preussler, 2002). Os pavimentos podem ainda ser classificados em rígido, flexível e semi-rígido.

### 2.4.1 Pavimentos Flexíveis

O pavimento flexível é aquele em que todas as camadas sofrem uma deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas (Pinto e Preussler, 2002). O exemplo típico de um pavimento flexível é constituído de uma base de brita (brita graduada, macadame) ou por uma base solo pedregulhoso, revestida por uma camada em concreto asfáltico.

A camada de revestimento de uma estrutura flexível consiste de uma mistura de agregados minerais e materiais betuminosos, sobreposta à camada de base. Segundo Pinto e Preussler (2002) em adição à sua principal função como componente estrutural do pavimento, ela deve ser projetada para:

- a) resistir às forças abrasivas do tráfego;
- b) reduzir a penetração de água superficial no pavimento;
- c) proporcionar uma superfície resistente ao deslizamento dos veículos;
- d) proporcionar um rolamento suave e uniforme ao tráfego;

A seguir são apresentados os principais fenômenos de degradação de misturas asfálticas, podendo-se destacar os Afundamentos em Trilha de Roda (ATR), Trincamento por Fadiga e adesividade de misturas asfálticas, os quais serão descritos brevemente.

As principais causas de Afundamentos em Trilha de Roda (ATR), as conseqüências e a previsão de ocorrência deste fenômeno estão apresentadas de forma sucinta a seguir.

a) **Principais Causas:** A presença de afundamentos em trilha de roda (ATR) na superfície do pavimento é consequência das deformações plásticas que se desenvolvem nas diferentes camadas que constituem a estrutura. O acúmulo de deformações permanentes em uma camada de concreto asfáltico é causado por uma combinação de densificação (redução do volume) e deformação cisalhante;

b) **Conseqüências Desfavoráveis:** A presença significativa de ATR pode levar ao comprometimento estrutural do pavimento e, também, elevar o potencial para a ocorrência do fenômeno da hidroplanagem;

c) **Previsão da Ocorrência de Deformações Plásticas:** A previsão da evolução de ATR é um problema complexo e requer a caracterização detalhada das propriedades elásticas, plásticas e de viscosidade dos materiais que constituem as camadas do pavimento.

O Trincamento por Fadiga é a degradação do material sobre carregamento repetido, sendo reconhecida como uma das principais causas da deterioração ou degradação dos materiais empregados na pavimentação. Ela é sempre iniciada nas regiões de máximas tensões ou deformações de tração, já que se verifica que os materiais são mais resistentes a carregamentos repetidos de compressão do que de tração. Estas máximas tensões ou deformações ocorrem naturalmente na camada do pavimento com maior rigidez. Ressalta-se aqui a importância do estudo e caracterização deste material em laboratório para que se possa utilizar ferramentas de dimensionamento mais adequadas e confiáveis.

Patologias bastante comuns encontradas em regiões de clima temperado são a fissuração por retração térmica e a fissuração por fadiga induzida por variações de temperatura. Fissuras de retração ocorrem em temperaturas extremamente baixas (abaixo de  $-7^{\circ}\text{C}$ ) ou em condições de quedas abruptas de temperatura e as fissuras térmicas de fadiga ocorrem em temperaturas entre  $-7^{\circ}\text{C}$  e  $21^{\circ}\text{C}$  (Epps, 1997). Quando o ligante asfáltico envelhece torna-se mais frágil e suscetível a fissuras térmicas.

A perda de adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados de uma mistura em Concreto Asfáltico pode ser associada a dois mecanismos: perda de adesão e perda de coesão. A perda de adesão está ligada à entrada de água entre a película de ligante e o agregado e ao deslocamento do filme asfáltico da superfície do agregado. A perda de coesão está ligada a redução de rigidez do cimento asfáltico e ao enfraquecimento das ligações ligante/agregado.

Estes dois mecanismos estão intimamente relacionados e, então, o dano causado pela umidade em misturas asfálticas é a combinação entre estes dois fatores.

Inúmeros fatores influenciam a adesividade ou o dano induzido pela umidade. Hicks (1999) resumizou e classificou estes fatores, os quais estão apresentados na Tabela 2.3. Um dos fatores importantes é o volume de vazios; misturas com volumes de vazios entre 6 e 13% (aproximadamente) não são nem impermeáveis nem drenantes e são as mais susceptíveis ao dano por umidade induzida. Outro fator que deve ser mencionado é a eficiência do sistema de drenagem de um pavimento, capaz de evitar o acúmulo de água junto ao revestimento e a umidade ascendente por capilaridade.

Dentre as várias metodologias aplicáveis à verificação das características de adesividade estão os métodos empíricos que se baseiam na análise visual, onde o contato entre o ligante asfáltico e o agregado é avaliado visualmente, e procura-se correlacionar os resultados com o possível desempenho da mistura em campo. Exemplos são os métodos DNER – ME 78/94 e DNER – ME 79/94.

O segundo grupo de ensaios é baseado no comportamento mecânico das misturas onde as amostras de concreto asfáltico são submetidas a um condicionamento e/ou esforço mecânico para provocar de forma acelerada ou similar o que ocorre em campo. Neste grupo estão, dentre outras, as Metodologias Lottman Modificada da AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO T283-89) e CÂNTABRO do *Centro de Estudios Carreteras* – CEC (CEC325/86).

Kandhal (1992) *apud* Specht *et al.*, (2002) apresenta um estudo sobre a suscetibilidade de misturas asfálticas ao dano induzido pela umidade. O autor afirma que a Metodologia Lottman Modificada (AASHTO T283-89) tem sido recomendada em vários estados americanos para avaliar o potencial de desagregação de misturas asfálticas.

A perda de adesividade é um problema comum nos pavimentos do estado do Rio Grande do Sul, sendo este, portanto, um fator importante e que deve ser levado em consideração na realização de um projeto de misturas em concreto asfáltico.



Tabela 2.3: Fatores intervenientes nas características de adesividade.

<b>Fator</b>	<b>Característica Desejável</b>
<b>1. Agregados</b> a) textura superficial b) porosidade c) mineralogia d) cobertura do agregado por pó e) umidade superficial f) composição química superficial g) filler mineral	áspero depende do tamanho do poro agregados básicos são mais resistentes limpo seco capaz de formar pontes de hidrogênio aumenta a viscosidade do ligante
<b>2. Cimento Asfáltico</b> a) viscosidade b) química c) espessura filme	alta nitrogênio e fenóis alta
<b>3. Tipo de Mistura</b> a) vazios b) granulometria c) teor de ligante	muito baixo ou muito alto muito aberta ou muito densa alto
<b>4. Condições Climáticas</b> a) temperatura b) precipitações durante a construção c) precipitações após a construção d) ciclos de gelo/degelo	quente nenhuma mínima mínimo
<b>5. Tráfego</b> a) volume de tráfego	baixo tráfego

(Fonte: Hicks, 1991).

## 2.5 MATERIAIS PARA CONCRETO ASFÁLTICO

### 2.5.1 Ligante Asfáltico

O cimento asfáltico de petróleo é o asfalto obtido especialmente para apresentar características adequadas para o uso na construção de revestimentos de pavimentos, podendo ser obtido por destilação de petróleo em refinarias ou do asfalto natural, encontrado em jazidas.

O cimento asfáltico de petróleo recebe o símbolo CAP e o cimento asfáltico natural recebe o símbolo CAN. São semi-sólidos à temperatura ambiente, e necessitam de aquecimento para terem consistência apropriada ao envolvimento de agregados. Possuem características de flexibilidade, durabilidade, aglutinação, impermeabilização e elevada resistência à ação da maioria dos ácidos e, sais e álcalis.

Os cimentos asfálticos de petróleo são classificados pelo seu “grau de dureza” retratado no ensaio de penetração ou pela sua viscosidade. A penetração de um CAP é definida como a distância em décimos de milímetro que uma agulha padronizada penetra verticalmente em uma amostra de cimento asfáltico, sob condições específicas de carga, tempo e temperatura. Quanto menor a penetração, “mais duro” é o cimento asfáltico.

O cimento asfáltico pode ser considerado um material viscoelástico, por apresentar comportamento elástico e viscoso simultaneamente, quando submetido a temperaturas intermediárias (Bertolo, 2002).

Segundo o mesmo autor, em altas temperaturas (acima de 100°C), o cimento asfáltico atua como um fluido viscoso. Em baixas temperaturas (abaixo de 0°C), o cimento asfáltico torna-se um sólido elástico.

Durante os serviços de pavimentação, os cimentos asfálticos devem apresentar as seguintes características:

- devem tornar-se suficientemente líquidos para facilitar a mistura com os agregados e o lançamento na pista;

- após o lançamento, devem tornar-se suficientemente sólidos para permitir que as camadas asfálticas resistam às ações das cargas do tráfego, mesmo sob altas temperaturas, sem sofrerem deformações excessivas ou prematuras; e
- sob baixas temperaturas, devem possuir flexibilidade suficiente para impedir a desintegração e/ou aparecimento de trincas nas camadas asfálticas.

## 2.5.2 Agregado

Os materiais pétreos usados em pavimentação normalmente conhecidos sob a denominação genérica de agregados, podem ser naturais ou artificiais. Os primeiros são aqueles utilizados como se encontram na natureza, como o pedregulho e os seixos rolados, ao passo que os segundos compreendem os que necessitam uma transformação física e química do material natural para sua utilização, como a escória e a argila expandida (Pinto, 1998).

Os agregados representam a maior parcela constituinte de um pavimento e no caso das misturas asfálticas, chegando a valores superiores a 90% em peso do conjunto asfalto agregado. Logo, as propriedades dos agregados utilizados nas misturas asfálticas preparadas a quente são muito importantes para o desempenho dos pavimentos.

Defeitos no pavimento, como desagregação e deformação permanente, podem estar diretamente relacionados à escolha inadequada dos agregados. Deste modo, é fundamental que os agregados possuam propriedades geométricas físico-químicas e mecânicas adequadas e que garantam o bom desempenho do pavimento.

Os agregados usados em pavimentação podem ser classificados segundo a natureza, tamanho e distribuição dos grãos conforme apresentados a seguir:

a) Quanto à natureza das partículas:

*Agregados naturais:* são constituídos de grãos oriundos da alteração das rochas pelos processos de intemperismo ou produzidos por processos de britagem: pedregulhos, seixos, britas, areias, entre outros.

*Agregados artificiais:* são aqueles em que os grãos são provenientes de subprodutos de processo industrial por transformação física e química do material natural: escória de aciaria, argila calcinada, argila expandida, entre outros.

b) Quanto ao tamanho individual dos grãos:

*Agregado graúdo:* é o material retido na peneira nº 10 (2,0mm): britas, cascalhos, seixos.

*Agregado miúdo:* é o material que passa na peneira nº 10 (2,0mm) e fica retido na peneira nº 200 (0,074mm): pó-de-pedra, areia.

*Agregado de enchimento ou material de enchimento (filler):* é o que passa pelo menos 65% na peneira nº 200 (0,074mm): cal extinta, cimento portland, pó de chaminé.

c) Quanto à distribuição ou graduação dos grãos:

*Agregado de graduação densa:* é aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com quantidade de material fino, principalmente na peneira nº 200, suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores.

*Agregado de graduação aberta:* é aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com insuficiência de material fino, principalmente na peneira nº 200, para preencher os vazios entre as partículas maiores.

*Agregado tipo macadame:* é aquele que possui partículas de um único tamanho. Trata-se, portanto, de um agregado de granulometria uniforme onde o diâmetro máximo é aproximadamente o dobro do diâmetro mínimo.

## 2.6 CONCRETO ASFÁLTICO

### 2.6.1 Variáveis que Afetam as Misturas Asfálticas

São inúmeras as variáveis que influenciam as propriedades de uma mistura, capacidade de distribuir tensões (rigidez), estabilidade, durabilidade, resistência à fadiga. Estas propriedades são apresentadas por Monismith *et al.* (1989), conforme apresentado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1: Variáveis que afetam as propriedades das misturas asfálticas.

Propriedade	Definição	Exemplo de variáveis de mistura que têm influência
Rigidez	Relação entre tensão e deformação à determinada temperatura e tempo de carregamento	granulometria; rigidez do asfalto; grau de compactação; sensibilidade à água; teor de ligante
Estabilidade	Resistência à deformação permanente (geralmente a altas temperaturas e longos tempos de carregamento)	textura superficial do agregado; granulometria; rigidez do asfalto; grau de compactação; sensibilidade à água; teor de ligante
Durabilidade	Resistência ao intemperismo (ar, água) e a ação abrasiva do tráfego	teor de ligante; granulometria; grau de compactação; sensibilidade à água
Resistência à fadiga	Habilidade da mistura deformar sob carregamento repetido sem romper	granulometria; teor de ligante; grau de compactação; rigidez do asfalto; sensibilidade à água
Características de fratura	Resistência da mistura sobre aplicação de carga	granulometria; tipo de agregado; teor de ligante; grau de compactação; rigidez do asfalto; sensibilidade à água
Atrito	Habilidade da mistura de prover adequado coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento molhado	textura do agregado e resistência ao polimento; granulometria; teor de ligante
Permeabilidade	Habilidade do ar, água e vapor d'água mover-se através da mistura	Granulometria; teor de ligante; grau de compactação

(Fonte: Monismith *et al*, 1989)

Como o comportamento das misturas asfálticas é dependente das características dos agregados e do ligante (características de deformabilidade plástica e de fadiga), torna-se evidente a importância da seleção destes materiais, bem como sua interação, para o bom desempenho da mistura final. Na Figura 2.2 está apresentada uma tentativa de quantificação do percentual de influência de agregados e ligante para cada uma das patologias mais comuns em pavimentos asfálticos.

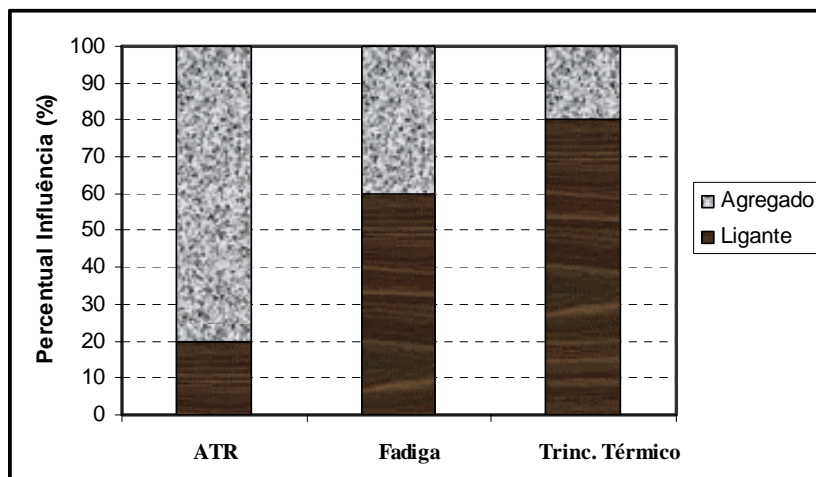


Figura 2.2: Influência do agregado e do ligante no desempenho do CBUQ (Fonte: FHWA 2002)

### 2.6.1 Dosagem de Concreto Asfáltico

O projeto de um concreto asfáltico para pavimentação constitui em um estudo de seleção e dosagem dos materiais constituintes, com a finalidade de enquadrá-los economicamente nas especificações estabelecidas (Senço, 2001).

Os principais métodos de projeto são:

**Método Marshall:** É baseado nas medidas de Estabilidade e Fluência Marshall, além de propriedades volumétricas da mistura.

**Método Hubbard-Field:** Este ensaio foi um dos primeiros a avaliar as propriedades mecânicas das misturas betuminosas. O ensaio consiste em determinar a carga máxima resistida por um corpo de prova quando forçado através de um orifício circular, sendo que esta carga é considerada o valor da estabilidade Hubbard-Field. O ensaio acarreta um tipo de ruptura correspondente ao cisalhamento.

**Método Hveem:** O método Hveem realiza uma análise de densidade/vazios e estabilidade. Também é determinada a resistência da mistura ao inchamento em água. O método Hveem possui duas vantagens reais. Primeiramente, o método de compactação pulsante em laboratório é vista pelos técnicos como a melhor simulação do adensamento que ocorre com o CBUQ em campo. Segundo, o parâmetro de resistência, a estabilidade Hveem, é uma medida direta dos componentes de atrito interno da resistência de cisalhamento. Este mede a capacidade de um corpo de prova resistir a deformação lateral quando uma carga vertical é aplicada (Motta *et al*, 2000).

**Método triaxial de Smith:** O termo triaxial refere-se à condição em que a pressão de suporte é aplicada ao longo da superfície lateral do corpo-de-prova cilíndrico, enquanto cargas axiais são aplicadas em sua base. Esse tipo de ensaio é geralmente aplicado para as classes de materiais que se apresentam plásticos no estado natural.

**Metodologia SUPERPAVE™:** O sistema é baseado em testes de compactação laboratorial e testes de desempenho. A compactação em laboratório é realizada com o auxílio do Compactador Giratório Superpave (SGC). Este sistema, diferente de qualquer outro procedimento de projeto, estima a interação entre as propriedades dos materiais e propriedades estruturais da mistura visando prever propriedades de desempenho de pavimentos (Motta *et al.*, 2000).

Cada um desses métodos possui critérios próprios que objetivam o estabelecimento de relações entre os ensaios de laboratório e os resultados obtidos no campo, sob condições usuais de serviço.

## 2.6.2 Método Marshall

O método Marshall foi originalmente desenvolvido na década de 1930 por Bruce G. Marshall do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Mississippi, EUA – *Mississippi State Highway Department* (Siddiqui *et al. apud* Ogurtsova *et al.*, 1999).

Este método foi idealizado por seu autor para a determinação da quantidade ótima de ligante betuminoso a ser utilizada numa mistura em concreto asfáltico. O critério usado por Marshall, para a obtenção desse parâmetro, baseava-se nos resultados da estabilidade, obtidos num ensaio de compressão diametral.

A simplicidade, rapidez de execução e o baixo custo dos equipamentos requeridos pelo ensaio Marshall, proporcionaram a propagação e a adoção do método por diversos organismos rodoviários do mundo, inclusive no Brasil.

O Método Marshall, mais utilizado no Brasil, consiste inicialmente em estabelecer uma composição granulométrica de agregado que se enquadre numa faixa especificada. Em seguida, procura-se determinar a quantidade de cimento asfáltico que, misturado ao agregado, proporcione uma boa mistura, ou seja, satisfazendo os requisitos das especificações. A dosagem de misturas asfálticas é feita considerando-se valores admissíveis empíricos para a Estabilidade e Fluência. Estabilidade pode ser definida como a capacidade da mistura em

deformar-se (plasticamente) sob ação das cargas. A Fluência pode ser definida como a deformação lenta sofrida pela mistura compactada quando submetida a uma tensão constante.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O planejamento do experimento contempla a dosagem de quatro misturas em concreto asfáltico através da Metodologia Marshall – utilizando a faixa B do DAER/RS – variando-se a percentagem de agregado siderúrgico (Escória de Aciaria), Resíduo Areia de Fundição (R.A.F) e agregado mineral (Basalto) nas misturas para determinação das propriedades volumétricas, e posteriormente do teor de ligante de projeto.

Na Tabela 3.1 são apresentadas as composições de cada uma das misturas estudadas, sendo a denominação referente à percentagem de Escória de Aciaria/R.A.F/Agregado Mineral que compõe cada uma das misturas. Na Figura 3.1 são apresentados os ajustes granulométricos das quatro misturas estudadas, enquadradas na faixa B do DAER/RS.

Tabela 3.1: Composição das quatro misturas estudadas.

<i>Denominação</i>	<i>Escória de Aciaria (%)</i>	<i>Resíduo Areia de Fundição (%)</i>	<i>Brita <math>\frac{3}{4}</math> (%)</i>	<i>Brita <math>\frac{3}{8}</math> (%)</i>	<i>Pó-de-Pedra (%)</i>
<i>Referência (0/0/100)</i>	---	---	12	33	55
<i>Mistura A (70/0/30)</i>	70	---	---	---	30
<i>Mistura B (5/25/70)</i>	5	25	15	43	12
<i>Mistura C (85/15/0)</i>	85	15	---	---	---

A caracterização mecânica das misturas estudadas foi verificada através de ensaios de módulo de resiliência (Mr) e resistência à tração (Rt), sendo realizados a temperatura de 25°C. No Quadro 3.1 são apresentados os números de amostras que foram preparadas para realização destes ensaios, moldados através da metodologia Marshall.

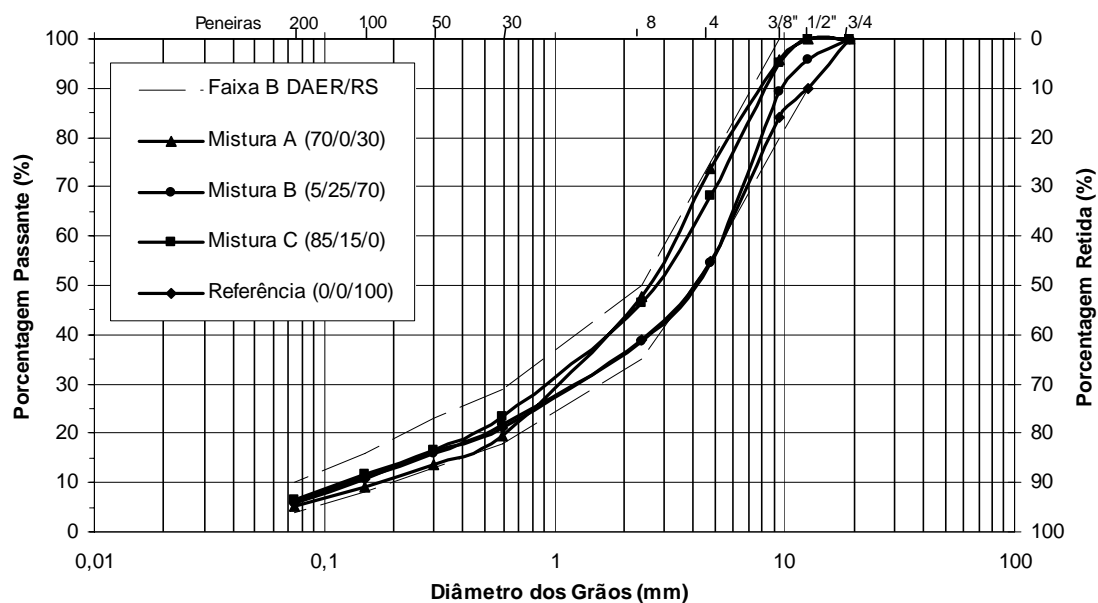


Figura 3.1: Curvas granulométricas das quatro misturas estudadas.

Quadro 3.1: Quantidade de amostras preparadas para Dosagem Marshall e ensaio de Mr e Rt.

Ensaio	Denominação			
	Referência (0/0/100)	Mistura A (70/0/30)	Mistura B (5/25/70)	Mistura C (85/15/0)
Dosagem Marshall	15	15	15	15
Mr e Rt	10	10	10	10
Totais <sup>1</sup>	25	25	25	25

Nota: <sup>1</sup> Total de amostras = 100

Na seqüência foi realizada a avaliação das misturas através de ensaios especiais, conforme descrito no Quadro 3.2, onde são apresentados os números de amostras preparadas no teor de ligante de projeto para a determinação das seguintes propriedades:

- i) determinação da perda de massa ou desgaste – Metodologia Cântabro;
- ii) determinação da adesividade ou efeito deletério da água – Metodologia Lottman Modificada (RRT);
- iii) determinação da vida de fadiga – ensaio à tensão controlada e 25°C ( $N_f$ );
- iv) determinação da deformação plástica – ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida.

Quadro 3.2: Quantidade de amostras preparadas para ensaios especiais.

<i>Ensaio</i>	<i>Denominação</i>			
	<i>Referência (0/0/100)</i>	<i>Mistura A (70/0/30)</i>	<i>Mistura B (5/25/70)</i>	<i>Mistura C (85/15/0)</i>
<i>Metodologia Cântabro</i>	03	03	03	03
<i>Metodologia Lottman Modificada</i>	06	06	06	06
<i>Resistência à Fadiga (Nf)</i>	06	06	06	06
<i>Compressão Uniaxial Sob Carga Repetida</i>	03	03	03	03
<i>Totais<sup>1</sup></i>	18	18	18	18

Nota: <sup>1</sup> Total de amostras = 72.

## 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

A seguir são apresentados os materiais que foram empregados no estudo. Inicialmente é descrito o ligante utilizado na pesquisa. Os agregados estão divididos em: agregados siderúrgicos (Escória de Aciaria), Resíduos Areias de Fundição (R.A.F) e agregados minerais (Basalto).

### 3.2.1 Cimento Asfáltico

O cimento asfáltico de petróleo utilizado nesta pesquisa foi o CAP 50/60 proveniente da Refinaria Alberto Pasqualini – REFAP de Canoas/RS. No Quadro 3.3 estão apresentadas as propriedades do ligante fornecido pela Ipiranga Asfaltos S.A., sendo que os ensaios de viscosidade foram realizados no LAPAV.

O cimento asfáltico foi armazenado em local seco e arejado nas dependências do laboratório, em latas de 3,6 litros.

Quadro 3.3: Características do ligante utilizado na pesquisa.

<i>Ensaio</i>	<i>Especificação CAP 50/60 (ANP/1992)</i>	<i>Resultado</i>	<i>Unidade</i>
Ponto de Amolecimento	---	50	°C
Penetração a 25°C, 100g, 5 seg	5 a 6	5,9	mm
Viscosidade Aparente a 60°C	---	2,231	Pa.s
Viscosidade Aparente a 135°C	---	0,365	Pa.s
Viscosidade Aparente a 155°C	---	0,149	Pa.s
Viscosidade Aparente a 175°C	---	0,074	Pa.s
Viscosidade Aparente a 195°C	---	0,043	Pa.s
Ponto de Fulgor	235 min.	265	°C
Ductilidade a 25°C	60 min.	>147	cm
Massa Específica	1,00 aprox.	1,013	g/cm <sup>3</sup>
Varição em massa – Efeito Calor e Ar (ECA)	1,0 máx.	0,03	%

O AI (1994) e AI (2000) *apud* Specht e Ceratti (2003) apresentam uma faixa diferenciada de viscosidade para ligantes convencionais e modificados em função da temperatura de mistura e compactação para cimentos asfálticos. As faixas de valores das viscosidades de mistura e compactação de cimentos asfálticos estão apresentada na Tabela 3.2, sendo estes valores utilizados para determinação das temperaturas do ligante empregado no estudo.

Tabela 3.2: Viscosidades de mistura e compactação para cimentos asfálticos convencionais e modificados com polímeros.

<i>Material</i>	<i>Viscosidade de Mistura (Pa.s)</i>	<i>Viscosidade de Compactação (Pa.s)</i>
<i>Asfalto Convencional<sup>1</sup></i>	0,15 – 0,19	0,25 – 0,31
<i>Asfalto Modificado<sup>2</sup></i>	0,27 – 0,33	0,54 – 0,66

Nota: <sup>1</sup> Asphalt Institute (1994) <sup>2</sup> Asphalt Institute (2000). Fonte: Specht e Ceratti (2003).

A partir da faixa especificada para cimentos asfálticos convencionais apresentados na Tabela 3.2 foram determinadas as temperaturas de mistura e compactação para o ligante utilizado na pesquisa, as quais estão apresentadas na Figura 3.1. A temperatura de mistura determinada foi de 150 à 157°C e a temperatura de compactação, de 138 à 143°C. Estas temperaturas foram indicadas através da medida de viscosidade, realizada em um viscosímetro rotacional (Viscosímetro Brookfield DVII+), mostrado na Figura 3.2, aplicando-se uma taxa de cisalhamento de 20rpm (*Spindle* 21) e variando a temperatura (135, 155, 175 e 195°C).

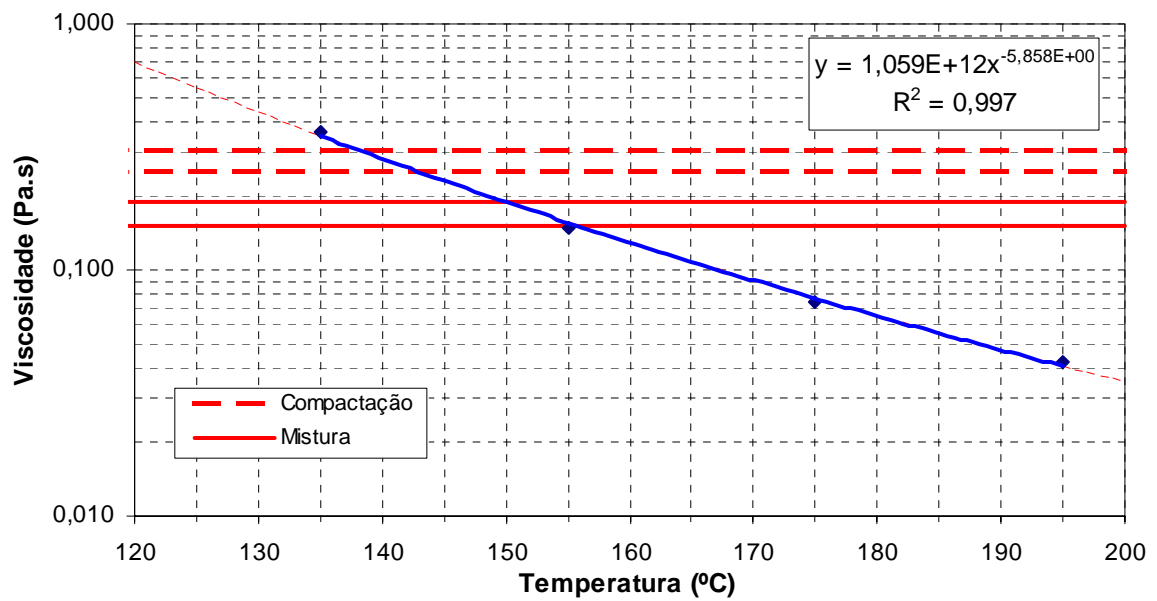


Figura 3.1: Relação entre temperatura e viscosidade rotacional do ligante utilizado.



Figura 3.2: Viscosímetro Brookfield, utilizado para verificação da viscosidade do CAP.

### 3.2.2 Agregados Minerais

O agregado mineral utilizado nesta pesquisa é uma rocha basáltica da formação Serra Geral, semelhante à encontrada em outros pontos do estado e considerada a mais representativa desta região do país. A localização da jazida e a representatividade do derrame basáltico no Rio Grande do Sul podem ser observados na Figura 3.3. O derrame basáltico na qual a jazida encontra-se cobre aproximadamente 54% do território gaúcho.

Segundo ABGE (1998) os basaltos são rochas ígneas vulcânicas mais abundantes e sua maior ocorrência é na forma de derrames. No Brasil, constituem a Formação Serra Geral da Bacia do Paraná, onde perfazem mais de 90% das rochas vulcânicas aí existentes.

O agregado utilizado na pesquisa foi fornecido pela Construtora e Pavimentadora Pavicon LTDA localizada no município de Novo Hamburgo, região metropolitana de Porto Alegre.

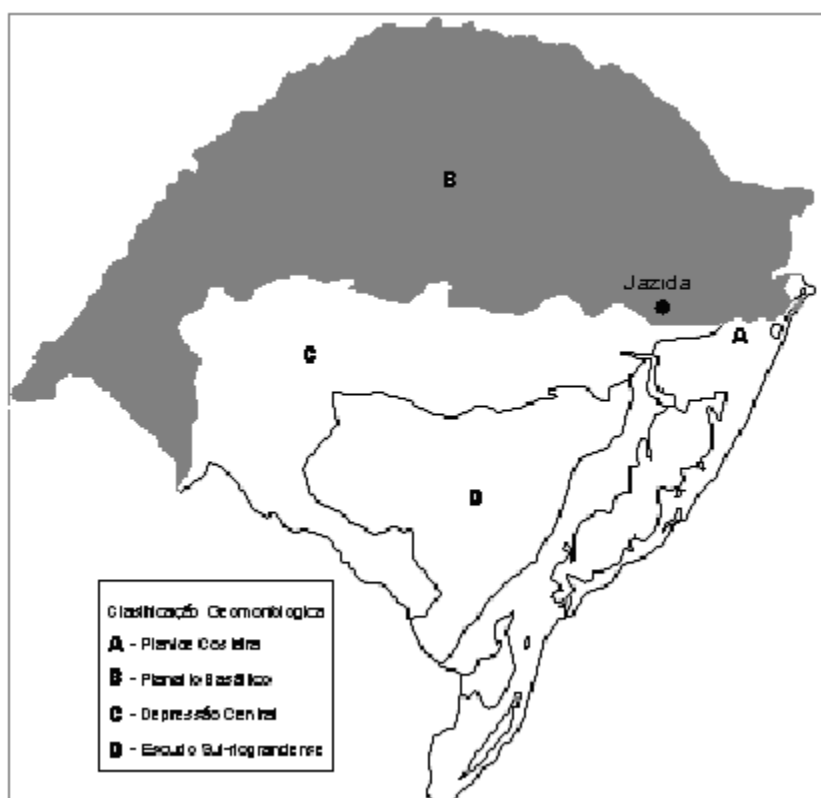


Figura 3.3: Localização da jazida e do derrame basáltico no Rio Grande do Sul.

A coleta dos materiais foi realizada diretamente das correias transportadoras, e acondicionados em sacos plásticos impermeáveis para transporte e armazenamento junto ao laboratório.

Os agregados utilizados no estudo foram separados por peneira, sendo lavados para eliminação do pó que fica aderido nas partículas maiores ( $\leq\#200$ ), permitindo assim que todas misturas sejam moldadas com as frações exatas de cada peneira.

O resultado das médias das análises granulométricas realizadas nos agregados minerais utilizados na pesquisa encontra-se na Tabela 3.3, sendo que as granulometrias foram realizadas através do processo de lavagem na #200. Na Figura 3.4 estão apresentadas as curvas granulométricas dos agregados minerais que foram empregados no estudo, calculadas a partir da média de duas determinações.

Algumas características do agregado mineral, como absorção, índice de lamelaridade e perda à Abrasão *Los Angeles* são apresentados no Quadro 3.4. Nota-se um valor de lamelaridade bem abaixo da especificação, visto que o valor recomendado para a mistura (DAER ES 16/01) é no máximo de 50%.

Tabela 3.3: Análises granulométricas dos agregados minerais.

<i>Peneira</i>		<i>Porcentagem passante em massa (%)</i>		
<i>Nº</i>	<i>mm</i>	<i>BRITA 3/4"</i>	<i>BRITA 3/8"</i>	<i>PÓ-DE-PEDRA</i>
<i>3/4"</i>	<i>19,1</i>	100	100,0	100,0
<i>1/2"</i>	<i>12,7</i>	16,2	100,0	100,0
<i>3/8"</i>	<i>9,5</i>	1,99	87,30	100,0
<i>n 4</i>	<i>4,76</i>	0,13	4,01	97,3
<i>n 8</i>	<i>2,38</i>	0,12	0,73	70,57
<i>n 30</i>	<i>0,59</i>	0,12	0,71	37,89
<i>n 50</i>	<i>0,297</i>	0,12	0,70	28,78
<i>n 100</i>	<i>0,149</i>	0,11	0,69	18,75
<i>n 200</i>	<i>0,074</i>	0,09	0,64	9,98

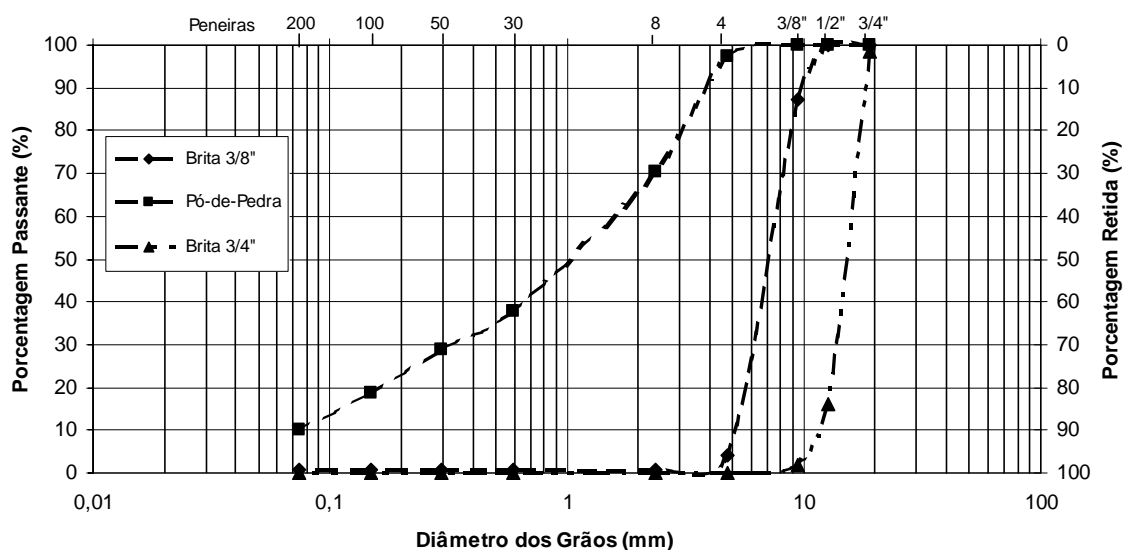


Figura 3.4: Curvas granulométricas dos agregados minerais utilizados no estudo.

Quadro 3.4: Características tecnológicas dos agregados minerais.

<i>Propriedade</i>	<i>Método</i>	<i>Brita 3/4"</i>	<i>Brita 3/8"</i>	<i>Pó-de-Pedra</i>
<i>Absorção (%)</i>	DNER 081/98	0,92	0,92	---
<i>Massa Específica (KN/m<sup>3</sup>)</i>	---	28,68 <sup>1</sup>	28,54 <sup>1</sup>	24,12
<i>Índice de Lamelaridade (%)</i>	DNER 108/01	13,80	16,26	---
<i>Perda à Abrasão Los Angeles (%)</i>	NBR 465/1984	10,6		

Nota: <sup>1</sup>: densidade efetiva – média aritmética da densidade real e aparente dos grãos.

### 3.2.3 Agregados Siderúrgicos

O agregado siderúrgico utilizado nesta pesquisa é produzido na indústria siderúrgica Gerdau S.A. localizada no município de Sapucaia do Sul e descartado na Central de Resíduos da UTRESA – União dos Trabalhadores em Resíduos Especiais e Saneamento Ambiental, localizada no município de Estância Velha-RS, a qual forneceu o agregado para realização do estudo.

Este agregado já foi utilizado em estudo realizado por Masuero (2001), visando o seu emprego na construção civil, na qual o enfoque principal foi o estudo da expansibilidade deste material. Rohde (2002) estudou a viabilidade técnica do uso de escória de aciaria como



agregado para bases e sub-bases de pavimentos. A Escória de Aciaria empregada neste estudo sofreu processo prévio de estabilização da expansão no pátio de estocagem, segundo processo descrito por Masuero (2001).

O resultado das médias das análises granulométricas realizadas no agregado siderúrgico utilizado na pesquisa encontra-se na Tabela 3.4, sendo que as granulometrias foram realizadas através do processo de lavagem na #200. Na Figura 3.5 está apresentada a curva granulométrica do agregado siderúrgico empregado no estudo, calculada a partir da média de duas determinações.

Tabela 3.4: Análise granulométrica do agregado siderúrgico.

<i>Peneira</i>		<i>Porcentagem passante em massa (%)</i>
<i>Nº</i>	<i>mm</i>	<i>Escória de Aciaria</i>
<i>¾"</i>	<i>19,1</i>	100
<i>½"</i>	<i>12,7</i>	100
<i>3/8"</i>	<i>9,5</i>	94,19
<i>n 4</i>	<i>4,76</i>	63,43
<i>n 8</i>	<i>2,38</i>	38,13
<i>n 30</i>	<i>0,59</i>	11,58
<i>n 50</i>	<i>0,297</i>	7,16
<i>n 100</i>	<i>0,149</i>	4,87
<i>n 200</i>	<i>0,074</i>	3,35

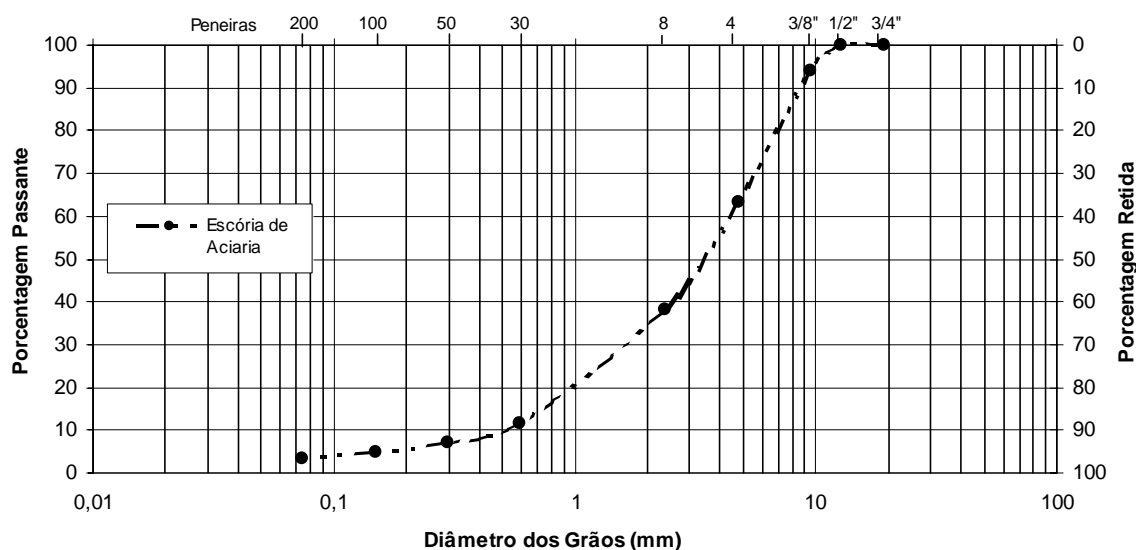


Figura 3.5: Granulometria do agregado siderúrgico utilizado no estudo.

Algumas características dos agregados, como índice de lamelaridade e perda à Abrasão *Los Angeles* são apresentados no Quadro 3.5.

Quadro 3.5: Características tecnológicas do agregado siderúrgico.

<i>Propriedade</i>	<i>Método</i>	<i>Escória de Aciaria</i>
<i>Absorção (%)</i>	DNER 081/98	1,62
<i>Massa Específica (KN/m<sup>3</sup>)</i>	---	32,80 <sup>1</sup>
<i>Índice de Lamelaridade (%)</i>	DNER 108/01	7,12
<i>Perda à Abrasão Los Angeles (%)</i>	NBR 465/1984	24,56

Nota: <sup>1</sup>: densidade efetiva – média aritmética da densidade real e aparente dos grãos.

### 3.2.3.1 Expansibilidade

Neste estudo, a escória de aciaria fornecida para o estudo já se encontrava estabilizada, porém foi realizado ensaio de expansibilidade para verificar qual o grau de expansibilidade ainda existente no material empregado no estudo.

Para avaliação da expansibilidade do material empregado no estudo foi utilizado o método do Departamento de Transportes da Pensilvânia (PTM 130/78), o qual foi adaptado pelo

Departamento de Rodagem de Minas Gerais (DER/MG-1982). Os passos para realização do ensaio são descritos da seguinte forma por Kandhal e Hoffman (1998):

- i) Preparar amostra, seca ao ar, passada na peneira 2" (50,8mm), desprezando a fração retida nesta peneira;
- ii) Determinação da umidade ótima através do ensaio de Compactação (DNER - ME 049/94);
- iii) Compactação da amostra na umidade ótima no molde ISC (d=152mm), em três camadas na energia modificada (56golpes por camada);
- iv) Submergir a amostra em água (colocar o conjunto em tambor com água) e colocar em estufa na temperatura de  $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ;
- v) Após 2 horas da amostra em estufa realizar a leitura inicial da expansão;
- vi) Realizar medição da expansão vertical durante sete dias, realizando uma leitura diária;
- vii) Retirar a amostra da condição submersa e mantê-la na condição saturada por mais sete dias, realizando uma leitura por dia;
- viii) A percentagem total de expansão volumétrica é calculada através da fórmula 3.1:

$$\text{Expansão Total} = \frac{\text{leitura}_{14\text{dias}} - \text{leitura}_{\text{inicial}}}{h_{\text{amostra}}} \quad (\text{fórmula 3.1})$$

onde:  $\text{leitura}_{14\text{dias}}$  é a leitura do extensômetro após 14 dias de ensaio,  $\text{leitura}_{\text{inicial}}$  é a leitura realizada após duas horas da amostra em estufa e  $h_{\text{amostra}}$  é a altura inicial da amostra.

A Figura 3.6 apresenta a curva da expansão volumétrica obtida para o material empregado nesta dissertação, onde verifica-se que o material estudado apresentou expansão volumétrica abaixo do valor especificado pelo DNER (ME 262/94), o qual fixa a expansão máxima do agregado em 3,00%.

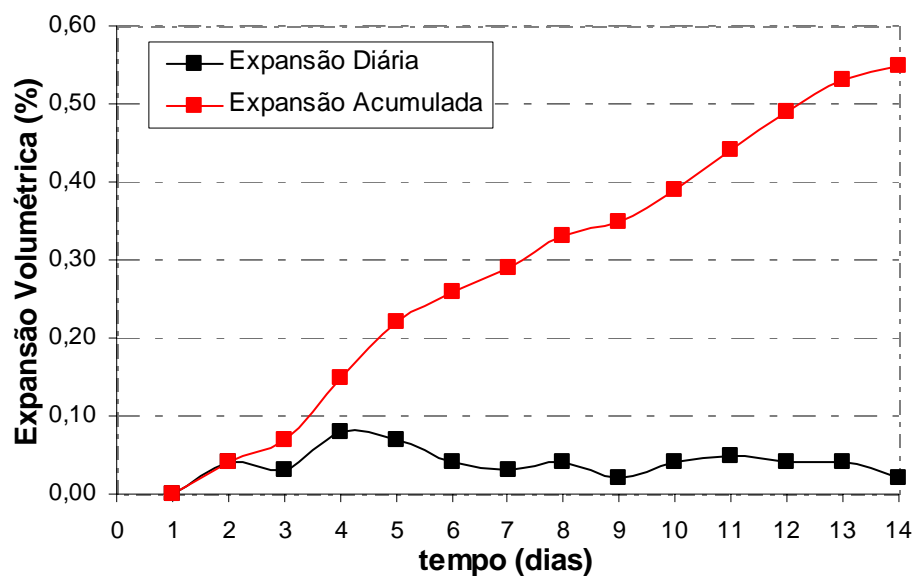


Figura 3.6: Expansão volumétrica da escória de aciaria empregada no estudo.

### 3.2.4 Resíduo Areia de Fundição (R.A.F)

A areia de fundição utilizada nesta pesquisa é oriunda de diversas empresas de fundição do Rio Grande do Sul e descartada na Central de Resíduos da UTRESA, localizada no município de Estância Velha-RS, a qual forneceu o resíduo para realização do estudo.

Por ser proveniente de diversas empresas de fundição, o material apresenta-se misturado, sendo originário de diversos processos de produção. Conforme descrevem De Reis e Ferreira (2004), as areias de fundição podem ser originárias da produção de diversos modelos e tamanhos de peças, dando origem a três tipos de areias de fundição: areia verde – originária do descarte de caixas de moldagem; areia de macharia – originária dos moldes internos; jato de areia – proveniente da etapa de acabamento superficial.

O resultado das médias das análises granulométricas realizadas no Resíduo Areia de Fundição (R.A.F) utilizado na pesquisa encontra-se na Tabela 3.5, sendo que as granulometrias foram realizadas através do processo de lavagem na #200. Na Figura 3.7 está apresentada a curva granulométrica do resíduo empregado no estudo, calculadas a partir da média de duas determinações. O valor encontrado para massa específica do R.A.F foi de  $20,29\text{KN/m}^3$ .

Tabela 3.5: Análise granulométrica do Resíduo Areia de Fundição (R.A.F).

<i>Peneira</i>		<i>Percentagem passante em massa (%)</i>
<i>n°</i>	<i>mm</i>	<i>Resíduo Areia de Fundição (R.A.F)</i>
3/4"	19,1	100,0
1/2"	12,7	100,0
3/8"	9,5	100,0
N 4	4,76	96,14
N 8	2,38	94,53
n 30	0,59	91,17
n 50	0,297	68,90
n 100	0,149	49,80
n 200	0,074	23,77

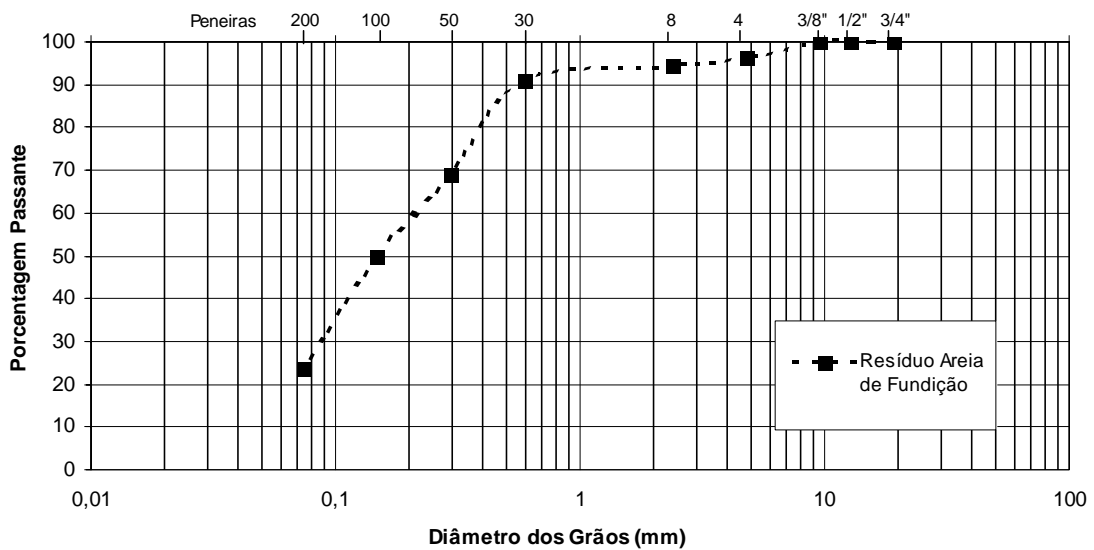


Figura 3.7: Curva granulométrica do Resíduo Areia de Fundição (R.A.F) empregado no estudo.

### 3.3 METODOLOGIA

#### 3.3.1 Metodologia Marshall

Para preparação das amostras e dosagem de cada uma das quatro misturas foi utilizado o procedimento Marshall descrito em detalhes pelo Asphalt Institute (1989) e Asphalt Institute (1995).

A seguir é descrito, de forma sucinta, o processo de moldagem de corpos-de-prova de misturas betuminosas através do Método Marshall:

- a) preparação e separação de material granular para a confecção de no mínimo de 15 corpos-de-prova (3 para cada teor de ligante);
- b) estimativa da percentagem de ligante de projeto;
- c) moldagem por compactação dinâmica, com o equipamento de Marshall dos ternos de corpos-de-prova com os teores de ligante estimados;
- d) extração dos corpos-de-prova dos moldes cilíndricos e cura, ao ar livre, durante 24 horas;
- e) pesagem e cubicagem dos corpos-de-prova para a determinação dos elementos para o cálculo de suas características físicas [ $M_E$  (massa específica aparente), VV (%) (volume de vazios) e RBV (%) (Relação Betume Vazios)];
- f) imersão dos corpos-de-prova em banho-maria, a 60°C, durante 30 minutos, após as amostras são imediatamente submetidos ao ensaio Marshall, conforme Figura 3.8, para determinação de suas características mecânicas [(Est) Estabilidade e (Flu) Fluência];
- g) plotagem das curvas de variação de Est, Flu,  $M_E$ , VV (%), VAM (%) e RBV(%), em função das percentagens de ligante empregadas e determinação da percentagem ótima de ligante em função dos critérios definidos pelo DNER.



Figura 3.8: Prensa para rompimento dos corpos-de-prova Marshall do LAPAV.

As amostras foram preparadas em bateadeira mecânica com cuba aquecida, conforme mostrado na Figura 3.9 e a compactação foi realizada em compactador mecânico, demonstrado na Figura 3.10, sendo aplicados 75 golpes por face.



Figura 3.9: Batedeira mecânica com cuba aquecida do LAPAV, utilizada para mistura.



Figura 3.10: Compactador mecânico utilizado para compactação dos corpos-de-prova Marshall.



### 3.3.2 Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência das amostras foi determinado através das prescrições do DNER-ME 133/94.

Resiliência é definida como a propriedade pela qual a energia armazenada em um corpo deformado é devolvida quando cessa a tensão causadora da deformação elástica. Portanto, o termo deformação resiliente passou a significar a deformação recuperável dos pavimentos quando submetidos a carregamentos repetidos, isto, como uma forma de distingui-la daquelas que ocorrem em outras estruturas onde as cargas não são repetidas tão aleatoriamente quanto à frequência, duração e intensidade como a do tráfego de veículos.

Utilizam-se para este ensaio, corpos-de-prova de 10,2 cm de diâmetro e alturas variáveis, moldados conforme a Metodologia Marshall. Os ensaios foram realizados a temperatura de 25°C. O equipamento utilizado é composto por uma estrutura metálica, um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz, conforme mostrado na Figura 3.11. Com o carregamento de, no máximo 30% da carga de ruptura, a amostra sofre deformações horizontais, as quais são medidas através de um transdutor tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) ligado a um microcomputador. Para o cálculo do módulo de resiliência foi utilizada a fórmula 3.2:

$$Mr = \frac{P}{\Delta h} \cdot (0,2692 + 0,9976\mu) \quad (\text{fórmula 3.2})$$

onde: Mr é o módulo de resiliência dado em MPa; P é a carga aplicada; em N,  $\Delta$  a deformação elástica ou resiliente medida nos ciclos particulares de repetição de carga, em cm; h a altura do corpo-de-prova, também em cm e  $\mu$  o coeficiente de Poisson.



Figura 3.11: Equipamento para ensaio de módulo de resiliência de misturas asfálticas.

### **3.3.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral**

O ensaio de compressão diametral ou tração indireta, conhecido internacionalmente como “ensaio brasileiro”, foi desenvolvido inicialmente pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro para determinar a resistência à tração de corpos-de-prova de concreto através de solicitação estática.

A realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral foi realizada em amostras com 10,20 cm de diâmetro e altura variável seguindo as prescrições do DNER – ME 138/94, sendo realizados a temperatura de 25°C. Utilizou-se uma prensa com capacidade para 50kN, apresentada na Figura 3.12, seguindo-se as prescrições da norma. A fórmula 3.3 foi utilizada para o cálculo de  $R_t$ :

$$R_t = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot h} \quad (\text{fórmula 3.3})$$

onde:  $R_t$  é a resistência à tração por compressão diametral,  $F$  é a força aplicada,  $h$  e  $d$  são a altura e o diâmetro do corpo-de-prova, respectivamente.



Figura 3.12: Equipamento para ensaio de resistência à tração em materiais cimentados e misturas asfálticas.

### 3.3.4 Resistência à Fadiga

Os ensaios laboratoriais para determinação da vida de fadiga distinguem-se quanto ao processo de aplicação das tensões. No Brasil, o ensaio mais utilizado é o de compressão diametral, com aplicação de tensão controlada. Este ensaio é o mais comum, devido a sua simplicidade na execução dos ensaios.

Para determinação da vida de fadiga das amostras de concreto asfáltico produzidas neste estudo foi utilizado o mesmo sistema de carregamento do ensaio de módulo de resiliência, entretanto a amostra é submetida a vários níveis de tensão (10, 15, 20, 25, 30 e 35% da resistência à tração média da mistura), até ser levada a ruptura por fadiga. Os ensaios foram realizados a temperatura de 25°C, em amostras moldadas com o teor de ligante de projeto (considerando-se volume de vazios igual a 4%).

### 3.3.5 Ensaio de Compressão Uniaxial Sob Carga Repetida

Segundo Mohamed e Yue (1994) *apud* Mugayar (2004) através deste tipo de ensaio é possível obter, para todas as amostras, uma taxa constante de deformação permanente acumulada, sendo que através desta taxa é possível avaliar a susceptibilidade desta à deformação permanente.

Para realização do ensaio de compressão uniaxial foram utilizados uma prensa pneumática, uma célula de carga, e dois transdutores do tipo LVDT, nos quais são medidas as deformações. Os instrumentos de medição (LVDTs e célula de carga) foram ligados a um microcomputador para aquisição automática de dados.

O ensaio consiste no carregamento da amostra, que é realizado através de pulsos de carga com duração de 0,1 segundos, intercalados de um período de repouso de 0,9 segundos, num total de 3600 pulsos.

A seqüência para realização do ensaio descrita é a seguinte:

- i) os corpos-de-prova são submetidos a um pré-condicionamento, o qual consiste na aplicação de 200 ciclos de carregamento com a tensão do ensaio;

- ii) suspende-se o carregamento e nos 300s subseqüentes procede-se um período de recuperação;
- iii) aplica-se uma carga de compressão uniaxial sob carga repetida no corpo de prova durante 3600s (1hora);
- iv) suspender a aplicação de carga e registrar as deformações de expansão da amostra durante 900s (15 minutos). Ao final do ensaio são obtidos os valores da deformação permanente e a inclinação da reta entre 100s e 3600s.

A partir dos dados de deslocamento obtidos através dos LVDTs, determina-se o deslocamento médio sofrido pelo corpo-de-prova, sendo apresentado na Figura 3.13 o sistema utilizado para fixação das amostras e medição do deslocamento. As deformações são obtidas dividindo-se os deslocamentos registrados pela distância média entre as placas de fixação dos LVDTs no corpo-de-prova. A taxa de aquisição de dados foi de 10 leituras por segundo, armazenadas em um arquivo de texto contendo dados do corpo-de-prova e as leituras dos LVDTs e da célula de carga. Os resultados obtidos foram tratados posteriormente no programa Microsoft Excel.

As tensões utilizadas neste estudo foram as mesmas empregadas por Mugayar (2004) em seu estudo, sendo aplicadas tensões de 0,1MPa (1kgf/cm<sup>2</sup>), 0,4MPa (4kgf/cm<sup>2</sup>) e 0,7MPa (7kgf/cm<sup>2</sup>).

A temperatura utilizada no ensaio foi de 45°C. Esta temperatura foi empregada por Specht (2004) na realização dos ensaios de creep dinâmico com amostra confinada. As amostras ficaram por um período de no mínimo 4 horas na estufa. Nas faces dos corpos-de-prova foi aplicada uma fina camada de talco, a fim de evitar o atrito entre a amostra e as placas de carregamento e apoio do equipamento.



Figura 3.13: Sistema de fixação dos corpos-de-prova e medição do deslocamento para ensaio de compressão uniaxial sob carga repetida.

### 3.3.6 Resistência ao Desgaste – Metodologia Cântabro

Este ensaio, desenvolvido para avaliação de misturas drenantes, foi inicialmente normalizado pelo *Centro de Estudios de Carreteras* (CEC) da Espanha sob a norma (CEC 325/86) e posteriormente no Brasil através da norma DNER – ES 386/99.

O ensaio consiste em submeter amostras de concreto asfáltico (uma por vez) a 300 revoluções (33rpm) na máquina de abrasão *Los Angeles* sem as esferas metálicas. O ensaio é realizado à temperatura de 25°C. A perda de massa por desgaste é calculada através diferença de massa das amostras antes e depois do ensaio.

Este ensaio avalia de maneira indireta a coesão, a resistência à abrasão e a resistência à desagregação de misturas asfálticas.

### 3.3.7 Ensaio de Adesividade – Metodologia Lottman Modificada

Este ensaio avalia a propriedade de adesividade em misturas asfálticas, considerando o efeito deletério de água em amostras cilíndricas preparadas através da Metodologia Marshall com volume de vazios de aproximadamente 7% ( $\pm 1\%$ ). A análise é feita pela relação entre a resistência à tração de amostras com condicionamento prévio e amostras sem condicionamento. O ensaio foi realizado conforme a norma AASHTO T 283-89.

O valor obtido desta relação pode ser utilizado para prever o desempenho de misturas asfálticas face a adesividade ligante/agregado e também para verificar o efeito da adição de aditivos químicos ou pulverulentos na adesividade da mistura.

A ordem do ensaio é descrita a seguir:

- i) preparam-se seis amostras, seguindo a Metodologia Marshall, com volume de vazios entre 6% e 8% separam-se em dois grupos com três amostras cada;
- ii) o primeiro grupo é submetido ao ensaio de resistência à tração (ensaio de tração por compressão diametral – ensaio brasileiro). Para realização dos ensaios à tração é utilizada uma prensa tipo Marshall, após a imersão em água à 25°C por duas horas em sacos plásticos impermeáveis; determina-se o valor  $Rt_1$  (média dos três valores);
- iii) as amostras do segundo grupo são, inicialmente, saturadas (o grau de saturação deve ficar entre 55% e 80%). Esta saturação é conseguida com a aplicação de pressão de vácuo, conforme mostra a Figura 3.14;
- iv) acondicionam-se os corpos-de-prova em sacos plásticos com aproximadamente 3ml de água destilada dentro de cada saco;
- v) colocam-se, então, os corpos-de-prova sob refrigeração à temperatura de  $-18^\circ\text{C}$  durante um período de 16 horas;
- vi) as amostras são removidas da refrigeração e imediatamente imersas em banho (em água destilada) à temperatura de  $60^\circ\text{C}$  por um período de 24 horas;
- vii) transfere-se, cuidadosamente, as amostras para um banho à temperatura de  $25^\circ\text{C}$  por um período de 2 horas;
- viii) rompem-se os corpos-de-prova submetidos ao condicionamento e determina-se o valor de  $Rt_2$ ;
- ix) calcula-se, através do quociente entre  $Rt_2$  e  $Rt_1$  (em percentagem), o valor de RRT – Resistência Retida à Tração.

Este ensaio pode, também, ser realizado com amostras extraídas da pista. O valor encontrado na literatura como referência de misturas com bom desempenho quanto a adesividade é de 70% (Hicks, 1991), e a Metodologia SUPERPAVE™ recomenda valores acima de 80%.



Figura 3.14: Equipamento para saturação dos corpos-de-prova, através da Metodologia Lottman Modificada.



## 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais das quatro dosagens Marshall realizadas nesta dissertação, sendo uma dosagem de Referência, a qual utiliza somente agregados convencionais. Visando analisar o comportamento mecânico destas dosagens, são apresentados os resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência (Mr), Resistência à Tração (Rt), Resistência à Fadiga e ensaio de Fluência por Compressão Uniaxial sob carga repetida. Para verificação da adesividade das misturas estudadas foram realizados ensaios através da Metodologia Lottman Modificada. A metodologia Cântabro foi utilizada para avaliar a perda de massa por desgaste. Os resultados estão apresentados de forma separada para cada uma das dosagens realizadas. No capítulo seguinte será apresentada uma análise comparativa dos resultados obtidos para as quatro misturas estudadas, comparadas com a mistura de Referência.

### 4.2 MISTURA DE REFERÊNCIA (0/0/100)

A seguir são apresentados os resultados obtidos para a mistura de Referência, sendo esta composta por agregado mineral de basalto, na proporção descrita na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Composição da mistura de Referência.

<i>Denominação</i>	<i>Brita <math>\frac{3}{4}</math> (%)</i>	<i>Brita <math>\frac{3}{8}</math> (%)</i>	<i>Pó-de-Pedra (%)</i>
<i>Referência (0/0/100)</i>	12	33	55

### 4.2.1 Dosagem Marshall

As propriedades volumétricas das quatro misturas estudadas nesta dissertação foram determinadas baseadas na especificação da norma DAER ES 16/98.

Na Figura 4.1 está representada a percentagem de vazios *versus* percentagem de ligante, sendo que o volume de vazios diminuiu com o teor de ligante. O teor de ligante de projeto, considerando 4,00% de vazios foi de 4,75%. O valor de 4,00% de vazios foi adotado em função de ser o valor médio (3 a 5%) fixado pela especificação DAER ES 16/98.

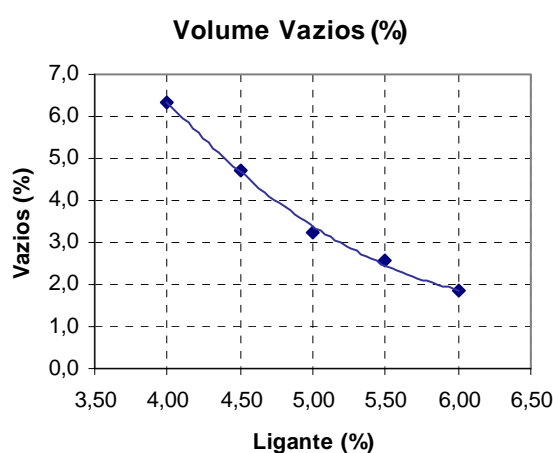


Figura 4.1: Curva do Volume de Vazios, para mistura de Referência.

Está representada na Figura 4.2 (a) a percentagem de vazios do agregado mineral, atingindo o valor 16,20% para o teor de ligante de 4,75%. Valores maiores que 14,00% são recomendados na especificação. Na Figura 4.2 (b) verifica-se que a relação betume/vazios aumenta com o acréscimo do teor de ligante para a mistura de referência, o que já era esperado. A especificação fixa valores entre 75% e 82%. O valor de projeto foi de 76,0%.

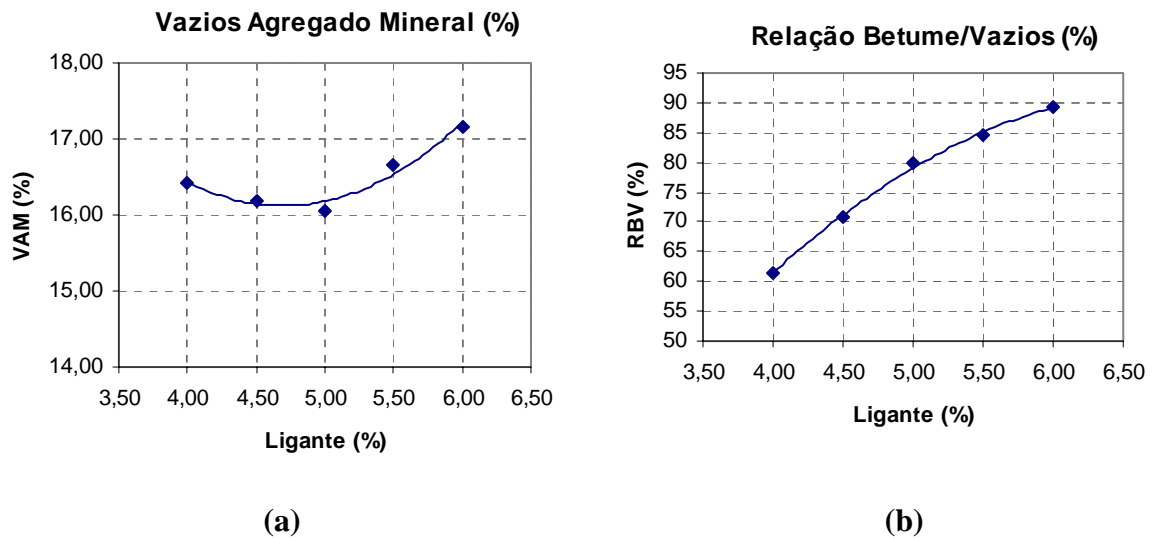


Figura 4.2: (a) Curva dos vazios do agregado mineral para mistura de Referência. (b) Curva da relação betume/vazios, para mistura de Referência.

Na Figura 4.3 esta representada a curva da massa específica aparente da mistura, podendo-se observar a tendência do seu aumento com o aumento do teor de ligante. Este parâmetro é utilizado para o controle de qualidade do CBUQ em campo.

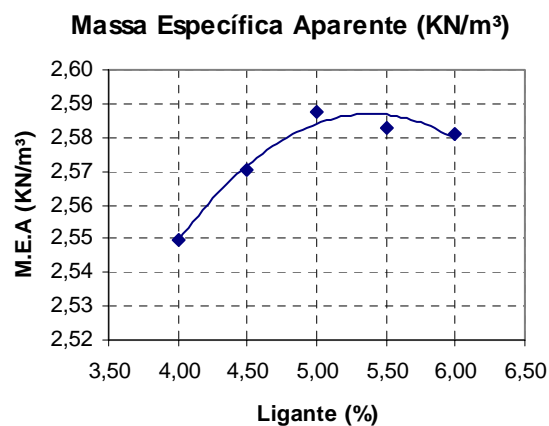


Figura 4.3: Curva da massa específica aparente para mistura de Referência.

Está representada na Figura 4.4 (a), a curva de Estabilidade para a mistura de Referência, com os valores variando entre 13,2 e 19,2 kN. A especificação recomenda valores acima de 8 kN,

como desejável para a mistura. Na Figura 4.4 (b), está representada a curva da Fluência para a mistura de Referência, sendo que os valores variaram entre 2,98mm e 3,57mm, sendo que o valor mínimo especificado para Fluência é de 2mm e o máximo de 4,6mm.

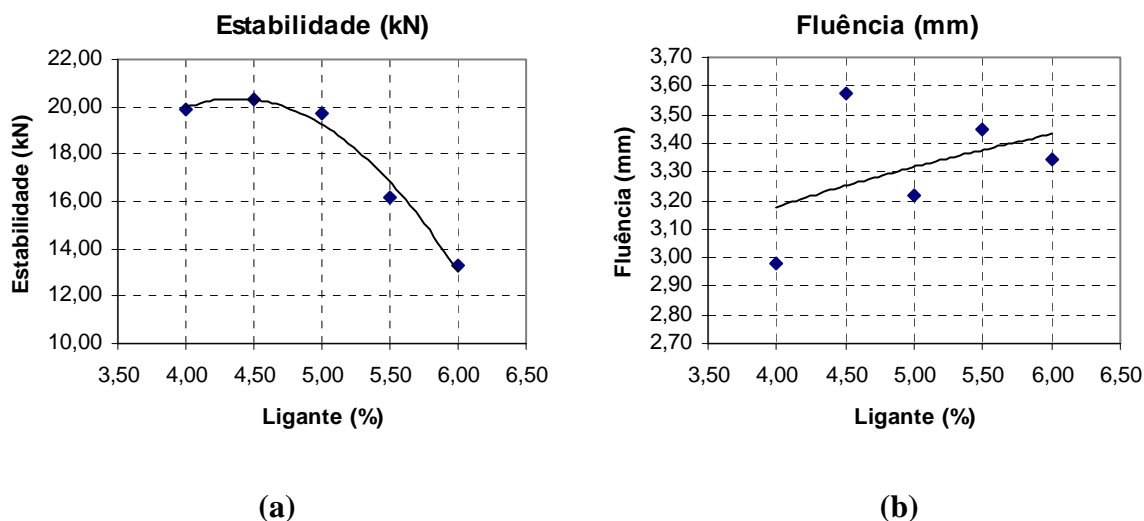


Figura 4.4: (a) Curva de Estabilidade (kN) para mistura de Referência.  
(b) Curva da Fluência (mm) para mistura de Referência.

Está representada na Figura 4.5, a curva da relação Estabilidade/Fluência, onde se pode observar o decréscimo da relação com o aumento do teor de ligante.

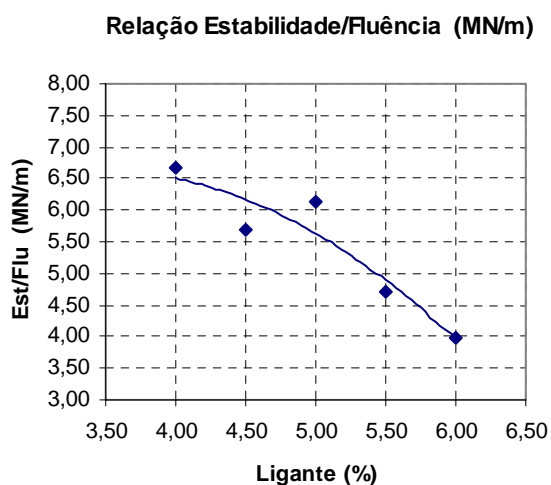


Figura 4.5: Curva da relação Estabilidade/Fluência para mistura de Referência.

### 4.2.2 Módulo de Resiliência

Esta representada na Figura 4.6 a curva do módulo de resiliência da mistura de Referência, onde se observa a diminuição do módulo com o aumento do teor de ligante, sendo que para o teor de projeto de 4,75% (considerando-se volume de vazios igual a 4%) o módulo de resiliência é de 6000MPa.

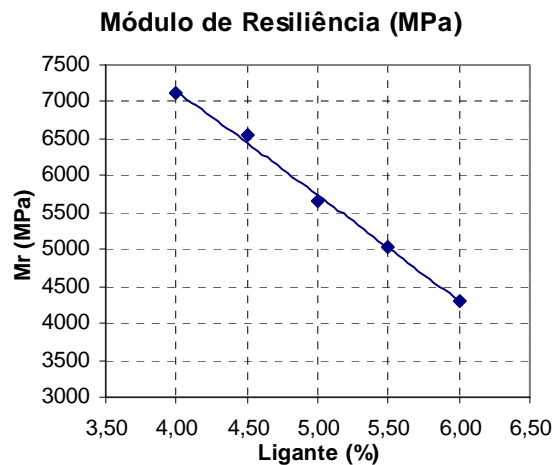


Figura 4.6: Módulo de resiliência para a mistura de Referência.

### 4.2.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Verifica-se na Figura 4.7 que o valor de resistência à tração permaneceu constante para os teores iniciais de ligante, apresentando um decréscimo da resistência à tração para os teores de ligante mais elevados. Para o teor de ligante de projeto da mistura de Referência o valor encontrado foi de 1,25MPa.

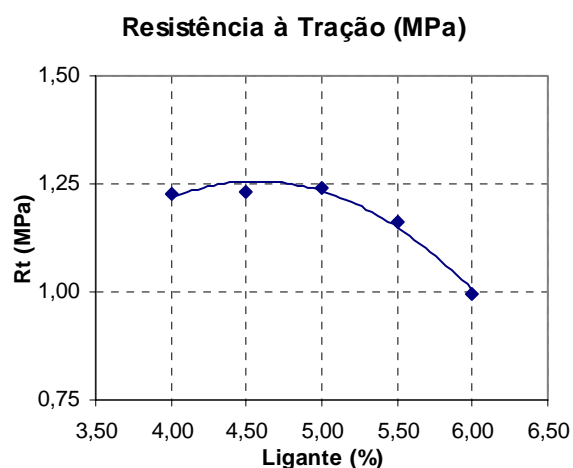


Figura 4.7: Curva da resistência à tração para a mistura de Referência.

Na Figura 4.8 é apresentada a curva da relação entre módulo de resiliência e resistência à tração, onde se observa uma diminuição da relação  $Mr/Rt$  com o aumento do teor de ligante. Para o teor de ligante de projeto a mistura de Referência obteve uma relação  $Mr/Rt$  de 4800.

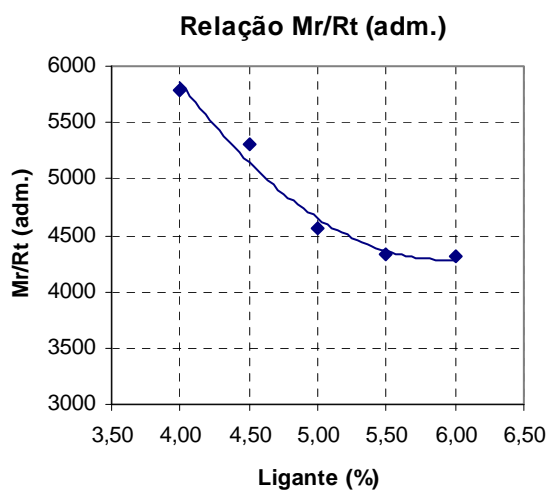


Figura 4.8: Curva da relação  $Mr/Rt$  para a mistura de Referência.

#### 4.2.4 Resistência à Fadiga

A seguir são apresentadas as características de resistência à fadiga da mistura de Referência. Os ensaios foram realizados à tensão controlada, à 25°C, em amostras moldadas no teor de ligante de projeto. O critério de ruptura utilizado neste ensaio é a ruptura completa da amostra.

As curvas de fadiga das misturas avaliadas estão expressas em função da solicitação: tensão de tração, diferença de tensões e deformação específica inicial de tração. Estão representadas nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 as curvas de fadiga da mistura de Referência em função das solicitações.

A curva que representa a vida de fadiga de uma material em função das solicitações aplicadas, conhecida como curva de Wöhler é comumente representada pelo modelo apresentado na fórmula 4.1:

$$N_f = a.S^b \quad (\text{fórmula 4.1})$$

onde  $N_f$  = vida de fadiga;  $S$  = solicitação de tensão e  $a$  e  $b$  são constantes do modelo.

Na Tabela 4.2 estão apresentadas as constantes dos modelos gerados para a mistura de Referência, em função das solicitações.

Tabela 4.2: Constantes do modelo de fadiga (curva de Wöhler) para a mistura de Referência.

<i>Denominação</i>	<i>Tensão de Tração (MPa)</i>			<i>Dif. de Tensões (MPa)</i>			<i>Def. Esp. Inicial (cm/cm)</i>		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R<sup>2</sup></i>
<i>Referência (0/0/100)</i>	44,1	-4,156	0,96	14027	-4,156	0,96	$2,558.10^{-6}$	-2,197	0,91

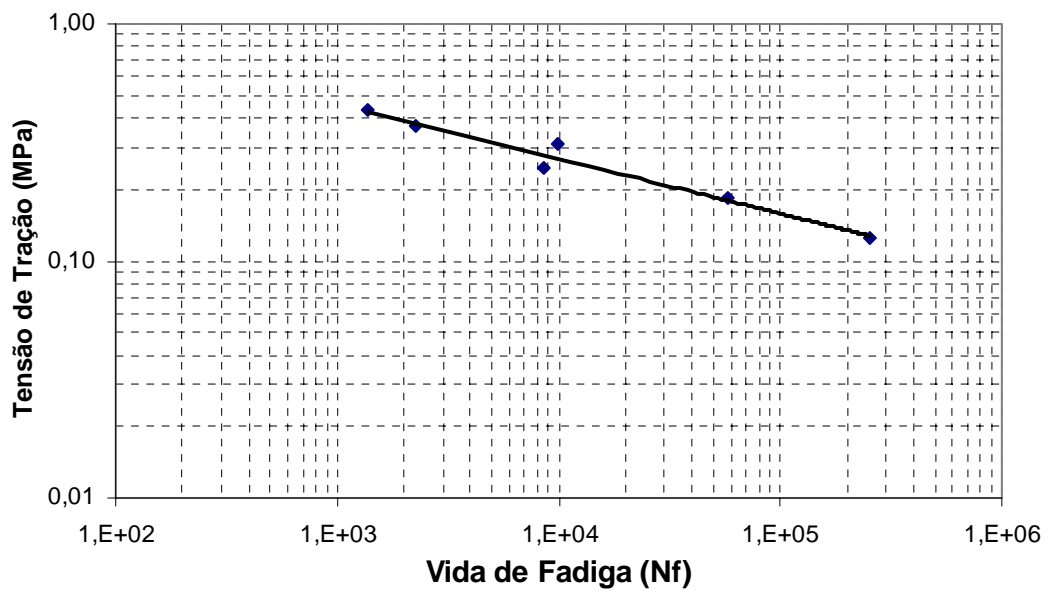


Figura 4.9: Relação entre vida de fadiga e tensão de tração para a mistura de Referência.

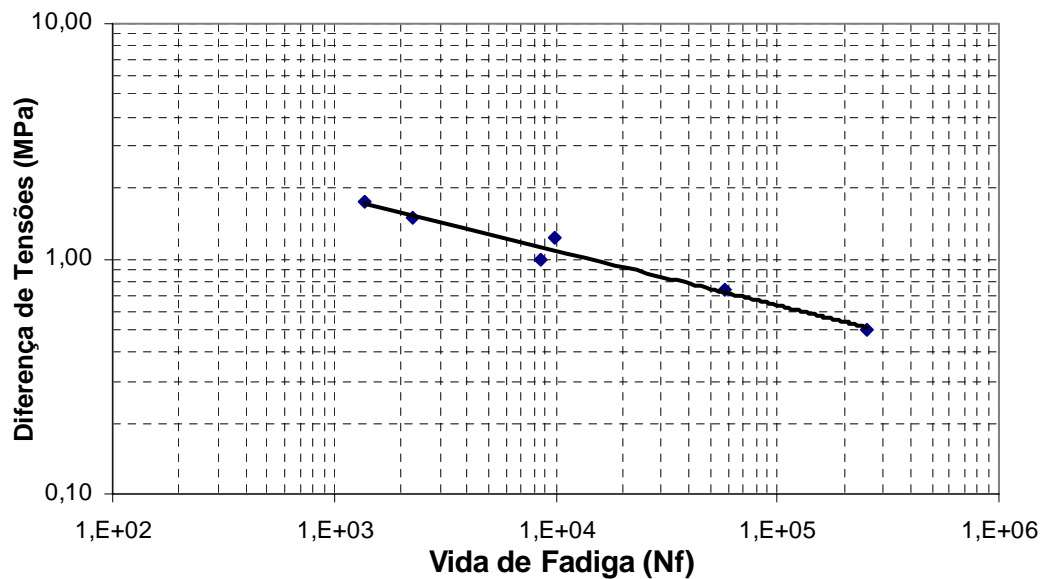


Figura 4.10: Relação entre vida de fadiga e diferença de tensões para a mistura de Referência.



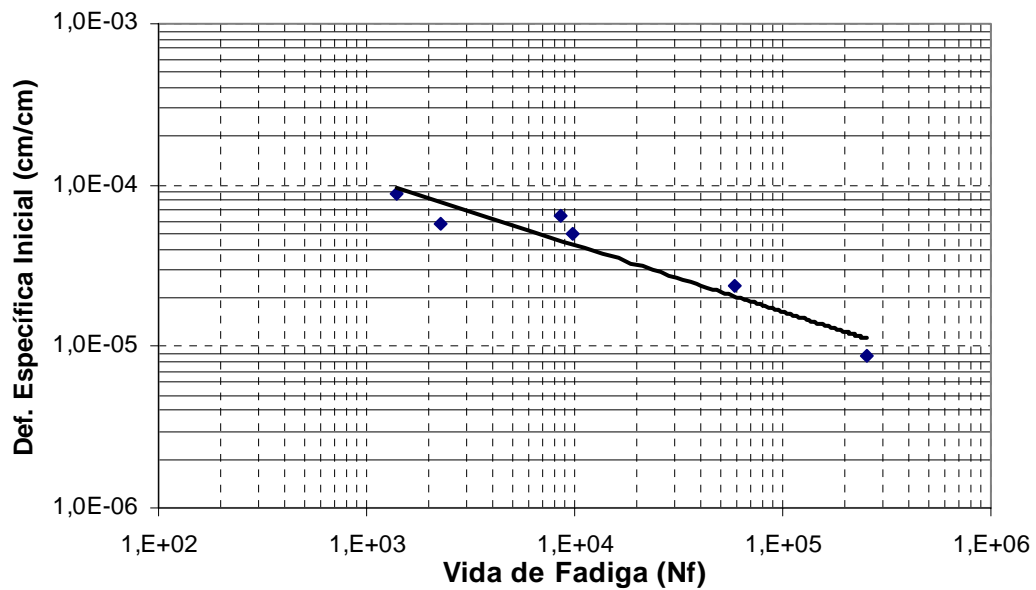


Figura 4.11: Relação entre vida de fadiga e deformação específica inicial para a mistura de Referência.

#### 4.2.5 Ensaio de Compressão Uniaxial Sob Carga Repetida

Para avaliação da resistência das misturas asfálticas ao acúmulo de deformações plásticas foram realizados ensaios de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida. A Tabela 4.3 e Tabela 4.4 apresentam os valores de deformação plástica e inclinação da reta entre 100s e 3600s, respectivamente, obtidos nos ensaios de compressão uniaxial sob carga repetida para a mistura de Referência.

Tabela 4.3: Valores da deformação permanente para mistura de Referência, obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida ( $T=45^{\circ}\text{C}$ ).

<i>Tensões de ensaio</i>	<i>Mistura de Referência (0/0/100)</i>
	<i>Deformação Permanente específica (cm/cm)</i>
<i>Tensão de 0,1MPa</i>	0,0040
<i>Tensão de 0,4MPa</i>	0,0046
<i>Tensão de 0,7MPa</i>	0,0045

Tabela 4.4: Valores da inclinação do trecho entre 100s e 3600s para mistura de Referência, obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida (T=45°C).

<i>Tensões de ensaio</i>	<i>Mistura de Referência (0/0/100)</i>
	<i>Inclinação entre 100s e 3600s</i>
<i>Tensão de 0,1MPa</i>	1,70 x 10 <sup>-6</sup>
<i>Tensão de 0,4MPa</i>	1,49 x 10 <sup>-6</sup>
<i>Tensão de 0,7MPa</i>	1,34 x 10 <sup>-6</sup>

#### 4.2.6 Resistência ao Desgaste – Metodologia Cântabro

Na Tabela 4.5, são apresentados os valores obtidos no ensaio de perda de massa para a mistura de Referência, sendo a média obtida a partir de três amostras. Os ensaios foram realizados sem nenhum condicionamento prévio e na temperatura de 25°C.

Tabela 4.5: Resultados do ensaio de perda de massa (T=25°C) para mistura de Referência.

<i>Denominação</i>	<i>Perda de Massa (%)</i>			
	<i>Amostra 1</i>	<i>Amostra 2</i>	<i>Amostra 3</i>	<i>Média</i>
<i>Referência (0/0/100)</i>	4,07	3,90	3,45	3,80

#### 4.2.7 Ensaio de Adesividade – Metodologia Lottman Modificada

Os resultados obtidos no ensaio de adesividade (dano induzido por umidade – Metodologia Lottman Modificada) são apresentados na Tabela 4.6. Estão tabelados os valores das médias de três corpos-de-prova para determinação da resistência à tração das amostras com e sem condicionamento.

Tabela 4.6: Resultado obtido no ensaio de adesividade – Metodologia Lottman Modificada para mistura de Referência.

<i>Denominação</i>	<i>Rt<sup>1</sup> (sem cond.) (MPa)</i>	<i>Rt<sup>1</sup> (com cond.) (MPa)</i>	<i>RRT<sup>2</sup> (%)</i>
<i>Referência (0/0/100)</i>	0,83	0,65	78

Nota: <sup>1</sup> Rt – resistência à tração por compressão diametral; <sup>2</sup> RRT – Resistência Retida à Tração.

No Quadro 4.1 estão sumarizadas as propriedades finais de projeto da mistura de Referência.

Quadro 4.1: Resumo dos resultados das propriedades finais da mistura de Referência.

Propriedade	DAER ES 16/98	Unidade	Valor de Projeto
Teor de Betume	---	%	4,75
Volume de Vazios	3 a 5	%	4,00
Relação Betume Vazios	75 a 82	%	76,0
Vazios do Agregado Mineral	>14	%	16,2
Massa Máxima Teórica	---	KN/m <sup>3</sup>	2,68
Massa Específica Aparente	97% (mínimo)	KN/m <sup>3</sup>	2,58
Estabilidade	> 8	kN	20,0
Fluência	2 a 4,6	mm	3,3
Resistência à Tração	---	MPa	1,25
Módulo de Resiliência	---	MPa	6000
Relação Mr/Rt	---	adm	4800
Relação Est/Fluência	---	MN/m	6,06
Relação #200/Betume	0,6 a 1,6 <sup>1</sup>	%	1,2
Metodologia Cântabro	---	%	3,8
Metodologia Lottman Modificada	80 <sup>1</sup>	%	70

Nota: <sup>1</sup> SUPERPAVE™

### 4.3 MISTURA A (70/0/30)

A seguir são apresentados os resultados obtidos para a mistura A, sendo esta composta agregado siderúrgico (escória de aciaria) e agregado mineral (basalto), na proporção descrita na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Composição de agregados da Mistura A.

Denominação	Escória de Aciaria (%)	Pó-de-Pedra (%)
Mistura A (70/0/30)	70	30

#### 4.3.1 Dosagem Marshall

Na Figura 4.12 está representada a curva percentagem de vazios *versus* percentagem de ligante utilizada nas amostras, sendo que o volume de vazios diminuiu com o aumento do teor de ligante. O teor de ligante de projeto, considerando-se 4,00% de vazios, foi de 5,50%.

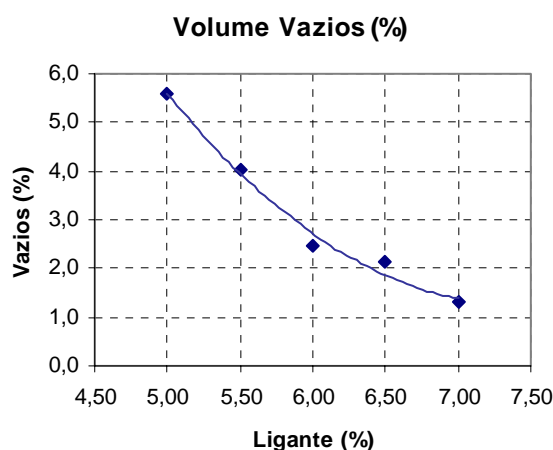


Figura 4.12: Curva do volume de vazios, para Mistura A.

Estão representados, na Figura 4.13 (a), a percentagem de vazios do agregado mineral, onde observa-se que todos os teores ficaram acima do valor da especificação, atingindo o valor 19,00% para o teor de ligante de projeto (5,50%). A relação betume/vazios representada na Figura 4.13 (b) aumenta com o acréscimo do teor de ligante para a Mistura A, o que já era esperado. O valor obtido para o teor de ligante de projeto foi de 79%, ficando na média dos valores fixados pela especificação.

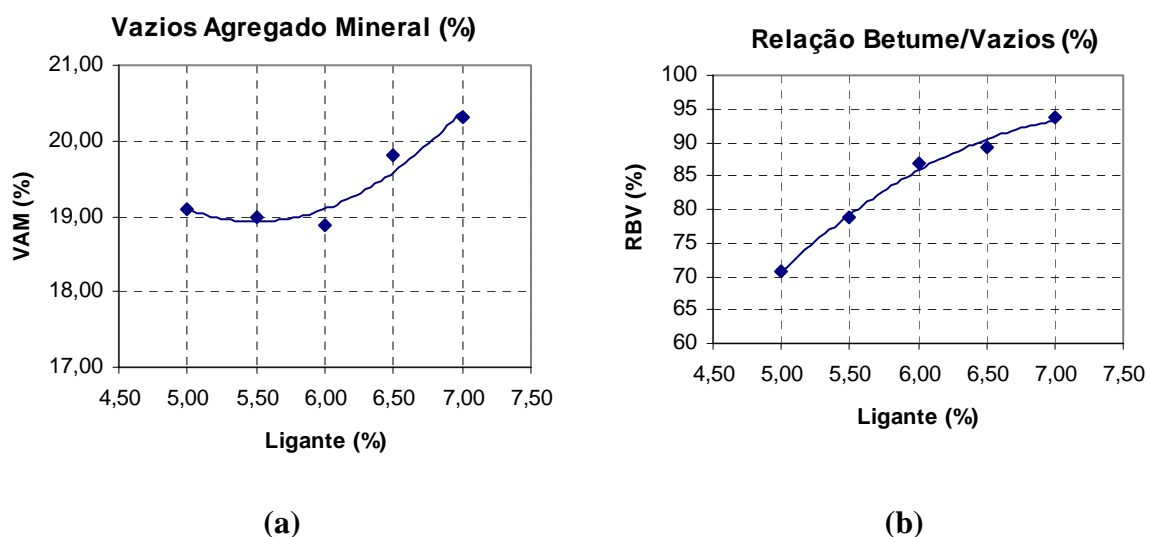


Figura 4.13: (a) Curva dos vazios do agregado mineral para Mistura A. (b) Curva da relação betume/vazios, para Mistura A.

Na Figura 4.14 esta representada a curva da massa específica aparente da Mistura A, podendo-se observar um aumento da densidade até o teor de 6,00%, com um decréscimo a partir desse teor. A importância desse parâmetro se deve ao fato de ser utilizado no controle da qualidade do CBUQ em campo.

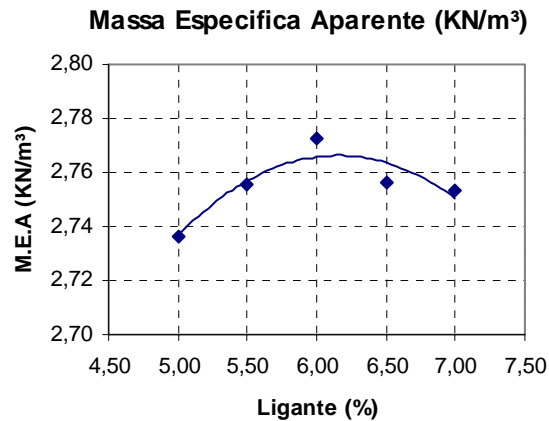


Figura 4.14: Curva da massa específica aparente para Mistura A.

Está representada na Figura 4.15 (a), a curva de Estabilidade para a Mistura A, com os valores variando entre 16,2kN e 23,1kN. A especificação recomenda valores acima de 8kN, como desejável para a mistura. Portanto, todos os teores estão acima do mínimo exigido pela especificação. Na Figura 4.15 (b), está representada a curva da Fluência para a Mistura A, onde observa-se que os valores ficaram dentro dos limites especificados, sendo que o valor mínimo especificado para Fluência é de 2mm e o máximo de 4,6mm. Pode-se observar que para o teor de 6,00% houve uma pequena dispersão.

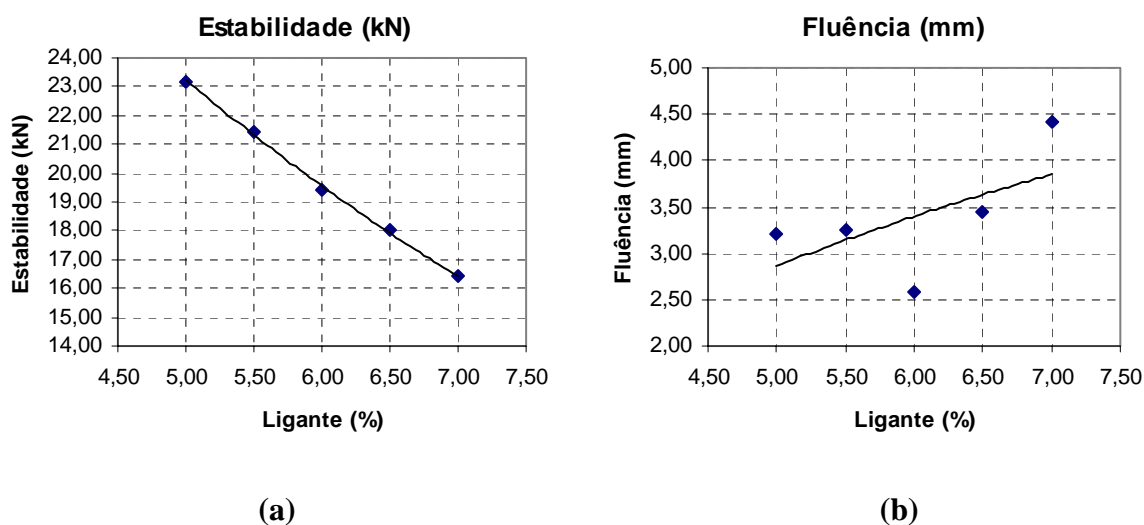


Figura 4.15: (a) Curva de Estabilidade (kN) para Mistura A. (b) Curva da Fluência (mm) para Mistura A.

Está representada na Figura 4.16, a curva da relação Estabilidade/Fluência, onde se pode observar um patamar para os teores iniciais, sendo que a partir do teor de 6,00% houve decréscimo da relação.

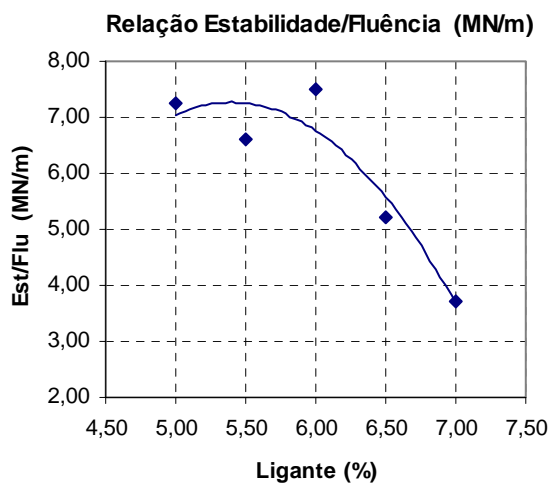


Figura 4.16: Curva da relação Estabilidade/Fluência para Mistura A.

### 4.3.2 Módulo de Resiliência

Na Figura 4.17 esta representada a curva do módulo de resiliência da Mistura A, onde se observa a diminuição do módulo com o aumento do teor de ligante, sendo que para o teor de projeto de 5,50% o módulo de resiliência é de 5900MPa.

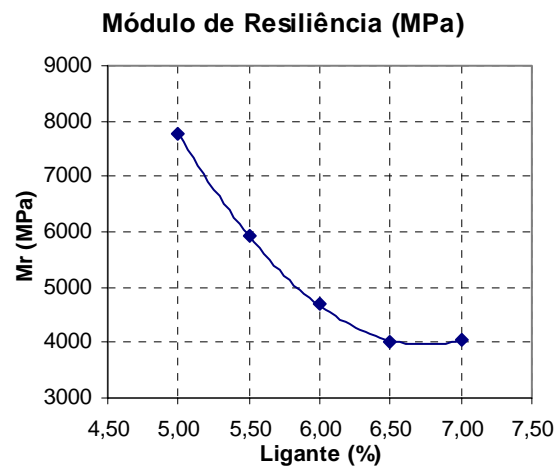


Figura 4.17: Curva do módulo de resiliência para a Mistura A.

### 4.3.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Verifica-se na Figura 4.18 que o valor de resistência à tração apresentou um decréscimo com o aumento do teor de ligante, alcançando o valor de 1,37MPa para o menor teor de ligante e de 1,08MPa para o maior teor de ligante. Para o teor de ligante de projeto a Mistura A apresentou 1,22MPa de resistência à tração.

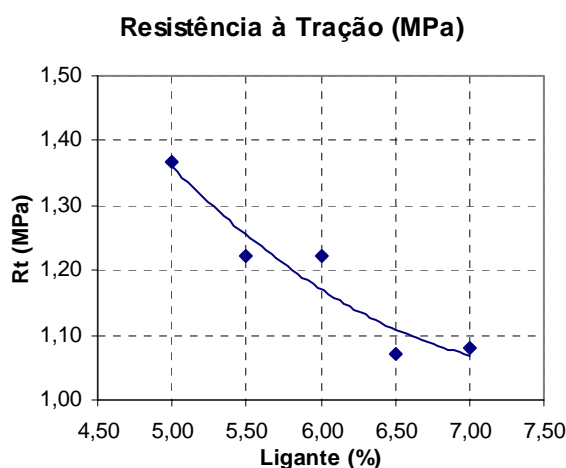


Figura 4.18: Curva da resistência à tração para a Mistura A.

É apresentada na Figura 4.19 a curva da relação entre módulo de resiliência e resistência à tração, onde se observa uma diminuição da relação  $Mr/Rt$  para os teores iniciais e uma estabilização da relação a partir do teor de 6,00% de ligante. Para o teor de ligante de projeto (5,50%) a Mistura A obteve uma relação  $Mr/Rt$  de 4836.

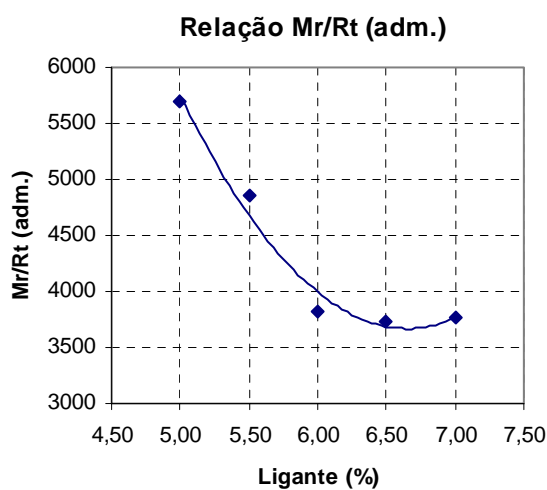


Figura 4.19: Curva da relação  $Mr/Rt$  para a Mistura A.



#### 4.3.4 Resistência à Fadiga

A seguir são apresentadas as características de resistência à fadiga da Mistura A. Os ensaios foram realizados à tensão controlada, à 25°C, em amostras moldadas no teor de ligante de projeto. O critério de ruptura utilizado neste ensaio é o trincamento completo da amostra.

As curvas de fadiga das misturas avaliadas estão expressas em função da sollicitação: tensão de tração, diferença de tensões e deformação específica inicial de tração. Estão representadas nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 as curvas de fadiga da Mistura A em função das sollicitações.

Na Tabela 4.8 estão apresentadas as constantes dos modelos gerados para a Mistura A, em função das sollicitações.

Tabela 4.8: Constantes do modelo de fadiga (curva de Wöhler) para a Mistura A.

Denominação	Tensão de Tração (MPa)			Dif. de Tensões (MPa)			Def. Esp. Inicial (cm/cm)		
	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
Mistura A (70/0/30)	108,92	-3,929	0,98	25293	-3,929	0,98	$9,096 \cdot 10^{-5}$	-2,036	0,89

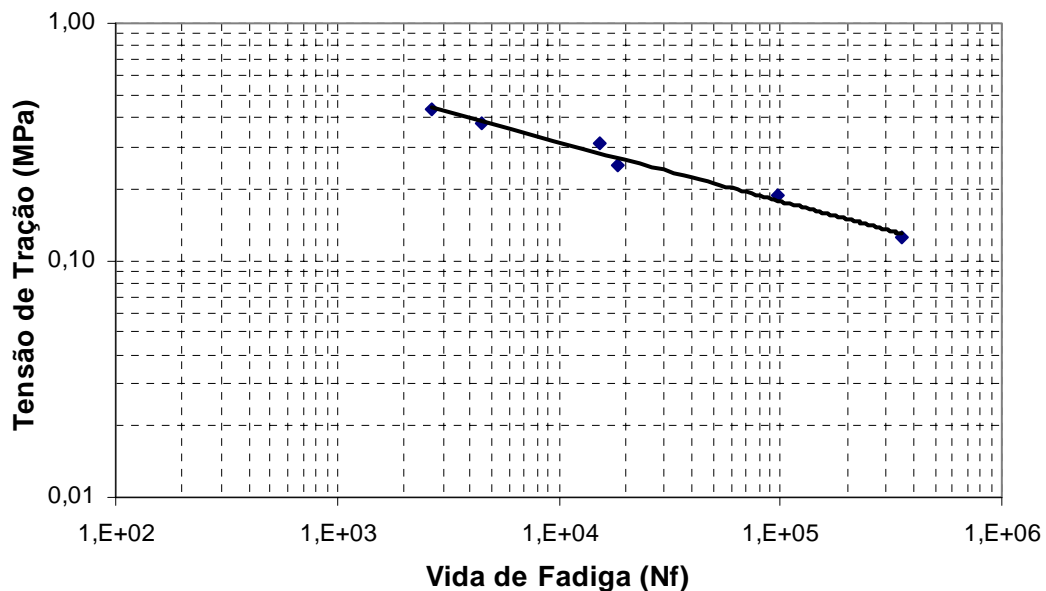


Figura 4.20: Relação entre vida de fadiga e tensão de tração para a Mistura A.

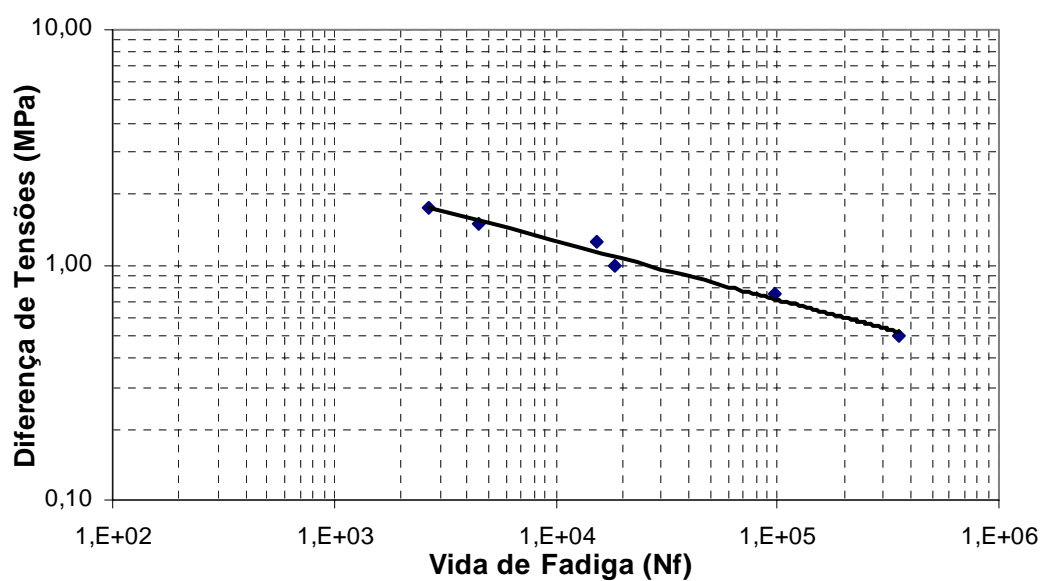


Figura 4.21: Relação entre vida de fadiga e diferença de tensões para a Mistura A.

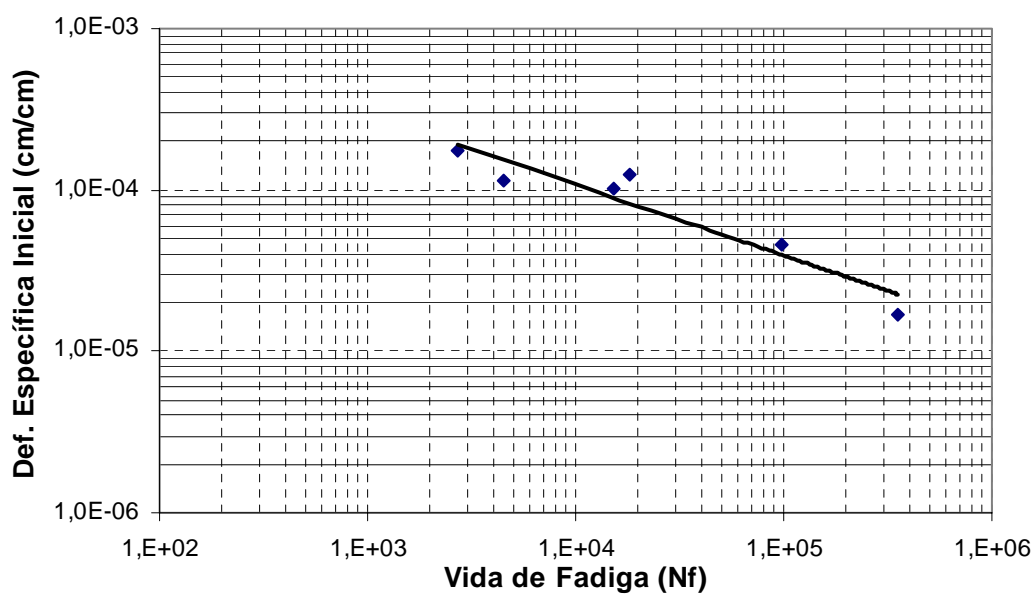


Figura 4.22: Relação entre vida de fadiga e deformação específica inicial para a Mistura A.

### 4.3.5 Ensaio de Compressão Uniaxial Sob Carga Repetida

Para avaliação da resistência das misturas asfálticas ao acúmulo de deformações plásticas foram realizados ensaios de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida. As Tabelas 4.9 e 4.10 apresentam os resultados obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida obtidos nos ensaios para Mistura A.

Tabela 4.9: Valores da deformação permanente para Mistura A obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida (T=45°C).

<i>Tensões de ensaio</i>	<i>Mistura A (70/0/30)</i>	
	<i>Deformação Permanente específica (cm/cm)</i>	
<i>Tensão de 0,1MPa</i>	0,002	
<i>Tensão de 0,4MPa</i>	0,004	
<i>Tensão de 0,7MPa</i>	0,006	

Tabela 4.10: Valores da inclinação do trecho entre 100s e 3600s, obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida para Mistura A (T=45°C).

<i>Tensões de ensaio</i>	<i>Mistura A (70/0/30)</i>	
	<i>Inclinação entre 100s e 3600s</i>	
<i>Tensão de 0,1MPa</i>	$9,50 \times 10^{-7}$	
<i>Tensão de 0,4MPa</i>	$2,38 \times 10^{-6}$	
<i>Tensão de 0,7MPa</i>	$4,08 \times 10^{-6}$	

### 4.3.6 Resistência ao Desgaste – Metodologia Cântabro

Na Tabela 4.11, são apresentados os valores obtidos no ensaio de perda de massa para a Mistura A, sendo a média obtida a partir de três amostras. Os ensaios foram realizados sem nenhum condicionamento prévio e na temperatura de 25°C.

Tabela 4.11: Resultados do ensaio de perda de massa (T=25°C) para a Mistura A.

<i>Denominação</i>	<i>Perda de Massa (%)</i>			
	<i>Amostra 1</i>	<i>Amostra 2</i>	<i>Amostra 3</i>	<i>Média</i>
<i>Mistura A (70/0/30)</i>	3,16	1,79	2,42	<b>2,00</b>

### 4.3.7 Ensaio de Adesividade – Metodologia Lottman Modificada

Os resultados obtidos no ensaio de adesividade (dano induzido por umidade – Metodologia Lottman Modificada) são apresentados na Tabela 4.12. Estão tabelados os valores das médias de três corpos-de-prova para determinação da resistência à tração das amostras com e sem condicionamento.

Tabela 4.12: Resultado obtido no ensaio de adesividade – Metodologia Lottman Modificada para a Mistura A.

<i>Denominação</i>	<i>Rt<sup>1</sup> (sem cond.) (MPa)</i>	<i>Rt<sup>1</sup> (com cond.) (MPa)</i>	<i>RRT<sup>2</sup> (%)</i>
<b>Mistura A (70/0/30)</b>	0,78	0,66	84

Nota: <sup>1</sup> Rt – resistência à tração por compressão diametral; <sup>2</sup> RRT – Resistência Retida à Tração.

No Quadro 4.2 estão sumarizadas as propriedades finais de projeto da Mistura A.

Quadro 4.2: Resumo dos resultados das propriedades finais obtidos para a Mistura A.

<b>Propriedade</b>	<b>DAER ES 16/98</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor de Projeto</b>
Teor de Betume	---	%	5,50
Volume de Vazios	3 a 5	%	4,00
Relação Betume Vazios	75 a 82	%	79,00
Vazios do Agregado Mineral	>14	%	19,00
Massa Máxima Teórica	---	KN/m <sup>3</sup>	2,87
Massa Específica Aparente	97% (mínimo)	KN/m <sup>3</sup>	2,76
Estabilidade	> 8	kN	21,46
Fluência	2 a 4,6	mm	3,30
Resistência à Tração	---	MPa	1,22
Módulo de Resiliência	---	MPa	5900
Relação Mr/Rt	---	adm	4836
Relação Est/Fluência	---	MN/m	6,50
Relação #200/Betume	0,6 a 1,6 <sup>1</sup>	%	0,97
Metodologia Cântabro	---	%	2,0
Metodologia Lottman Modificada	80 <sup>1</sup>	%	84

Nota: <sup>1</sup> SUPERPAVE™

#### 4.4 MISTURA B (5/25/70)

A seguir são apresentados os resultados obtidos para a Mistura B, a qual é composta pela proporção de agregados descritos na Tabela 4.13. Esta dosagem possui uma combinação de todos os agregados utilizados neste estudo, ou seja, agregados minerais (basalto), agregado siderúrgico (escória de aciaria) e Resíduo Areia de Fundição (R.A.F).

Tabela 4.13: Composição de agregados da Mistura B.

<i>Denominação</i>	<i>Escória de Aciaria (%)</i>	<i>Resíduo Areia de Fundição (%)</i>	<i>Brita <math>\frac{3}{4}</math> (%)</i>	<i>Brita <math>\frac{3}{8}</math> (%)</i>	<i>Pó-de-Pedra (%)</i>
<i>Mistura B (5/25/70)</i>	5	25	15	43	12

##### 4.4.1 Dosagem Marshall

Na Figura 4.23 está representada a curva percentagem de vazios *versus* percentagem de ligante utilizada nas amostras, sendo que o volume de vazios diminuiu com o aumento do teor de ligante. O teor de ligante de projeto, considerando-se 4,00% de vazios, foi de 5,35%.

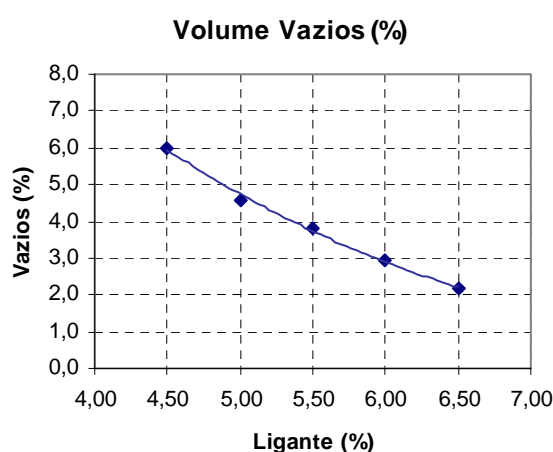


Figura 4.23: Curva do volume de vazios, para Mistura B.

Esta representada na Figura 4.24 (a), a percentagem de vazios do agregado mineral, atingindo o valor de 18,00% para o teor de ligante de 4,50% e 19,50% para 6,50% de ligante. Verifica-se na Figura 4.24 (b) que a relação betume/vazios aumenta com o acréscimo do teor de ligante para a Mistura B, o que já era esperado, atingindo o valor de 77,00% para o teor de ligante de projeto (5,35%).

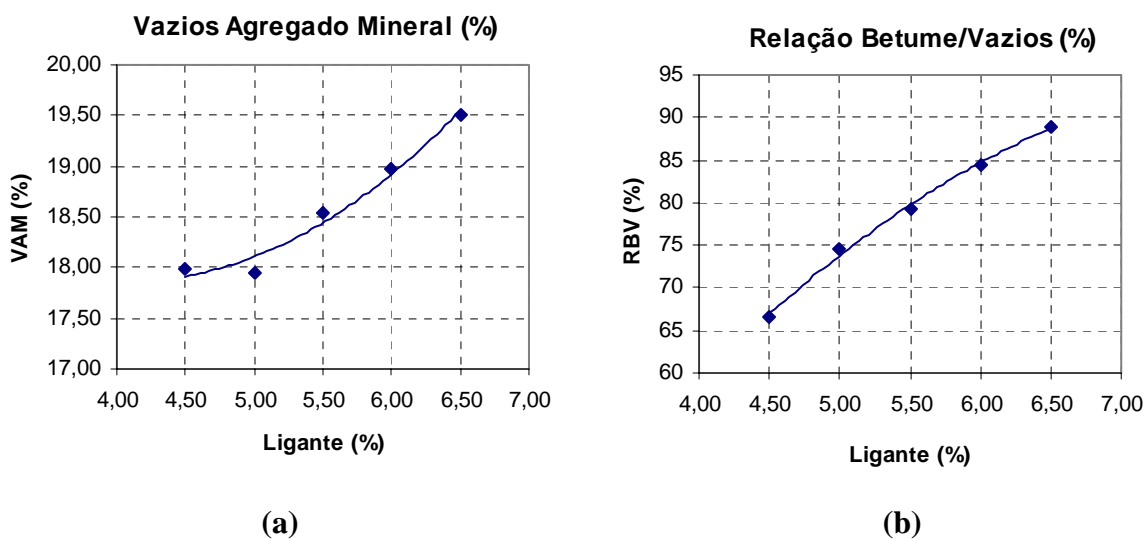


Figura 4.24: (a) Curva dos vazios do agregado mineral para Mistura B. (b) Curva da relação betume/vazios, para Mistura B.

Na Figura 4.25 esta representada a curva da massa específica aparente da Mistura B, podendo-se observar a tendência do aumento da densidade com o aumento do teor de ligante, sendo que para o teor de 6,50% houve um pequeno decréscimo, sendo que a massa específica aparente para o teor de ligante de projeto foi de  $2,70\text{kN/m}^3$ .

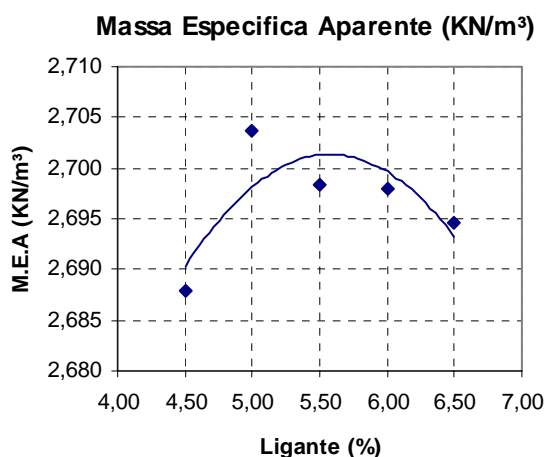


Figura 4.25: Curva da massa específica aparente para Mistura B.

Está representada na Figura 4.26 (a), a curva de Estabilidade para a Mistura B, sendo que todos os valores ficaram acima de 11kN e a especificação recomenda valores acima de 8kN. Na Figura 4.26 (b), está representada a curva da Fluência para a Mistura B, sendo que todos os valores ficaram dentro dos limites impostos pela especificação, sendo que o valor mínimo especificado para Fluência é de 2mm e o máximo de 4,6mm.

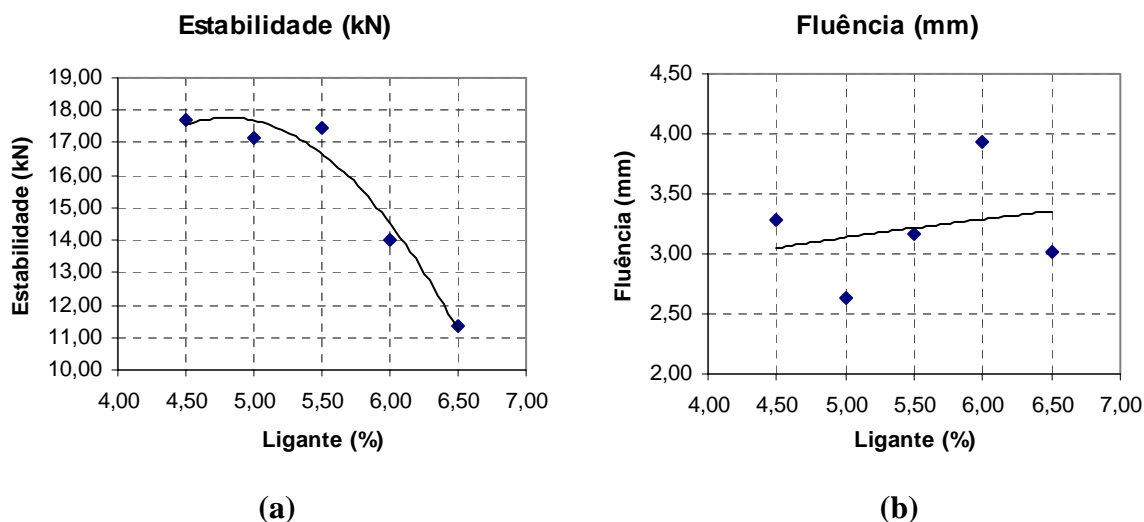


Figura 4.26: (a) Curva de Estabilidade (kN) para Mistura B. (b) Curva da Fluência (mm) para Mistura B.

Está representada na Figura 4.27, a curva da relação Estabilidade/Fluência, onde se pode observar o decréscimo da relação com a elevação do teor de ligante. Para o teor de 5,00% houve uma dispersão do valor, atingindo 6,50MN/m.

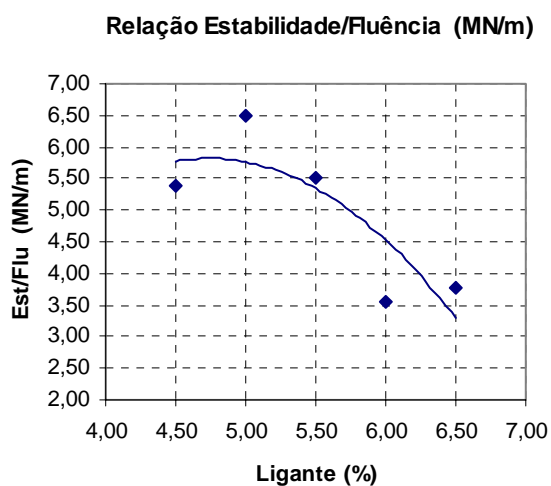


Figura 4.27: Curva da relação Estabilidade/Fluência (MN/m) para Mistura B.

#### 4.4.2 Módulo de Resiliência

A Figura 4.28 apresenta a curva do módulo de resiliência da Mistura B, onde se observa a diminuição do módulo com o aumento do teor de ligante, alcançando o valor de 5700MPa de módulo de resiliência para o teor de projeto de 5,35% (considerando-se volume de vazios igual a 4%).

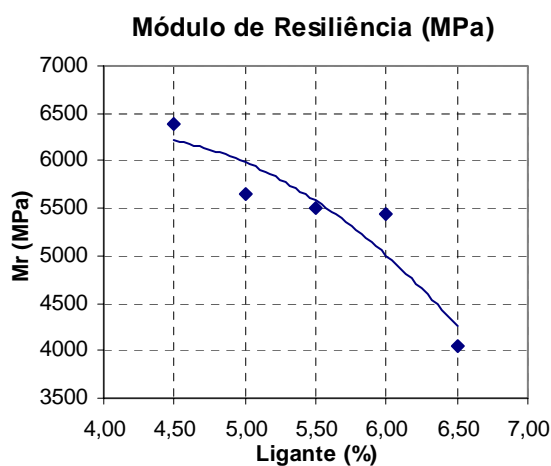


Figura 4.28: Curva do módulo de resiliência para a Mistura B.



#### 4.4.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Verifica-se na Figura 4.29 que o valor da resistência à tração diminui com o aumento do teor de ligante para a Mistura B, com os valores de resistência a tração variando entre 0,82MPa e 1,23MPa, como valor de 1,07MPa para o teor de ligante de projeto.

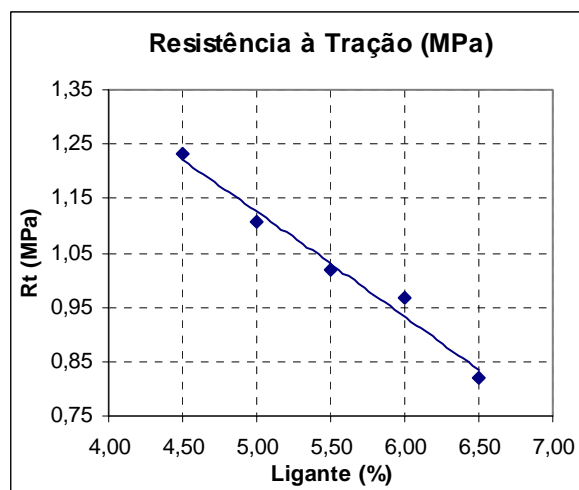


Figura 4.29: Curva da resistência à tração para a Mistura B.

Na Figura 4.30 é apresentada a curva da relação entre módulo de resiliência e resistência à tração, onde se observa uma dispersão dos valores da relação  $M_r/R_t$ . Para o teor de ligante de projeto a Mistura B obteve uma relação  $M_r/R_t$  de 5327.

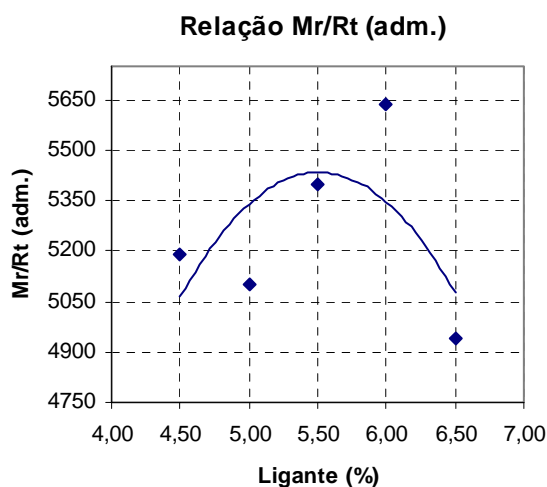


Figura 4.30: Curva da relação  $M_r/R_t$  para a Mistura B.

#### 4.4.4 Resistência à Fadiga

A seguir são apresentadas as características de resistência à fadiga da Mistura B. Os ensaios foram realizados à tensão controlada, à 25°C, em amostras moldadas no teor de ligante de projeto. O critério de ruptura utilizado neste ensaio é o trincamento completo da amostra.

As curvas de fadiga das misturas avaliadas estão expressas em função da sollicitação: tensão de tração, diferença de tensões e deformação específica inicial de tração. Estão representadas nas Figuras 4.31, 4.32 e 4.33 as curvas de fadiga da Mistura B em função das sollicitações.

Na Tabela 4.14 estão apresentadas as constantes dos modelos gerados para a Mistura B, em função das sollicitações.

Tabela 4.14: Constantes do modelo de fadiga (curva de Wöhler) para a Mistura B.

Denominação	Tensão de Tração (MPa)			Dif. de Tensões (MPa)			Def. Esp. Inicial (cm/cm)		
	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
Mistura B (5/25/70)	40,6	-4,137	0,98	12573	-4,137	0,98	2,023.10 <sup>-8</sup>	-5,183	0,91

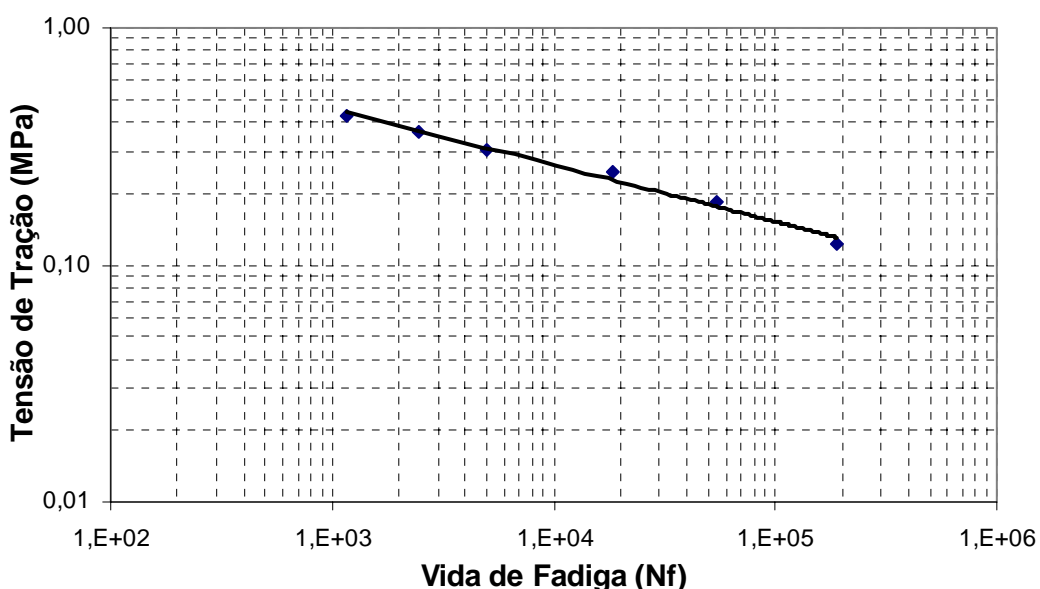


Figura 4.31: Relação entre vida de fadiga e tensão de tração para a Mistura B.

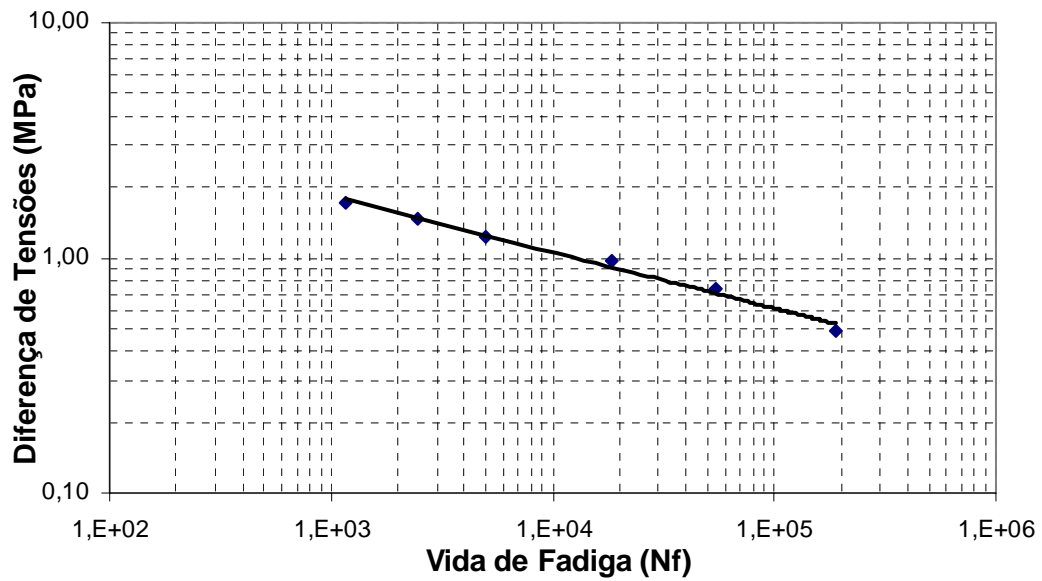


Figura 4.32: Relação entre vida de fadiga e diferença de tensões para a Mistura B.

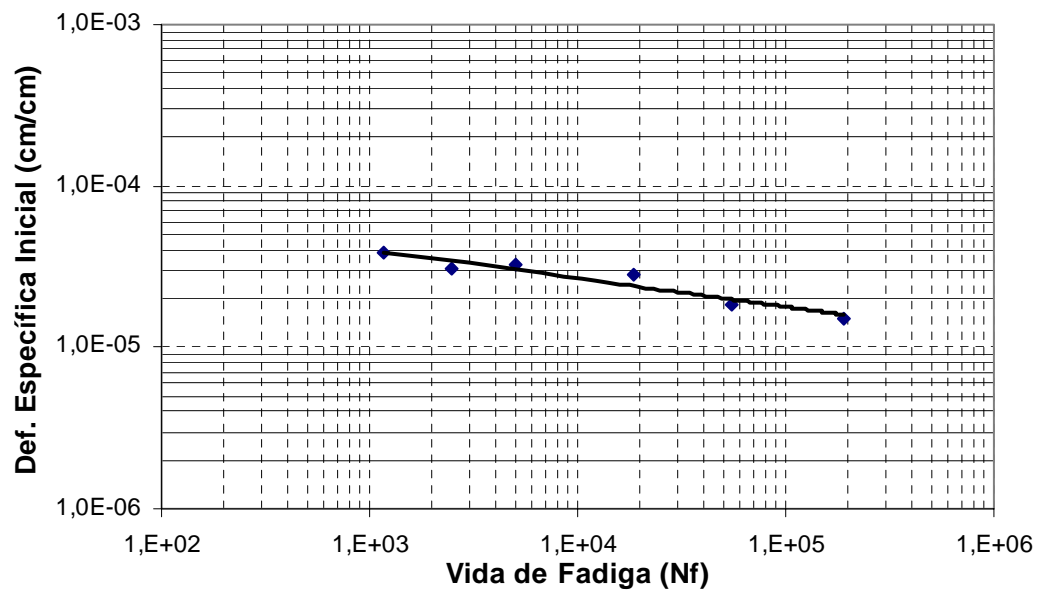


Figura 4.33: Relação entre vida de fadiga e deformação específica inicial para a Mistura B.

#### 4.4.5 Ensaio de Compressão Uniaxial Sob Carga Repetida

Para avaliação da resistência das misturas asfálticas ao acúmulo de deformações plásticas foram realizados ensaios de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida. A Tabela 4.15 apresenta os valores de deformação plástica obtidos nos ensaios de compressão uniaxial para Mistura B e a Tabela 4.16 apresenta a inclinação da reta entre 100s e 3600s.

Tabela 4.15: Valores da deformação permanente para Mistura B obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida (T=45°C).

<i>Tensões de ensaio</i>	<i>Mistura B (5/25/70)</i>	
	<i>Deformação Permanente específica (cm/cm)</i>	
<i>Tensão de 0,1MPa</i>	0,0027	
<i>Tensão de 0,4MPa</i>	0,0030	
<i>Tensão de 0,7MPa</i>	0,0034	

Tabela 4.16: Valores da inclinação do trecho entre 100s e 3600s, obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida para Mistura B (T=45°C).

<i>Tensões de ensaio</i>	<i>Mistura B (5/25/70)</i>	
	<i>Inclinação entre 100s e 3600s</i>	
<i>Tensão de 0,1MPa</i>	$1,73 \times 10^{-6}$	
<i>Tensão de 0,4MPa</i>	$1,35 \times 10^{-6}$	
<i>Tensão de 0,7MPa</i>	$1,54 \times 10^{-6}$	

#### 4.4.6 Resistência ao Desgaste – Metodologia Cântabro

Na Tabela 4.17, são apresentados os valores obtidos no ensaio de perda de massa para a Mistura B, sendo a média obtida a partir de três amostras. Os ensaios foram realizados sem nenhum condicionamento prévio e na temperatura de 25°C.

Tabela 4.17: Resultados do ensaio de perda de massa (T=25°C) para a Mistura B.

<i>Denominação</i>	<i>Perda de Massa (%)</i>			
	<i>Amostra 1</i>	<i>Amostra 2</i>	<i>Amostra 3</i>	<i>Média</i>
<i>Mistura B (5/25/70)</i>	2,08	3,25	2,21	<b>2,51</b>

#### 4.4.7 Ensaio de Adesividade – Metodologia Lottman Modificada

Os resultados obtidos no ensaio de adesividade (dano induzido por umidade – Metodologia Lottman Modificada) são apresentados na Tabela 4.18. Estão tabelados os valores das médias de três corpos-de-prova para determinação da resistência à tração das amostras com e sem condicionamento.

Tabela 4.18: Resultado obtido no ensaio de adesividade – Metodologia Lottman Modificada para a Mistura B.

<i>Denominação</i>	<i>Rt<sup>1</sup> (sem cond.) (MPa)</i>	<i>Rt<sup>1</sup> (com cond.) (MPa)</i>	<i>RRT<sup>2</sup> (%)</i>
<i>Mistura B (5/25/70)</i>	0,75	0,61	81

Nota: <sup>1</sup> Rt – resistência à tração por compressão diametral; <sup>2</sup> RRT – Resistência Retida à Tração.

No Quadro 4.3 estão sumarizadas as propriedades finais de projeto da Mistura B.

Quadro 4.3: Resumo dos resultados das propriedades finais da Mistura B.

<b>Propriedade</b>	<b>ES 16/98 DAER</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor de Projeto</b>
Teor de Betume de Projeto	---	%	5,35
Volume de Vazios	3 a 5	%	4,00
Relação Betume Vazios	75 a 82	%	77,00
Vazios do Agregado Mineral	>14	%	18,25
Massa Máxima Teórica	---	KN/m <sup>3</sup>	2,81
Massa Específica Aparente	97% (mínimo)	KN/m <sup>3</sup>	2,70
Estabilidade	> 8	kN	17,00
Fluência	2 a 4,6	mm	3,30
Resistência à Tração	---	MPa	1,07
Módulo de Resiliência	---	MPa	5700
Relação Mr/Rt	---	adm	5327
Relação Est/Fluência	---	MN/m	5,15
Relação #200/Betume	0,6 a 1,6 <sup>1</sup>	%	1,11
Metodologia Cântabro	---	%	2,51
Metodologia Lottman Modificada	80 <sup>1</sup>	%	81

Nota: <sup>1</sup>SUPERPAVE™.

## 4.5 MISTURA C (85/15/0)

A seguir são apresentados os resultados obtidos para a mistura C, sendo que esta dosagem possui uma combinação de agregado siderúrgico (escória de aciaria) e Resíduo Areia de Fundição (R.A.F) na proporção indicada na Tabela 4.19.

Tabela 4.19: Composição de agregados da Mistura C.

<i>Denominação</i>	<i>Escória de Aciaria (%)</i>	<i>Resíduo Areia de Fundição (%)</i>
<i>Mistura C (85/15/0)</i>	85	15

### 4.5.1 Dosagem Marshall

Na Figura 4.34 está representada a curva percentagem de vazios *versus* percentagem de ligante utilizada nas amostras, sendo que o volume de vazios diminuiu com o aumento do teor de ligante. O teor de ligante de projeto foi de 7,00%, considerando-se 4,00% de volume de vazios.

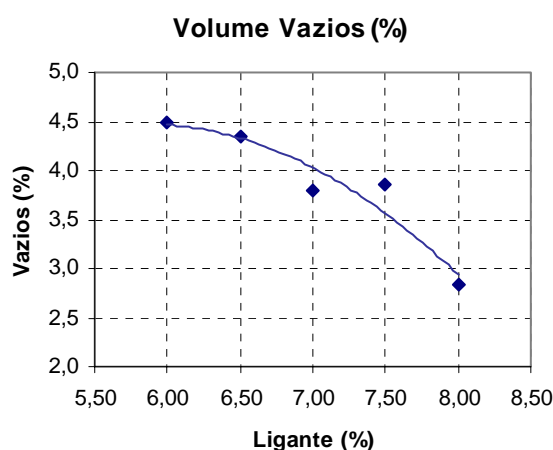


Figura 4.34: Curva do volume de vazios, para Mistura C.

Esta representada na Figura 4.35 (a), a percentagem de vazios do agregado mineral, onde se observa que os valores variaram de 20,45% para o teor de 6,00% a 24,00% para o teor de 8,00%, atingindo valores acima da especificação (14,00%) para todas as amostras desta mistura. A relação betume/vazios representada na Figura 4.35 (b) apresentou acréscimo da

relação com o aumento do teor de ligante, o que já era esperado. O valor obtido para o teor de ligante de projeto foi de 83,00%, ficando acima dos valores fixados pela especificação (75,00% a 82,00%).

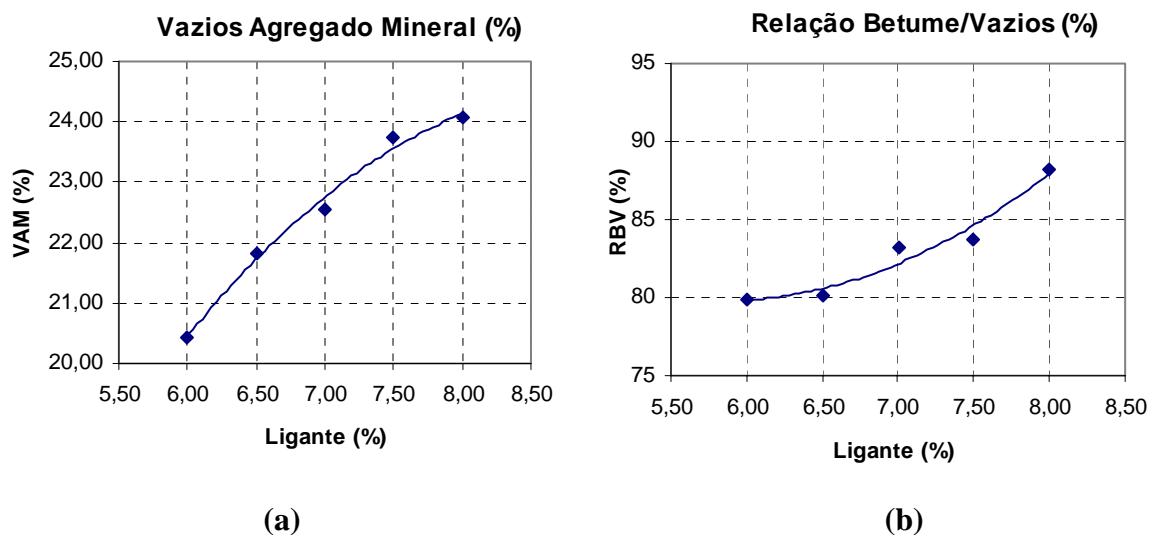


Figura 4.35: (a) Curva dos vazios do agregado mineral para Mistura C. (b) Curva da relação betume/vazios, para Mistura C.

Na Figura 4.36 esta representada a curva da massa específica aparente da Mistura C, podendo-se observar um decréscimo da massa específica com o aumento do teor de ligante, sendo que a densidade para o teor de projeto (7,00%) foi de  $2,705 \text{ kN/m}^3$ . A importância desse parâmetro se deve ao fato de ser utilizado no controle da qualidade do CBUQ em campo.

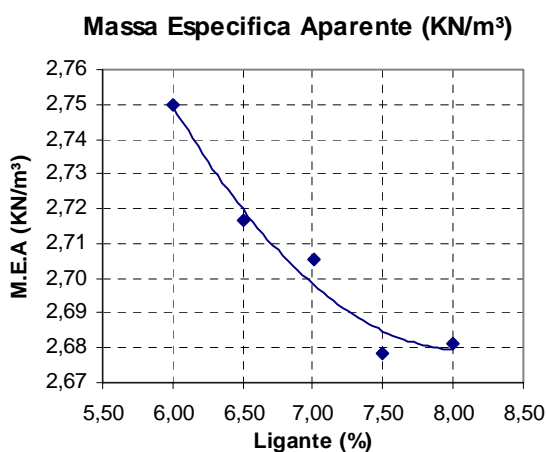


Figura 4.36: Curva da massa específica aparente para Mistura C.

Está representada na Figura 4.37 (a), a curva de Estabilidade para a Mistura C, sendo que todos os valores ficaram acima dos 8kN que recomenda a especificação, como desejável para a mistura. Para o teor de projeto da Mistura C, o valor da Estabilidade foi de 11,33kN. Na Figura 4.37 (b), está representada a curva da Fluência para a Mistura C, onde se observa que para os teores acima de 7,00% de ligante a Fluência ficou acima dos limites especificados (2mm a 4,6mm). Para o teor de ligante de projeto (7,00%) a Fluência obtida foi de 4,72mm, um pouco acima do limite da especificação.

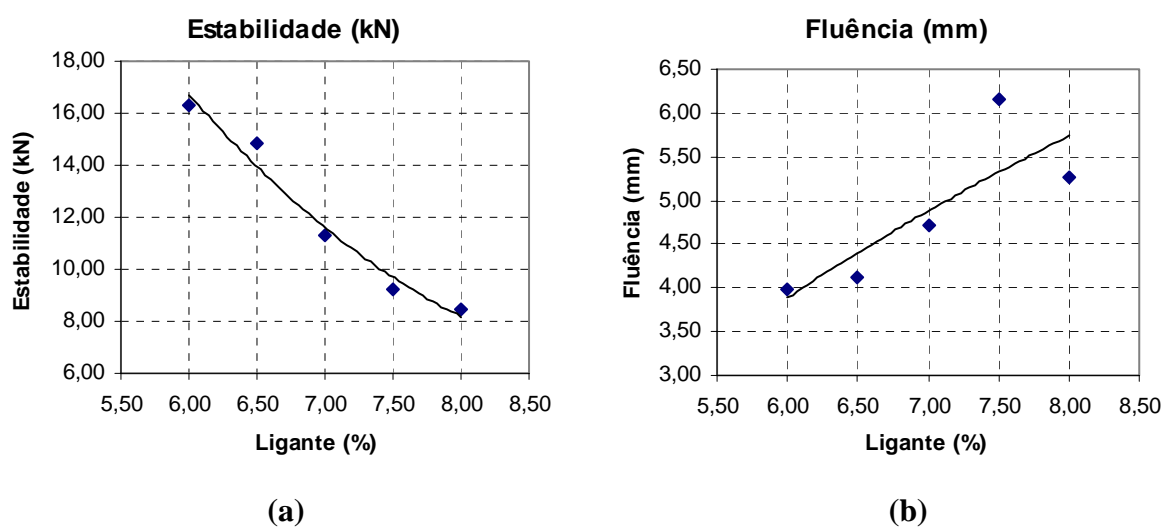


Figura 4.37: (a) Curva de Estabilidade (kN) para Mistura C. (b) Curva da Fluência (mm) para Mistura C.

Na Figura 4.38 esta representada a curva da relação Estabilidade/Fluência, onde se pode observar o decréscimo da relação com o aumento do teor de ligante utilizado nas amostras, sendo que para o teor de ligante de projeto foi obtido o valor de 2,40MN/m.



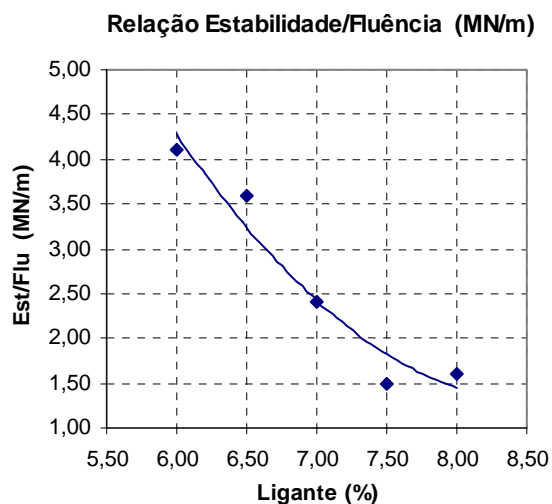


Figura 4.38: Curva da relação Estabilidade/Fluência para Mistura C.

#### 4.5.2 Módulo de Resiliência

Na Figura 4.39 esta representada a curva do módulo de resiliência da Mistura C, onde se observa a diminuição do módulo de resiliência com o aumento do teor de ligante, com valores variando de 5830MPa para o teor de 6,00% a 2125MPa para 8,00% de ligante. Um módulo de resiliência de 3720MPa foi obtido para o teor de 7,00% (teor de ligante de projeto para a Mistura C).

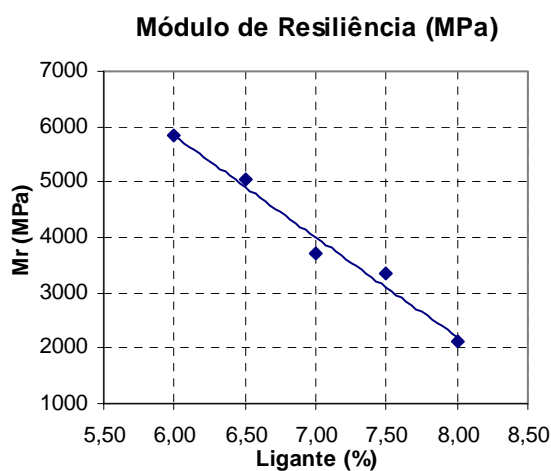


Figura 4.39: Curva do módulo de resiliência para a Mistura C.

### 4.5.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Verifica-se na Figura 4.40 que o valor de resistência à tração apresentou um decréscimo com o aumento do teor de ligante, com valores variando de 1,07MPa para o menor teor de ligante até 0,69MPa para o maior teor de ligante. Para o teor de ligante de projeto a Mistura C apresentou 0,90MPa de resistência à tração.

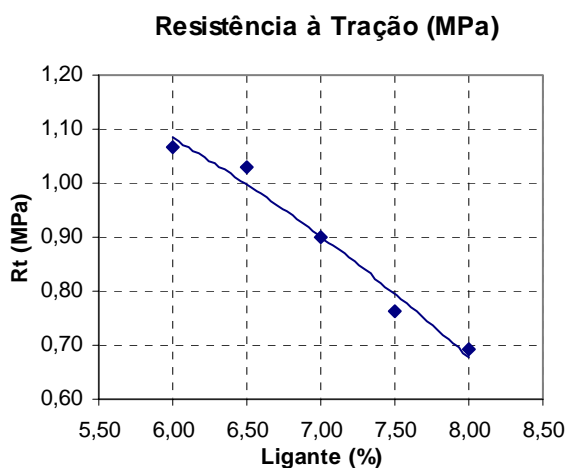


Figura 4.40: Curva da resistência à tração para a Mistura C.

É apresentada na Figura 4.41 a curva da relação entre módulo de resiliência e resistência à tração, onde se observa uma diminuição da relação  $M_r/R_t$  com o aumento do teor de ligante, o que já era esperado, uma vez que os valores do módulo de resiliência e resistência à tração também diminuíram com o aumento do teor de ligante. Para o teor de ligante de projeto (7,00%) a Mistura C obteve uma relação  $M_r/R_t$  de 4133.

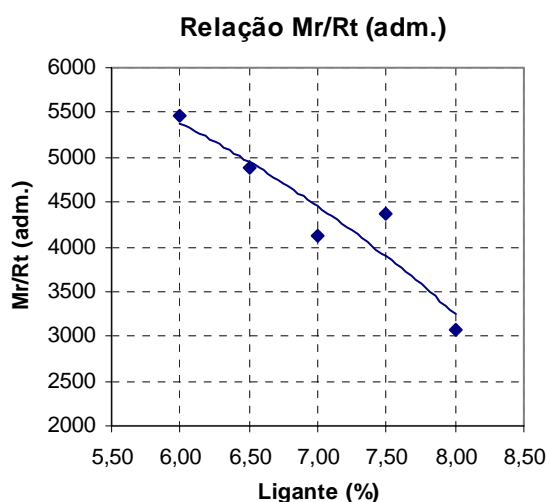


Figura 4.41: Curva da relação Mr/Rt para a Mistura C.

#### 4.5.4 Resistência à Fadiga

A seguir são apresentadas as características de resistência à fadiga da Mistura C. Os ensaios foram realizados à tensão controlada, à 25°C, em amostras moldadas no teor de ligante de projeto. O critério de ruptura utilizado neste ensaio é o trincamento completo da amostra.

As curvas de fadiga das misturas avaliadas estão expressas em função da sollicitação: tensão de tração, diferença de tensões e deformação específica inicial de tração. Estão representadas nas Figuras 4.42, 4.43 e 4.44 as curvas de fadiga da Mistura C em função das sollicitações.

Na Tabela 4.20 estão apresentadas as constantes dos modelos gerados para a Mistura C, em função das sollicitações.

Tabela 4.20: Constantes do modelo de fadiga (curva de Wöhler) para a Mistura C.

Denominação	Tensão de Tração (MPa)			Dif. de Tensões (MPa)			Def. Esp. Inicial (cm/cm)		
	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
Mistura C (85/15/0)	9,98	-3,763	0,98	1840	-3,763	0,98	9,523.10 <sup>-5</sup>	-2,468	0,97

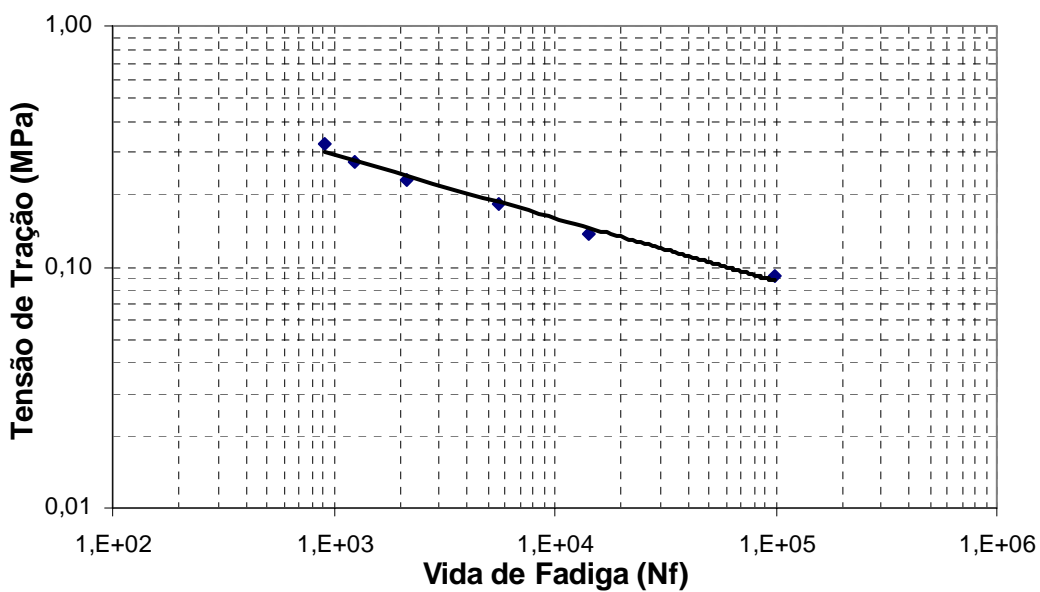


Figura 4.42: Relação entre vida de fadiga e tensão de tração para a Mistura C.

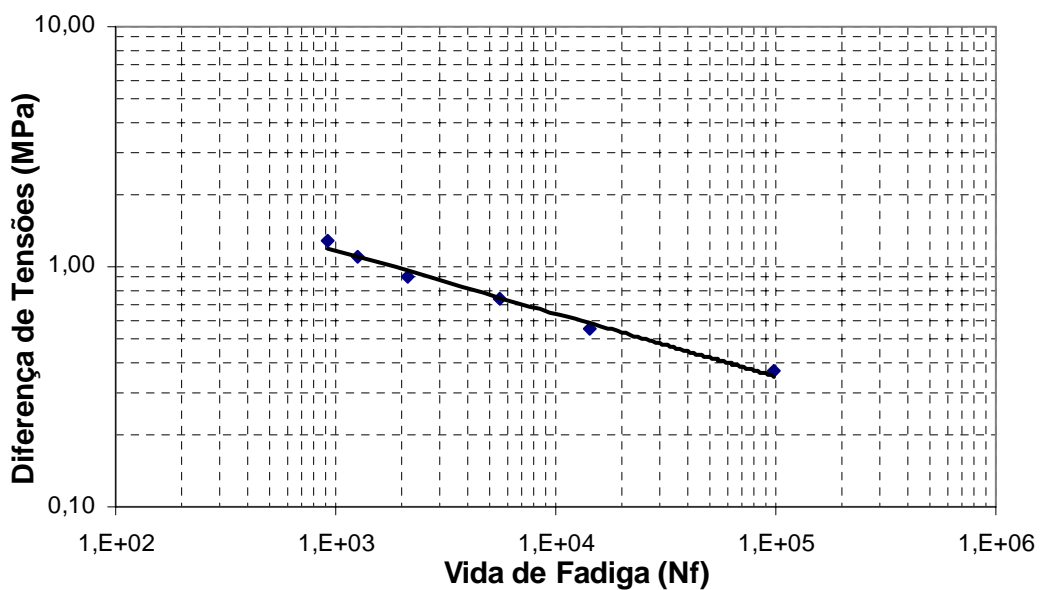


Figura 4.43: Relação entre vida de fadiga e diferença de tensões para a Mistura C.

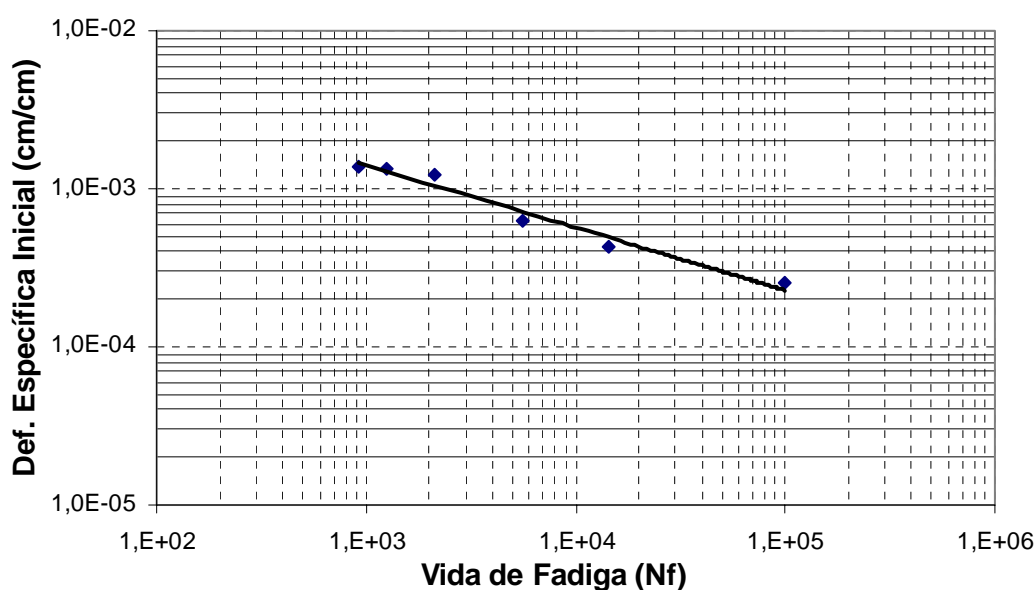


Figura 4.44: Relação entre vida de fadiga e deformação específica inicial para a Mistura C.

#### 4.5.5 Ensaio de Compressão Uniaxial Sob Carga Repetida

A avaliação da resistência das misturas asfálticas ao acúmulo de deformações plásticas foi realizada através de ensaios de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida. As Tabelas 4.21 e 4.22 apresentam os valores de deformação plástica e inclinação da reta entre 100s e 3600s obtidos nos ensaios de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida para Mistura C.

Tabela 4.21: Valores da deformação permanente obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida ( $T=45^{\circ}\text{C}$ ) para Mistura C.

<i>Tensões de ensaio</i>	<i>Mistura C (85/15/0)</i>
	<i>Deformação Permanente específica (cm/cm)</i>
<i>Tensão de 0,1MPa</i>	0,0065
<i>Tensão de 0,4MPa</i>	0,0077
<i>Tensão de 0,7MPa</i>	0,0081

Tabela 4.22: Valores da inclinação do trecho entre 100s e 3600s, obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica (T=45°C) para Mistura C.

<i>Tensões de ensaio</i>	<i>Mistura C (85/15/0)</i>
	<i>Inclinação entre 100s e 3600s</i>
<i>Tensão de 0,1MPa</i>	$9,52 \times 10^{-7}$
<i>Tensão de 0,4MPa</i>	$8,12 \times 10^{-7}$
<i>Tensão de 0,7MPa</i>	$1,02 \times 10^{-6}$

#### 4.5.6 Resistência ao Desgaste – Metodologia Cântabro

Na Tabela 4.23, são apresentados os valores obtidos no ensaio de perda de massa para a Mistura A, sendo a média obtida a partir de três amostras. Os ensaios foram realizados sem nenhum condicionamento prévio e na temperatura de 25°C.

Tabela 4.23: Resultados do ensaio de perda de massa (T=25°C) para a Mistura C.

<i>Denominação</i>	<i>Perda de Massa (%)</i>			
	<i>Amostra 1</i>	<i>Amostra 2</i>	<i>Amostra 3</i>	<i>Média</i>
<i>Mistura C (85/15/0)</i>	1,88	2,08	2,2	<b>2,05</b>

#### 4.5.7 Ensaio de Adesividade – Metodologia Lottman Modificada

Os resultados obtidos no ensaio de adesividade (dano induzido por umidade – Metodologia Lottman Modificada) são apresentados na Tabela 4.24. Estão tabelados os valores das médias de três corpos-de-prova para determinação da resistência à tração das amostras com e sem condicionamento.

Tabela 4.24: Resultado obtido no ensaio de adesividade – Metodologia Lottman Modificada para a Mistura C.

<i>Denominação</i>	<i>Rt<sup>1</sup> (sem cond.) (MPa)</i>	<i>Rt<sup>1</sup> (com cond.) (MPa)</i>	<i>RRT<sup>2</sup> (%)</i>
<i>Mistura C (85/15/0)</i>	0,68	0,55	80

Nota: <sup>1</sup> Rt – resistência à tração por compressão diametral; <sup>2</sup> RRT – Resistência Retida à Tração.

No Quadro 4.4 estão sumarizadas as propriedades finais de projeto da Mistura C.

Quadro 4.4: Resumo dos resultados das propriedades finais obtidos para a Mistura C.

<b>Propriedade</b>	<b>ES 16/98 DAER</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor de Projeto</b>
Teor de Betume	---	%	7,00
Volume de Vazios	3 a 5	%	4,00
Relação Betume Vazios	75 a 82	%	83,00
Vazios do Agregado Mineral	>14	%	22,80
Massa Máxima Teórica	---	KN/m <sup>3</sup>	2,81
Massa Específica Aparente	97% (mínimo)	KN/m <sup>3</sup>	2,70
Estabilidade	> 8	kN	11,33
Fluência	2 a 4,6	mm	4,72
Resistência à Tração	---	MPa	0,90
Módulo de Resiliência	---	MPa	3720
Relação Mr/Rt	---	adm	4133
Relação Est/Fluência	---	MN/m	2,40
Relação #200/Betume	0,6 a 1,6 <sup>1</sup>	%	0,92
Metodologia Cântabro	---	%	2,05
Metodologia Lottman Modificada	80 <sup>1</sup>	%	80

Nota: <sup>1</sup> SUPERPAVE™

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 DOSAGEM MARSHALL

No capítulo anterior, os resultados foram apresentados e analisados preliminarmente com o objetivo de identificar os fatores que exercem influência nas propriedades do Concreto Asfáltico. No entanto, faz-se necessário uma comparação entre as misturas estudadas, a qual é apresentada a seguir.

Na Figura 5.1 é apresentado o teor de ligante de projeto (considerando-se VV – Volume de Vazios = 4,0%) para cada uma das misturas estudadas, sendo que a mistura de Referência obteve o menor consumo de ligante (4,75%). Já as misturas com adição de escória de aciaria tiveram um consumo maior, o que se deve as características de absorção e textura superficial da escória serem bastante elevada, sendo parte do ligante absorvida pela escória. A Mistura A obteve um teor de ligante de 5,50%, enquanto a Mistura B, a qual é composta pela combinação de todos os agregados utilizados na pesquisa obteve teor de ligante de projeto de 5,35%. A Mistura C obteve o maior consumo de ligante dentre as quatro misturas estudadas, chegando a um teor de ligante de projeto de 7,0%, o que pode estar relacionado adição do Resíduo Areia de Fundação (R.A.F) empregado nesta mistura, podendo a maior parte do ligante estar sendo absorvida pelo resíduo e não sendo utilizado para impermeabilizar e unir os agregados na mistura.

Na Figura 5.2 está representada a percentagem de vazios do agregado mineral das quatro misturas estudadas, apresentando 16,2% para a mistura de Referência, 19,0% para a Mistura A e 17,0% para a Mistura B. A Mistura C apresentou a maior percentagem de vazios do agregado mineral, chegando a 22,8%, o que levaria a uma mistura com baixa resistência ao cisalhamento. A especificação recomenda valores acima de 14,0%, portanto, as misturas encontram-se dentro da especificação.



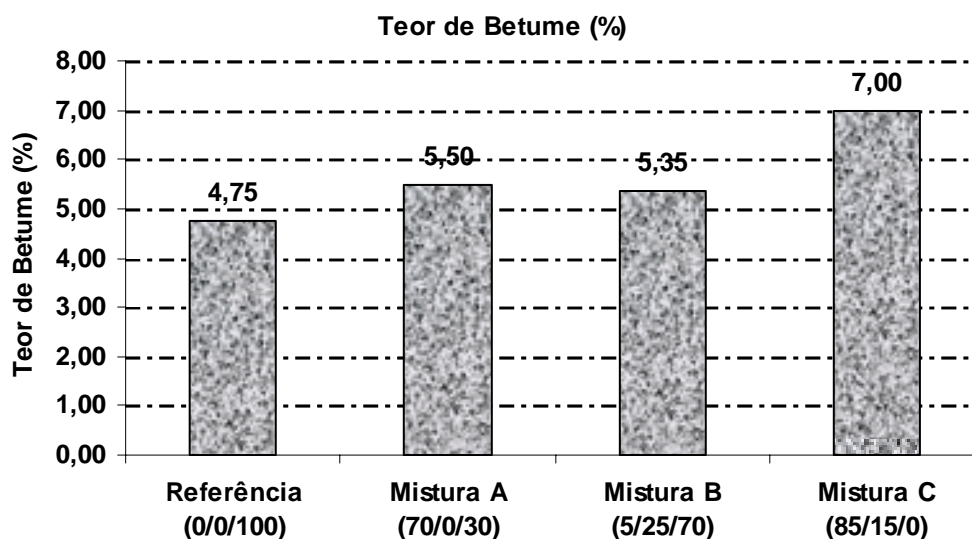


Figura 5.1: Resultado do teor de ligante de projeto (VV = 4,0%) para as quatro misturas estudadas.

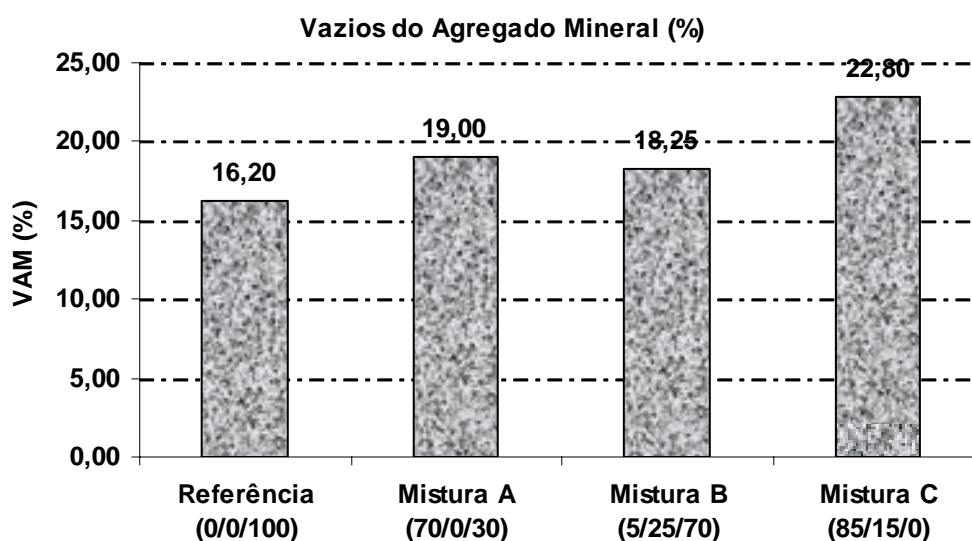


Figura 5.2: Resultado da percentagem de Vazios do Agregado Mineral no teor de ligante de projeto para as quatro misturas estudadas.

Está representado na Figura 5.3 o resultado da relação betume vazios para as misturas estudadas. A mistura de Referência obteve 76,00% e a Mistura A 79,00%, enquanto a Mistura B teve uma relação betume vazios de 77,00%. A Mistura C obteve a maior relação betume vazio, alcançando 83,00%, valor este que se encontra acima da faixa especificada pelo DAER ES 16/98 (75 a 82%). Valores elevados de RBV diminuem a Estabilidade do concreto asfáltico.

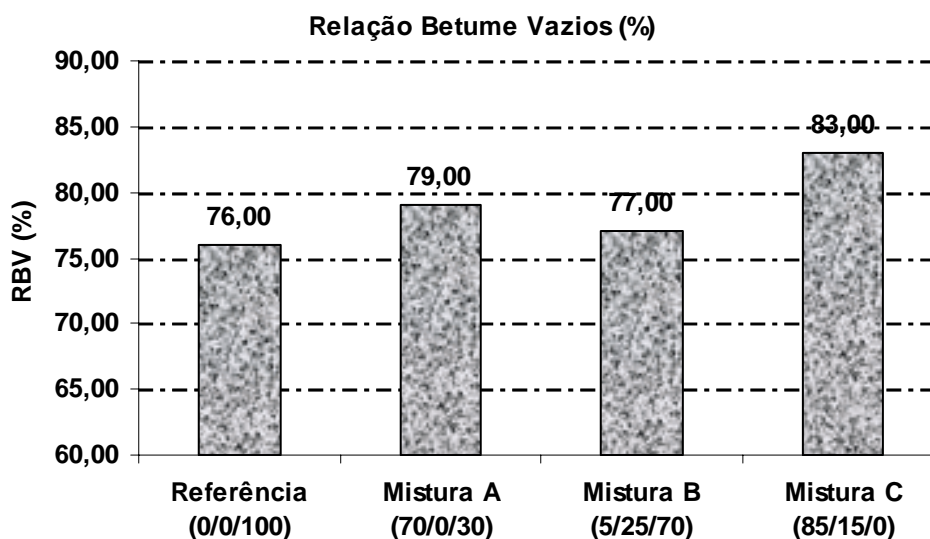


Figura 5.3: Resultado da Relação Betume Vazios no teor de ligante de projeto para as quatro misturas estudadas.

Estão representadas, na Figura 5.4, as massas específicas aparentes para as misturas estudadas, sendo que a mistura de Referência obteve massa específica aparente inferior as demais ( $2,58\text{kN/m}^3$ ), enquanto a Mistura A apresentou a maior massa específica aparente  $2,76\text{kN/m}^3$ . As Misturas B e C apresentaram  $2,70\text{kN/m}^3$  de massa específica aparente. O aumento da massa específica das misturas está relacionado ao maior peso específico da escória de aciaria.

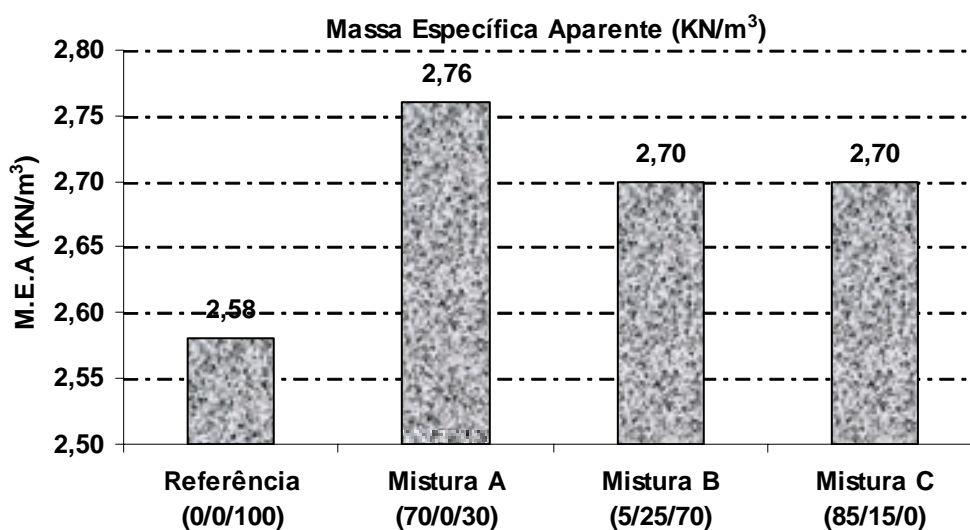


Figura 5.4: Resultado da massa específica aparente no teor de ligante de projeto ótimo para as quatro misturas estudadas.

Na Figura 5.5 estão representados os resultados da estabilidade para o teor de ligante de projeto das quatro misturas estudadas, sendo que todos os valores ficaram acima do valor especificado pelo DAER que é de 8kN, sendo a estabilidade do teor de ligante de projeto da mistura de Referência de 20kN. A Mistura C apresenta o menor valor de estabilidade, sendo de 11,33kN. A Mistura A, composta de 70% de aciaria e pó mineral, apresentou o maior valor de estabilidade, resultado das características de angularidade e lamelaridade do agregado siderúrgico.

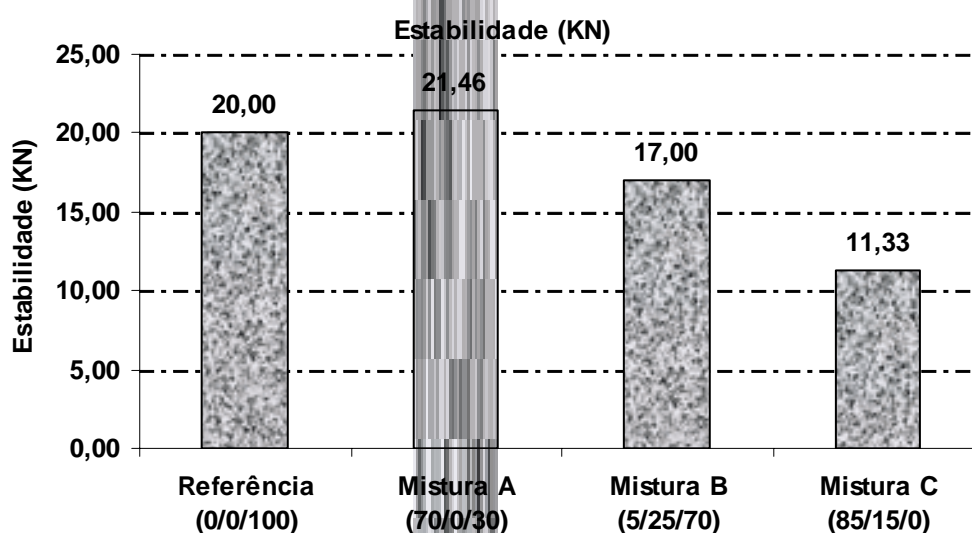


Figura 5.5: Resultado da Estabilidade Marshall no teor de ligante de projeto para as quatro misturas estudadas.

Estão representados, na Figura 5.6, os valores da fluência para o teor de ligante de projeto de cada uma das quatro misturas estudadas, sendo que a mistura de Referência obteve fluência de 3,30mm, mesmo valor encontrado para as Misturas A e B. A Mistura C ficou acima do limite superior da especificação, obtendo uma fluência de 4,72mm, valor este relacionado ao alto consumo de ligante obtido para a mistura.

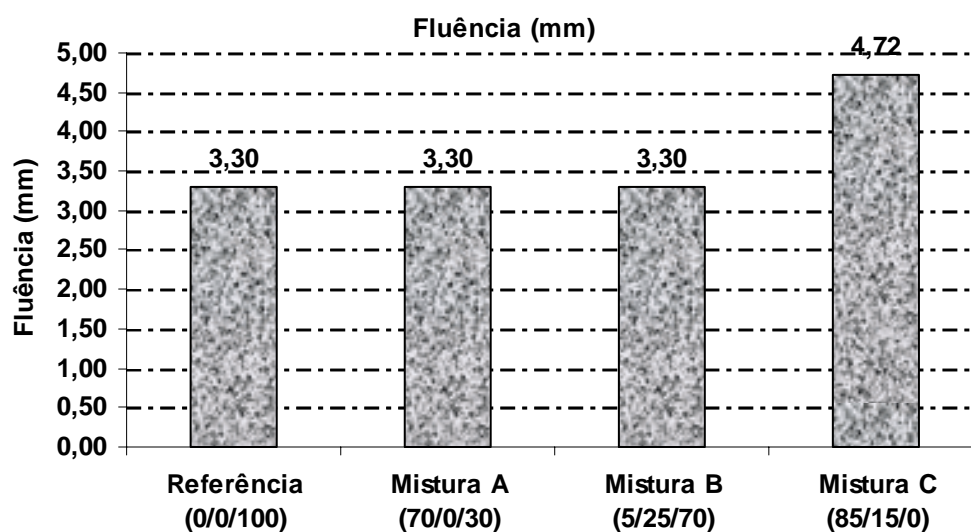


Figura 5.6: Resultado da fluência no teor de ligante de projeto para as quatro misturas estudadas.

Na Figura 5.7 está representado o resultado da relação Estabilidade/Fluência para o teor de ligante de projeto de cada uma das misturas estudadas. A mistura de Referência obteve uma relação de 6,06MN/m, enquanto a Mistura A obteve uma relação de 6,50MN/m. A Mistura B apresentou uma relação de 5,15MN/m. A Mistura C proporcionou a menor relação Estabilidade/Fluência, chegando a 2,40MN/m, decorrente dos baixos valores de estabilidade e fluência obtidos na dosagem Marshall.

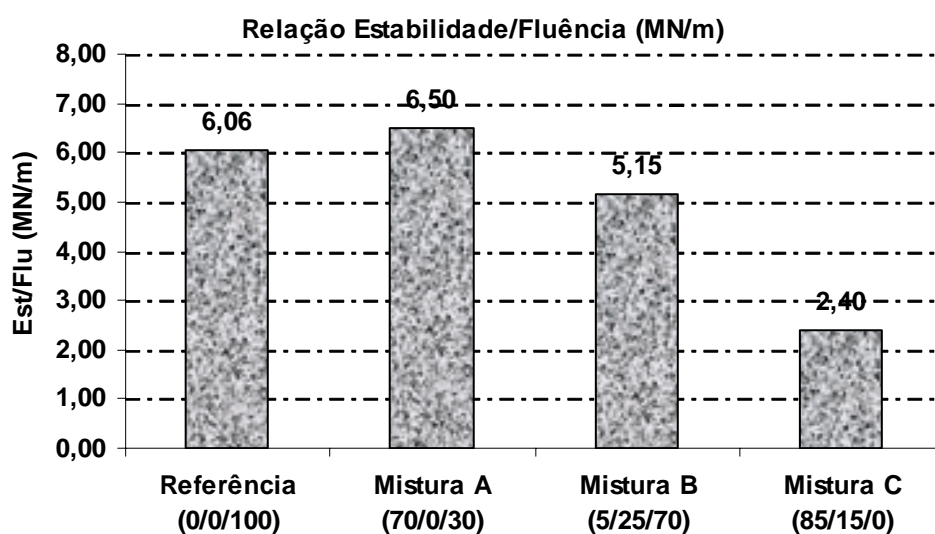


Figura 5.7: Resultado da relação Estabilidade/Fluência no teor de ligante de projeto para as quatro misturas avaliadas.

## 5.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Estão representados, na Figura 5.8, os resultados dos ensaios de módulo de resiliência para as quatro misturas estudadas. A mistura de referência apresentou módulo de resiliência de 6000MPa, sendo a mistura de maior módulo. As Misturas A e B apresentaram módulo de resiliência de 5900MPa e 5700MPa, respectivamente. A diferença encontrada nos valores de módulo está dentro da precisão do equipamento, sendo que em termos de análise mecânica esta diferença é imperceptível. A Mistura C obteve módulo de resiliência de 3720MPa sendo a mistura de menor módulo entre as misturas avaliadas, devido ao alto consumo de ligante da mistura.

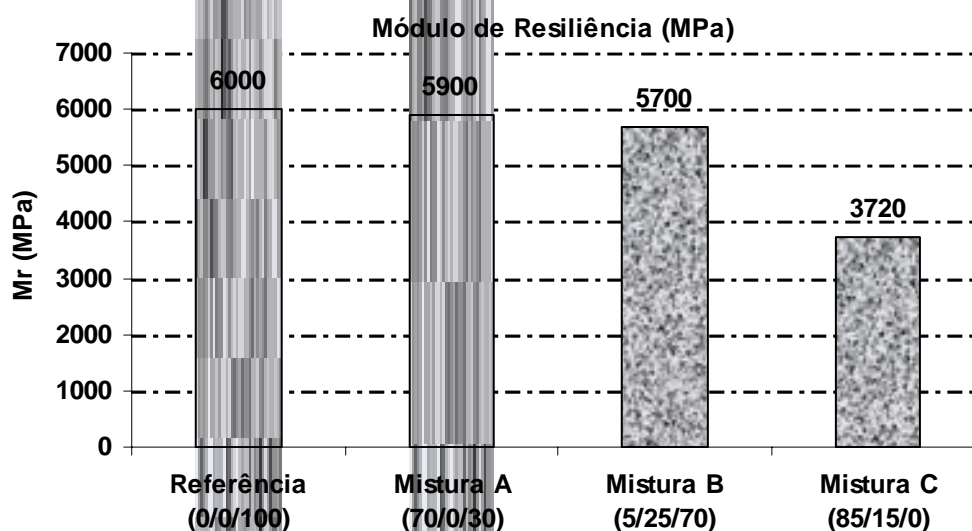


Figura 5.8: Resultado do ensaio de módulo de resiliência para as quatro misturas estudadas, no teor de ligante de projeto.

## 5.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Na Figura 5.9 está representado o resultado obtido no ensaio de resistência à tração realizado nas quatro misturas estudadas. A mistura de Referência apresentou uma resistência à tração de 1,25MPa. As demais misturas apresentaram desempenho inferior, sendo que a Mistura A obteve 1,22MPa de resistência à tração e a Mistura B apresentou 1,07MPa. O menor valor de resistência foi obtido para a Mistura C, apresentando o valor de 0,90MPa. Verifica-se que a

diminuição dos valores de resistência à tração das misturas ocorreram simultaneamente ao aumento do consumo de ligante das misturas.

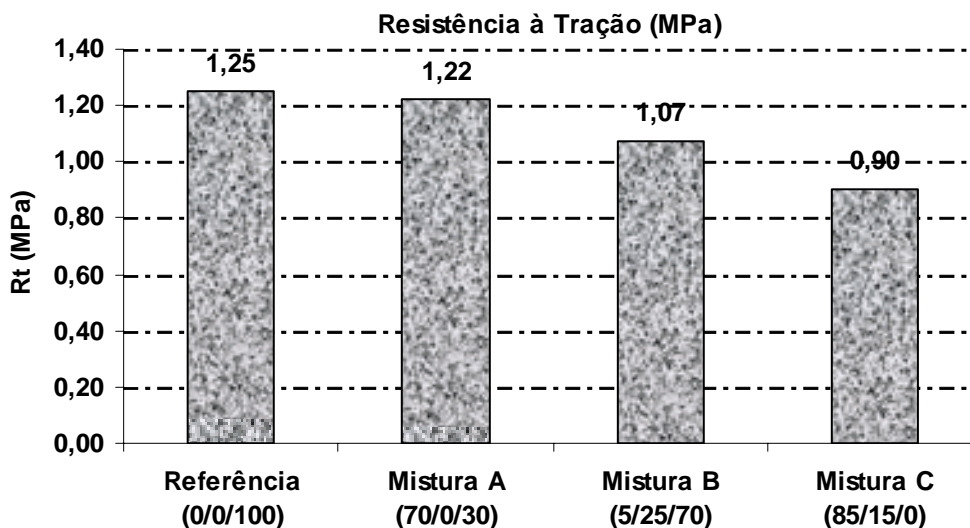


Figura 5.9: Resultado do ensaio de resistência à tração para as quatro misturas avaliadas.

Estão representados, na Figura 5.10, os valores da relação módulo de resiliência/resistência à tração, observando-se valores próximos entre a mistura de Referência e a Mistura A. A mistura B apresentou a maior relação entre módulo de resiliência e resistência à tração (5327). O valor encontrado para a Mistura C foi de 4133. A Mistura B apresentou a maior relação entre módulo de resiliência e resistência à tração, chegando a 5327. A Mistura A apresentou uma combinação de módulo de resiliência ( $M_r$ ) e resistência à tração ( $R_t$ ) mais adequada entre as misturas com incorporação de resíduos, pois houve uma maior compatibilização entre a rigidez e a resistência da mistura, já que um aumento do módulo de resiliência deixa o material mais suscetível ao trincamento por fadiga.

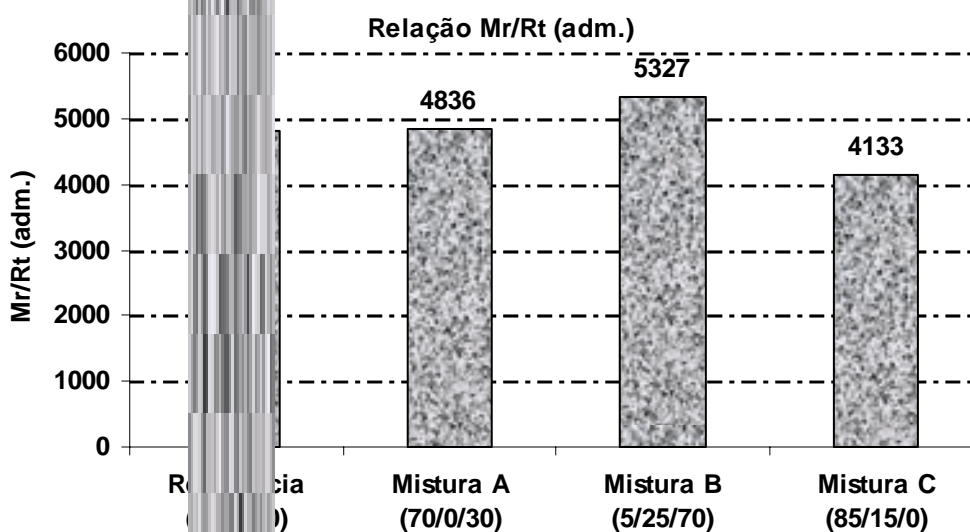


Figura 5.10: Resultado da relação módulo de resiliência e resistência à tração para as quatro misturas.

Na Figura 5.11 estão apresentados os valores da relação #200/Betume para as misturas estudadas, sendo que a mistura de Referência obteve (1,20%), a maior quantia de material passante na peneira 200mm. A Mistura C a menor relação (0,92%), em função da quantidade de material passante na peneira 200mm contida em cada mistura estudada. A Mistura B obteve uma relação de 0,97%. Quanto a Mistura B obteve uma relação #200/Betume de 1,11%. As quatro misturas estudadas apresentaram valores dentro da faixa especificada pela metodologia SUPERPAVE™.

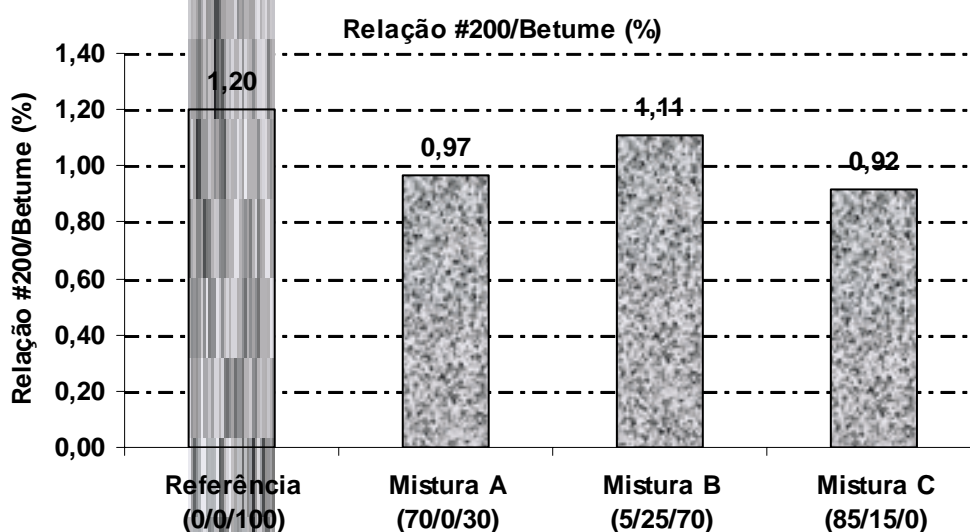


Figura 5.11: Resultados da relação #200/Betume para as quatro misturas estudadas.

## 5.4 RESISTÊNCIA À FADIGA

A seguir são apresentadas as características de resistência à fadiga das quatro misturas estudadas nesta dissertação. Os ensaios foram realizados à tensão controlada, à 25°C, em amostras moldadas no teor de ligante de projeto. O critério de ruptura utilizado neste ensaio é o trincamento completo da amostra.

As curvas de fadiga das misturas avaliadas estão expressas em função da sollicitação: tensão de tração, diferença de tensões e deformação específica inicial de tração. Estão representadas nas Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 as curvas de fadiga das quatro misturas avaliadas, em função das sollicitações.

Através de uma análise preliminar é possível verificar, que para o mesmo estado de tensões, a Mistura C (com adição de R.A.F) apresenta desempenho inferior ao da mistura de Referência. As demais misturas mantiveram o desempenho, sendo que a Mistura A apresentou um desempenho superior à mistura de Referência. Uma avaliação mais profunda pode ser equivocada, uma vez que as misturas apresentam módulos diferenciados, distribuindo as tensões de maneira diferente.

Na Tabela 5.1 estão apresentadas as constantes dos modelos gerados para as quatro misturas estudadas, em função das sollicitações.

Tabela 5.1: Constantes do modelo de fadiga (curva de Wöhler) para as quatro misturas estudadas.

<i>Denominação</i>	<i>Tensão de Tração (MPa)</i>			<i>Dif. de Tensões (MPa)</i>			<i>Def. Esp. Inicial (cm/cm)</i>		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R<sup>2</sup></i>
<i>Referência (0/0/100)</i>	44,1	-4,156	0,96	14027	-4,156	0,96	$2,558 \cdot 10^{-6}$	-2,197	0,91
<i>Mistura A (70/0/30)</i>	108,92	-3,929	0,98	25293	-3,929	0,98	$9,096 \cdot 10^{-5}$	-2,036	0,89
<i>Mistura B (5/25/70)</i>	40,6	-4,137	0,98	12573	-4,137	0,98	$2,023 \cdot 10^{-8}$	-5,183	0,91
<i>Mistura C (85/15/0)</i>	9,98	-3,763	0,98	1840	-3,763	0,98	$9,523 \cdot 10^{-5}$	-2,468	0,97



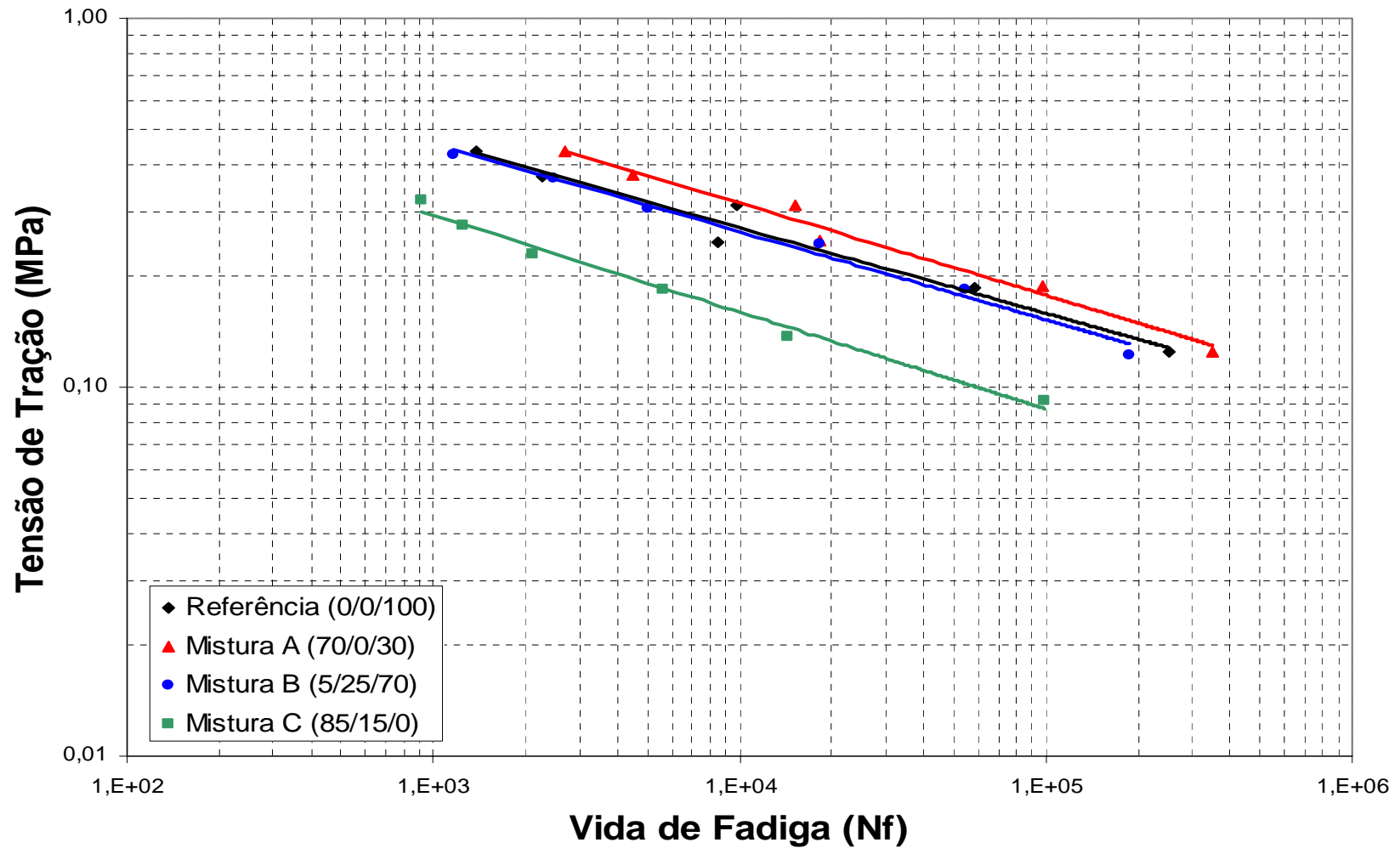


Figura 5.12: Relação entre vida de fadiga e tensão de tração das quatro misturas estudadas

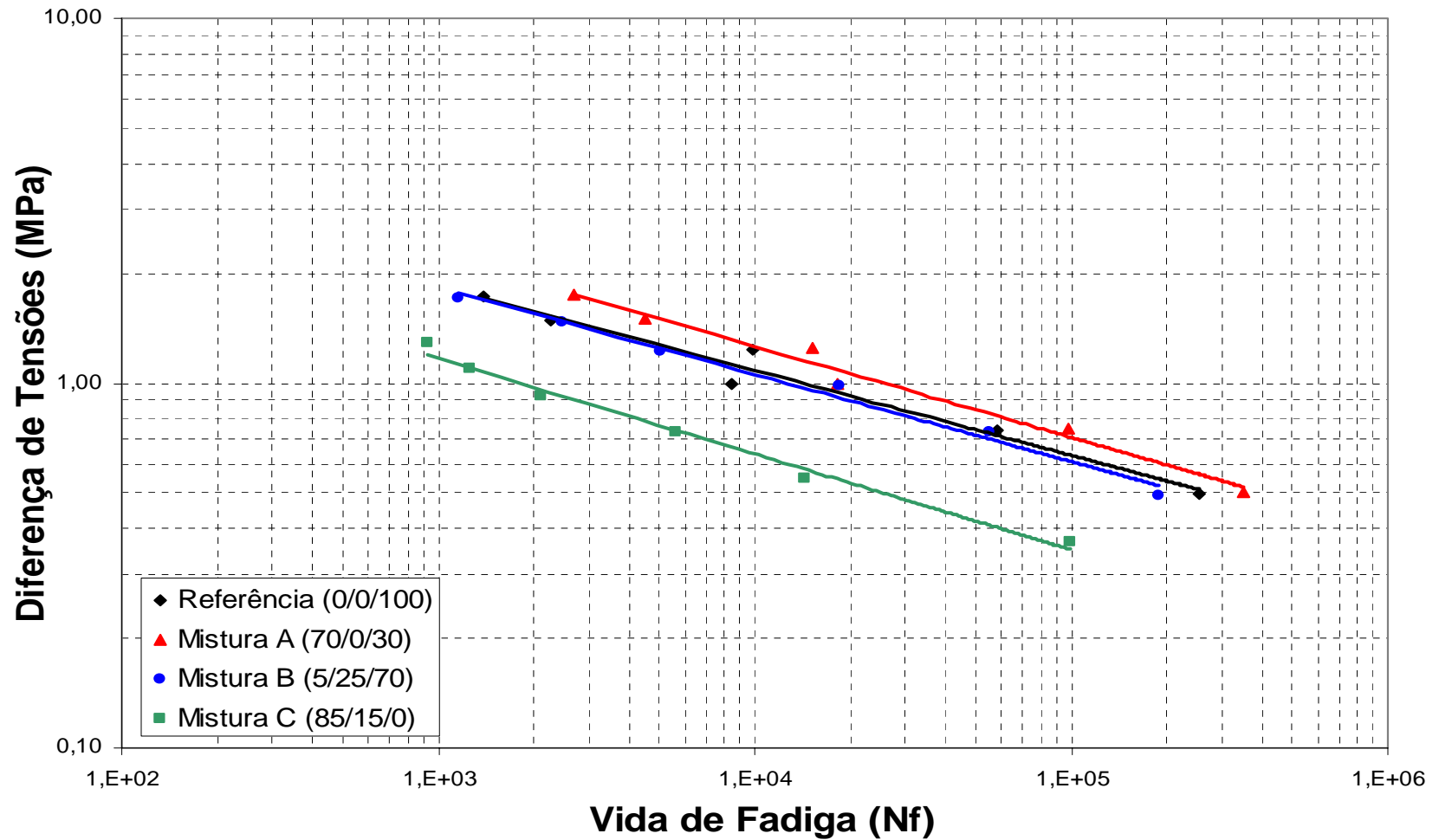


Figura 5.13: Relação entre vida de fadiga e diferença de tensões das quatro misturas estudadas.

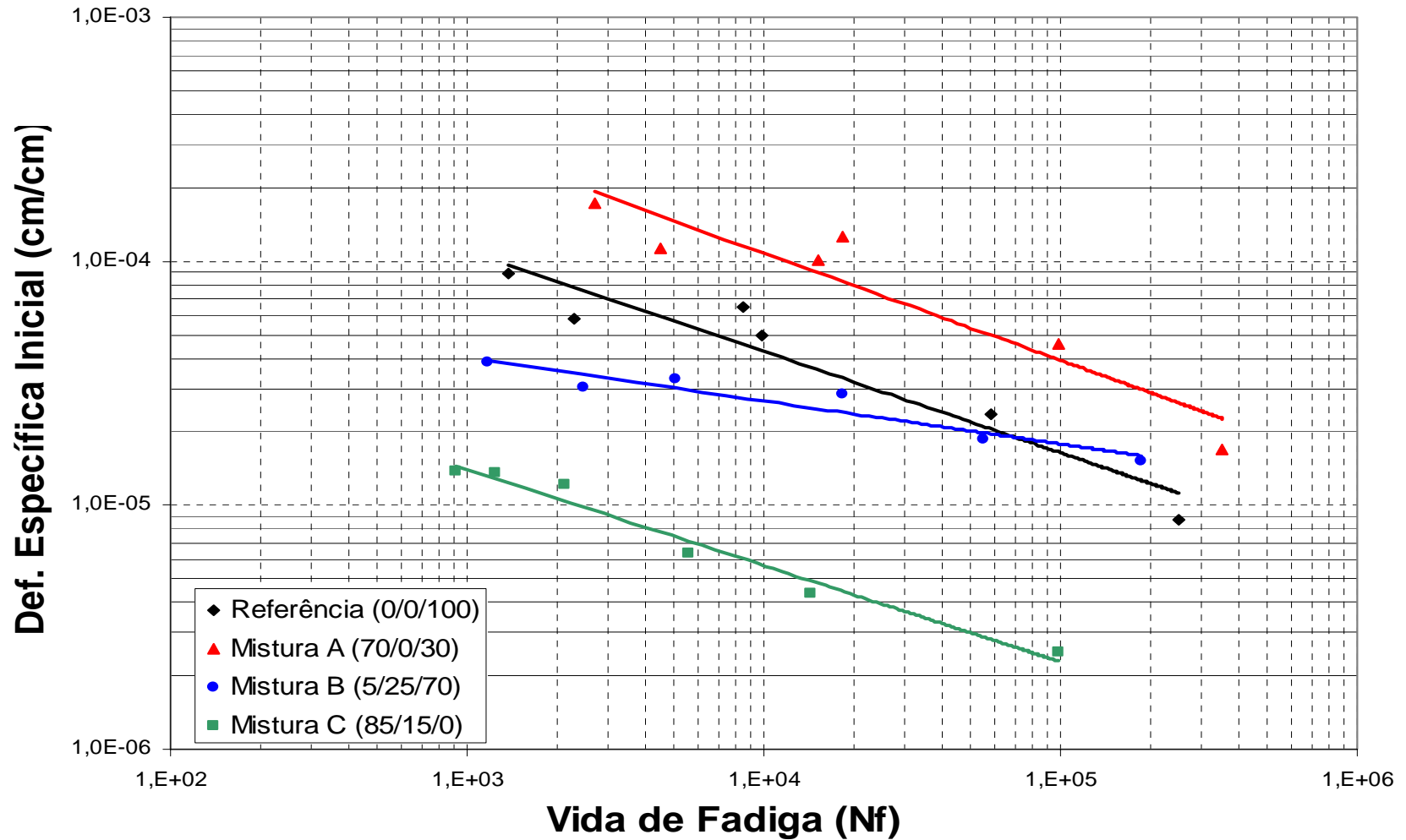


Figura 5.14: Relação entre vida de fadiga e deformação específica inicial das quatro misturas estudadas.

## 5.5 ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL SOB CARGA REPETIDA

Nas Tabelas 5.2 e 5.3 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida para as quatro misturas estudadas, onde se observa que os valores de deformação permanente medidos através do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida apresentaram pouca influência da tensão empregada no ensaio.

Tabela 5.2: Valores da deformação permanente para as misturas estudadas, obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida (T=45°C).

<i>Tensões de ensaio</i>	<i>Deformação Permanente específica (cm/cm)</i>			
	<i>Referência (0/0/100)</i>	<i>Mistura A (70/0/30)</i>	<i>Mistura B (5/25/70)</i>	<i>Mistura C (85/15/0)</i>
<i>Tensão de 0,1MPa</i>	0,0040	0,002	0,0027	0,0065
<i>Tensão de 0,4MPa</i>	0,0046	0,004	0,0030	0,0077
<i>Tensão de 0,7MPa</i>	0,0045	0,006	0,0034	0,0081

Tabela 5.3: Valores da inclinação do trecho entre 100s e 3600s, obtida do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida (T=45°C) para as quatro misturas avaliadas.

<i>Tensões de ensaio</i>	<i>Inclinação entre 100s e 3600 (mm)</i>			
	<i>Referência (0/0/100)</i>	<i>Mistura A (70/0/30)</i>	<i>Mistura B (5/25/70)</i>	<i>Mistura C (85/15/0)</i>
<i>Tensão de 0,1MPa</i>	$1,70 \times 10^{-6}$	$9,50 \times 10^{-7}$	$1,73 \times 10^{-6}$	$9,52 \times 10^{-7}$
<i>Tensão de 0,4MPa</i>	$1,49 \times 10^{-6}$	$2,38 \times 10^{-6}$	$1,35 \times 10^{-6}$	$8,12 \times 10^{-7}$
<i>Tensão de 0,7MPa</i>	$1,34 \times 10^{-6}$	$4,08 \times 10^{-6}$	$1,54 \times 10^{-6}$	$1,02 \times 10^{-6}$

A baixa magnitude dos valores encontrados no ensaio de compressão uniaxial sob carga repetida, encontram-se coerentes com os valores encontrados por Mourão (2003), o qual realizou ensaios de compressão axial dinâmico (carga de 0,1MPa) utilizando o mesmo sistema de fixação dos LVDTs utilizados nesta dissertação. Na Figura 5.15 verifica-se que a Mistura C apresentou a maior deformação plástica entre as misturas estudadas, decorrente do alto teor de ligante desta mistura. A Mistura B apresentou o menor valor de deformação permanente, com valores abaixo dos encontrados para a mistura de Referência, podendo ser observado ainda que a Mistura A apresentou a maior variação de deformação para as diferentes tensões aplicadas no ensaio. Na Figura 3.16 está apresentada a curva de deformação permanente

versus número de aplicações do carregamento obtidas para a Mistura A para a tensão de 0,1MPa (1Kgf/cm<sup>2</sup>)

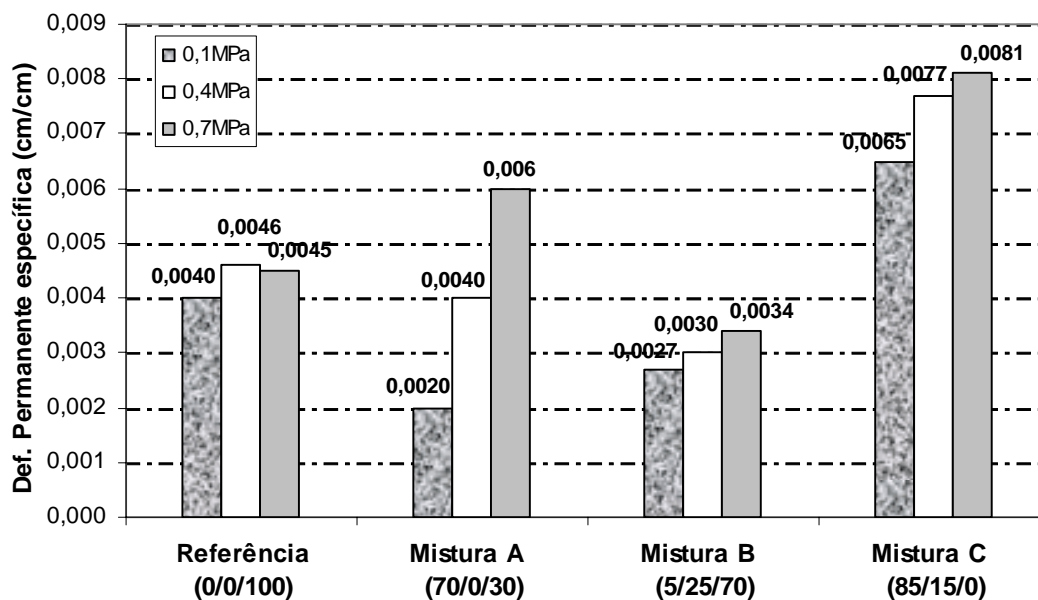


Figura 5.15: Resultados da deformação plástica (T=45°C) das quatro misturas analisadas, obtidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida.

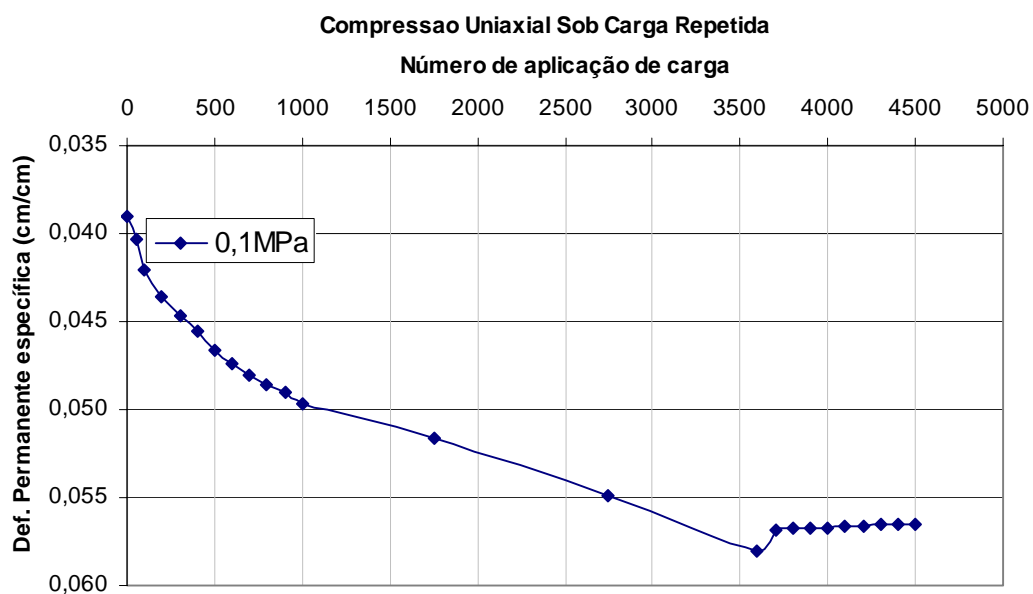


Figura 5.16: Curvas de deformação versus número de aplicações do carregamento obtidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida para Mistura A.

## 5.6 RESISTÊNCIA AO DESGASTE – Metodologia Cântabro

A seguir são apresentados os resultados obtidos no ensaio de perda de massa Cântabro, o qual visa avaliar a resistência ao desgaste de misturas asfálticas. O ensaio Cântabro foi, originalmente, concebido para avaliação de misturas abertas, porém esta técnica já foi empregada para avaliação de misturas asfálticas densas (Specht, 2004).

A Tabela 5.4 traz os resultados obtidos no ensaio de perda de massa, a média das três amostras ensaiadas para cada mistura e o desvio padrão correspondente. Na Figura 5.17 estão plotados os valores das médias, média menos desvio padrão e média mais desvio padrão dos resultados obtidos para cada uma das misturas ensaiadas.

Pode-se observar que a mistura de Referência apresentou a maior perda de massa dentre as misturas estudadas. As misturas contendo escória de aciaria apresentaram menor perda de massa que a mistura de Referência, o que está relacionado a alta resistência da escória de aciaria. A Mistura C apresentou menor perda de massa, o que pode estar relacionado ao maior teor de ligante (7,00%).

Tabela 5.4: Resultados dos ensaios de perda de massa Cântabro das misturas estudadas.

<i>Denominação</i>	<i>Perda de massa Cântabro (%)</i>				
	<i>Amostra 1</i>	<i>Amostra 2</i>	<i>Amostra 3</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>
<i>Referência (0/0/100)</i>	4,07	3,90	3,45	<b>3,80</b>	<b>0,32</b>
<i>Mistura A (70/0/30)</i>	3,16	2,42	1,79	<b>2,45</b>	<b>0,68</b>
<i>Mistura B (5/25/70)</i>	2,08	3,25	2,21	<b>2,51</b>	<b>0,64</b>
<i>Mistura C (85/15/0)</i>	1,88	2,08	2,20	<b>2,05</b>	<b>0,16</b>

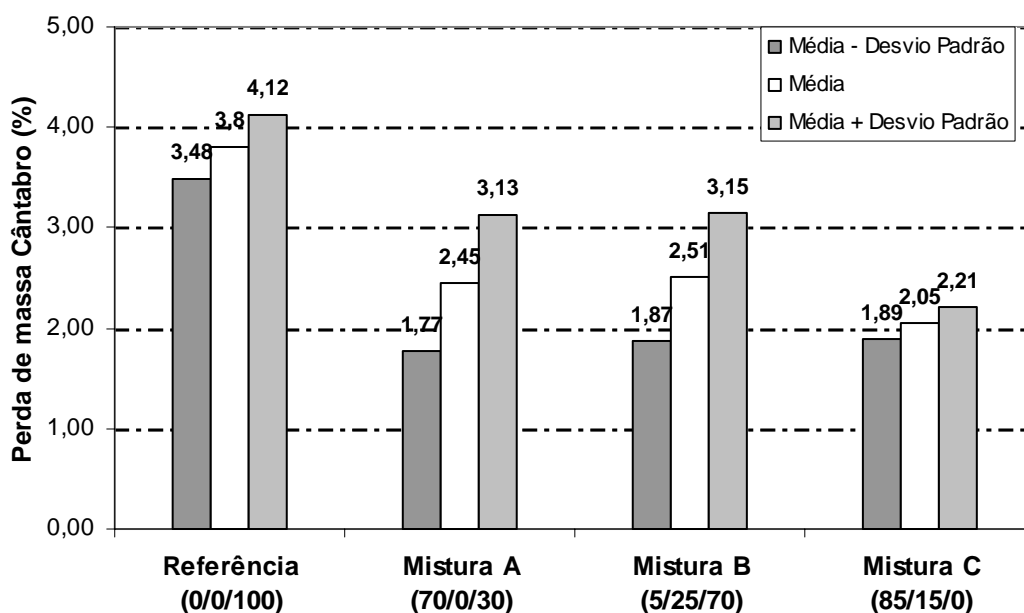


Figura 5.17: Resultados da perda de massa Cântabro das misturas analisadas

Pode-se observar que as misturas com incorporação de resíduos industriais apresentaram perda de massa inferior a mistura de Referência. Outro fato que deve ser levado em conta na análise é que nas misturas com incorporação de resíduos o teor de ligante é superior ao da mistura de Referência, o que melhora os aspectos de resistência ao desgaste da mistura.

Conforme a norma DNER – ES 386/99 o valor especificado aceitável para misturas de pré-misturado à quente é de no máximo 25% de perda de massa, valor este, bem acima do encontrado para as misturas avaliadas neste estudo.

## 5.7 ENSAIO DE ADESIVIDADE – Metodologia Lottman Modificada

A seguir são apresentados os resultados obtidos no ensaio de adesividade, realizado através da Metodologia Lottman Modificada, sendo que o valor obtido desta relação, pode ser utilizado para prever o desempenho de misturas asfálticas, face a adesividade ligante/agregado. Neste estudo, pretende-se avaliar a influência dos diferentes agregados empregados na adesividade das misturas asfálticas avaliadas.

Na Tabela 5.5 estão apresentadas as médias da resistência a tração por compressão diametral das amostras sem condicionamento ( $R_{t1}$ ) e com condicionamento ( $R_{t2}$ ), além da Resistência Retida à Tração (RRT) das quatro misturas estudadas.

Tabela 5.5: Resultados dos ensaios obtidos através da Metodologia Lottman Modificada das misturas estudadas.

Denominação	$R_{t1}$ (MPa)	$R_{t2}$ (MPa)	RRT (%) <sup>1</sup>
Referência (0/0/100)	0,83	0,65	78
Mistura A (70/0/30)	0,78	0,66	84
Mistura B (5/25/70)	0,75	0,61	81
Mistura C (85/15/0)	0,68	0,55	80

Nota: <sup>1</sup> RRT=100.( $R_{t2}/R_{t1}$ ).

A Figura 5.18 mostra os valores de resistência à tração das amostras com e sem condicionamento. Observa-se que a mistura de Referência obteve valores de resistência à tração mais elevados que as demais misturas analisadas, enquanto a Mistura C apresentou os menores valores de resistência a tração. Observa-se ainda que as diferenças entre os valores obtidos são pequenas.

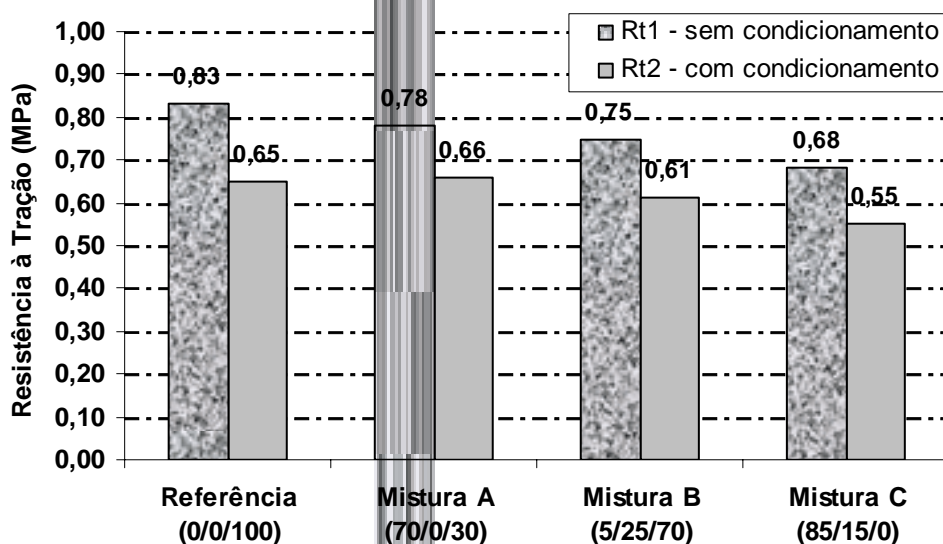


Figura 5.18: Resultados da resistência à tração das misturas estudadas.

Na Figura 5.19 estão plotados os valores de Resistência Retida à Tração obtida através da Metodologia Lottman Modificada. Pode-se verificar, que a mistura de Referência apresentou um menor valor de RRT, enquanto a Mistura A teve um ganho de resistência em relação à



mistura de Referência, sendo que este ganho está relacionado as propriedades da escória de aciaria, uma vez que esta apresenta uma textura superficial mais rugosa que os agregados convencionais. As Misturas B e C apresentaram resultado bastante semelhante, com valores de RRT superiores que aqueles encontrados para a mistura de Referência, apresentando RRT de 81% e 80% respectivamente.

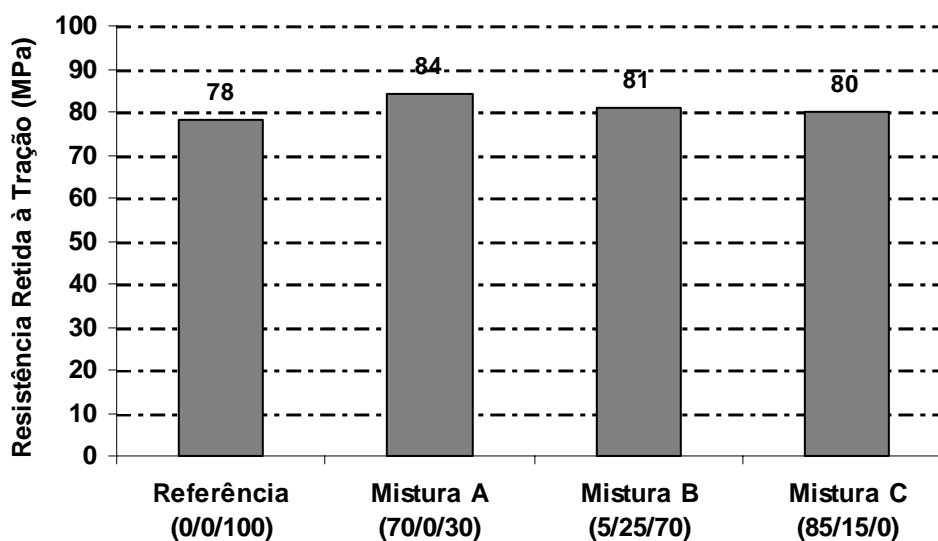


Figura 5.19: Resultados obtidos no Ensaio Lottman Modificado para as quatro misturas avaliadas.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões do estudo que visa avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas com incorporação de resíduos industriais. As conclusões são apresentadas objetivando a comparação com a mistura de Referência.

Também são feitas algumas sugestões para trabalhos futuros, buscando complementar os resultados obtidos nesta dissertação.

### 6.1 CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos nesta pesquisa permite concluir que:

- a) Os materiais empregados no estudo apresentaram granulometria adequada, as quais se enquadram nas especificações. A escória de aciaria utilizada apresentou expansibilidade inferior ao valor máximo especificado para emprego deste tipo de resíduo em concreto asfáltico.
- b) A Mistura A, composta de escória de aciaria e pó mineral, apresentou um consumo de ligante 13,6% superior a mistura de Referência e a Mistura B, composta da combinação de agregados minerais, escória de aciaria e resíduo areia de fundição, um aumento de 11,2%. A mistura C, composta de escória de aciaria e resíduo areia de fundição, apresentou o maior consumo de ligante, sendo 32,1% superior a mistura de Referência. O aumento do consumo de ligante através da incorporação da escória de aciaria já era esperado, devido à alta porosidade deste tipo de agregado.
- c) A percentagem de Vazios dos Agregados Minerais (VAM) e Relação Betume Vazios (RBV), apresentaram valores coerentes com os especificados, com exceção da Mistura C que apresentou valores elevados. Valores excessivamente altos de VAM podem reduzir a resistência ao cisalhamento e valores altos de RBV comprometem a estabilidade da mistura.

d) A dosagem Marshall de misturas asfálticas indicou que a incorporação de escória de aciaria causa aumento no consumo de ligante, aumento da massa específica e aumento da estabilidade. A incorporação de Resíduo Areia de Função (R.A.F) em combinação com a escória de aciaria elevou ainda mais o teor de ligante, além de ocasionar um aumento da fluência.

e) A adição de escória de aciaria na mistura em concreto asfáltico aumenta a estabilidade e mantém a fluência da mistura em relação à mistura de Referência, enquanto a incorporação de Resíduo Areia de Função (R.A.F) diminuiu a estabilidade da mistura e aumentou a fluência.

f) A adição de escória de aciaria na mistura em concreto asfáltico apresentou leve diminuição do módulo de resiliência, quando comparada com a mistura de Referência, sendo os resultados considerados satisfatórios. Já a mistura com adição de Resíduo Areia de Função (R.A.F) apresentou diminuição do módulo de resiliência em relação à mistura de Referência.

g) A incorporação de escória de aciaria na mistura praticamente manteve a resistência à tração obtida na mistura de Referência, e a adição de R.A.F na mistura apresentou uma elevada diminuição da resistência à tração, chegando aproximadamente setenta por cento da resistência à tração da mistura de Referência.

h) A mistura A levaria a uma mistura com uma combinação de módulo de resiliência ( $M_r$ ) e resistência à tração ( $R_t$ ) mais adequada para utilização como camada de revestimento sobre camadas granulares, pois do ponto de vista estrutural, deve haver compatibilização entre a rigidez e a resistência da mistura, uma vez que um alto módulo de resiliência deixa o material mais suscetível ao trincamento por fadiga.

i) A adição de escória de aciaria apresentou melhores propriedades mecânicas (fadiga e deformação permanente) que a mistura convencional. Quando da incorporação de R.A.F à mistura contendo escória de aciaria, houve queda no desempenho da mistura. Os ensaios de fadiga da mistura com incorporação de escória de aciaria e pó mineral apresentou maior resistência à fratura em relação à mistura de Referência.

j) Através do ensaio de fluência por compressão uniaxial sob carga repetida observou-se que os valores de deformação permanente medidos tiveram pouca influência da tensão aplicada no ensaio.

k) Quanto à avaliação da durabilidade das misturas estudadas, pode-se perceber um maior desempenho das propriedades de resistência ao desgaste e adesividade quando da adição dos resíduos industriais ao concreto asfáltico.

l) A combinação de agregado siderúrgico (escória de aciaria) e agregado mineral, mostrou-se uma alternativa tecnicamente viável.

m) Ao fim deste estudo observa-se que a incorporação de escória de aciaria em concretos asfálticos apresenta do ponto de vista das propriedades mecânicas e de durabilidade desempenho superior ao da mistura com agregados convencionais. A adição de Resíduo Areia de Fundição (R.A.F) em combinação com escória de aciaria não apresentou desempenho satisfatório neste estudo, uma vez que apresentou consumo de ligante elevado e propriedades mecânicas com desempenho inferior.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Tentar correlacionar os resultados de cada mistura com as características individuais de cada resíduo (caracterização química e física).
- b) Estudo da incorporação de diferentes percentagens de resíduos industriais em concreto asfáltico.
- c) Fixação da granulometria dos materiais no centro da faixa granulométrica empregada, diminuindo assim a influência da variação das curvas granulométricas da misturas.
- c) Avaliação da possibilidade de contaminação ambiental provocada pela incorporação de resíduos industriais em concretos asfálticos.
- d) Estudo do processo de usinagem e compactação em campo de misturas com incorporação de resíduos industriais.
- e) Utilização do simulador linear de tráfego DAER/UFRGS para avaliação do desempenho de concretos asfálticos com incorporação de resíduos industriais quanto à deformação e reflexão de trincas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage**. In: AASHTO T 283-89. 1989.

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Handbook**. Lexington, Manual Series N°4 (MS-4), 599p. 1989.

ASPHALT INSTITUTE. **Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types**. Lexington, Manual Series N°2 (MS-2), 6 ed. 141p. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Geologia de Engenharia**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. 1998. p.13-38.

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

BERTOLO, S. A. M. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus**. São Carlos, 2002. Tese de Doutorado em Engenharia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002. 197p.

BONET, I. I. **Valorização do Resíduo Areia de Fundição (R.A.F.). Incorporação nas massas asfálticas do tipo CBUQ**. Florianópolis, 2002. 131p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina.

BONIN, A. L.; ROSSINI, A. J.; ZABIM, A. F. P. **Reutilização da areia preta de fundição na construção civil**. ABIFA, 1995.

CASELATO, L. Ações institucionais da siderurgia brasileira para disseminação do uso das escórias de aciaria. In: Workshop – Gerenciamento de resíduos sólidos no setor metalúrgico. **Apresentação em PowerPoint**, Rio de Janeiro, RJ. 2004.

CASTELO BRANCO, V. T. F. **Caracterização de misturas asfálticas com uso de escória de aciaria como agregado**. Rio de Janeiro, 2004. 135p. Dissertação de Mestrado. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CAVALCANTE, V. T. F. *et al.* Caracterização Mecânica de Mistura Asfáltica com Utilização de Escória de Aciaria como Agregado. In: XVII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. **Anais...**, v.1, p. 91-104. Rio de Janeiro, RJ. 2003.

CENTRO DE ESTUDIOS DE CARRETERAS (CEC). **Propuesta de norma de ensayo – determinacion de la perdida por desgaste de mesclas bituminosas mediante el empleo de la maquina de Los Angeles (Ensayo Cântabro)**. NLT – 325/86. Madri, 1986. 3p.

CIESIELSKI, S. K.; COLLINS, R. J. Recycling and use of waste materials and byproducts in highway construction. National Cooperative Highway Research, Program Synthesis of Highway Practice 199. **Transportation Research Board**. Washington. 1994.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Concreto Asfáltico**. DAER/RS – ES-P 16/98. Porto Alegre 1998, 21p.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Determinação da perda por desgaste de misturas betuminosas de graduação aberta (Ensaio Cântabro)**. DAER/RS – EL 215/01. Porto Alegre, 2001, 3p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Adesividade de agregado à ligante betuminoso**. DNER – ME 79/94. Rio de Janeiro 1994, 2p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Adesividade de agregado graúdo a ligante betuminoso**. DNER – ME 78/94. Rio de Janeiro 1994, 2p.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Determinação do índice de lamelaridade**. DAER/RS – EL 108/01. Porto Alegre 2001, 4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**. DNER – ME 81/98. Rio de Janeiro, 1998, 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – Ensaio Cântabro**. DNER – ES 383/99. Rio de Janeiro, 1999, 2p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Escórias de Aciaria para Pavimentos Rodoviários**. DNER – ME 262/94. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral**. DNER – ME 138/94. Rio de Janeiro 1994, 2p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência**. DNER – ME 133/94. Rio de Janeiro 1994, 5p.

DE REIS, R. M. M.; FERREIRA, E. M. **Revestimento Asfáltico Ecogênico**. In: I CONGRESSO INTERAMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS. **Anais...**, Porto Alegre, RS. 12p. 2004.

EPPS, A. L. Thermal Behavior of crumb-rubber modified asphalt concrete mixtures. Berkeley, 1997. Dissertation (Doctor of Philosophy) – ITS/UCB. 391p.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Superpave binder specification**. FHWA. Washington, 2002, 115p. [www.tfhrc.gov/](http://www.tfhrc.gov/). (artigo consultado em Junho de 2002).

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL. **Diagnóstico preliminar da geração e destinação final dos resíduos industriais no estado do Rio Grande do Sul**. FEPAM, Porto Alegre, RS. 1996.

HICKS, R. G. Moisture damage in asphalt concrete. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 175, **Transportation Research Board**, Washington, 1991. 91p.

HICKS, R. G.; EPPS, J. A. **Life cycle cost analysis of asphalt-rubber paving materials**. Final report to Rubber Pavements Association. 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO SIDERURGIA – IBS. <http://www.ibs.org.br>. Rio de Janeiro, RJ. 2004. (Site consultado em maio de 2004).

KANDHAL, P. S.; HOFFMANN, G. L. Evaluation of steel slag fine aggregate in hot-mix asphalts mixtures. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., nº 1583, p.28-36, 1998.

KHAN, M.; WAHHAB, H. I. A. A. Improving slurry seal performance in eastern Saudi Arabia using steel slag. **Construction and Building Materials**, v.12, n 4, p. 195-201, 1998.

LIMA, N. P.; NASCIMENTO, J. F.; FILHO, V. P. V.; ALBERNAZ, C. A. V. Pavimentos de alto desempenho estrutural executados com escória de aciaria. In. Reunião de Pavimentação Urbana, 10º., 2000, Uberlândia. **Anais...**, Rio de Janeiro: ABPv, 2000.

MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. São Paulo, 2000. 135p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo.

MASUERO, A. B. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. Porto Alegre, 2001. 268p. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MELLO, J. C. **Transporte: Presente e Futuro**. In: ABPv – 33º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 20 a 23 de novembro de 2001, Florianópolis, **Anais...**, 2001 p. 31 – 39.

MILLER, E. **Use of waste foundry sand in hot-mix asphalt**. M.Sc. Thesis, University of Wisconsin-Madison. Wisconsin, EUA. 1998.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME **Anuário Estatístico: Setor Metalúrgico / Secretaria de Minas e Metalurgia**. Brasília, DF. SMM, 100p. 2004.

MONISMITH, C. L.; FINN, F. N.; VALLERGA, B. A. A comprehensive asphalt concrete design system. **Asphalt concrete mix design: development of more rational approaches**. Philadelphia: William Garter Jr., Ed, ASTM STP 1041. p.39-71. 1989.

MOTTA, L. M. G. *et al.* Princípios do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas. Tradução comentada, IBP – Instituto Brasileiro do Petróleo, 41p. 2000.

MOURÃO, F. A. L. **Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA**. Rio de Janeiro, 2004. 131p. Dissertação de Mestrado. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MOURÃO, S. F. *et al.* Coletânea de Normas do DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 2002, 1CD.

MUGAYAR, A. N. **Avaliação dos efeitos do tipo de asfalto e da distribuição granulométrica do agregado nas fluências estática e dinâmica de misturas asfálticas densas**. São Carlos, 2004. 118p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

NÓBREGA, L. M. *et al.* Uso da escória como agregado em misturas asfálticas tipo CBUQ. In: XVIII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. **Anais...**, v.1, p. 22-25. Florianópolis, SC. 2004.

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

OGURTSOVA, J.; BIRMAN S.; COELHO V. **Concreto Asfáltico**. DER Paraná, Curitiba, PR. 2º ed. 1999, 151p.

PINTO, S. **Materiais Pétreos e Concreto Asfáltico: Conceituação e Dosagem**. Departamento de Engenharia de Fortificação – IME Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 81p. 1998.

PINTO, S; PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária – Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro, Copiarte, 2º edição, 259p. 2002.

PTM/130 – Pennsylvania Testing Method, 1978. **Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria**. Adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG). Minas Gerais, 1982.

ROHDE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – Estudo laboratorial**. Porto Alegre, 2002. 94p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. Volume 2, Ed. Pini, São Paulo, 2001.

SILVA, E. A.; MENDONÇA, R. L.; DOBELE, C. H. M. Utilização da escória de aciaria em todas as camadas do pavimento. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP. In: **Anais...**, 16º Encontro do Asfalto. Rio de Janeiro. 2002.

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

SPECHT, L. P.; CERATTI, J.A.P; PALUDO, I. Estudo laboratorial da adesividade e do desgaste de misturas asfálticas com borracha. In: – XVI CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. **Anais...** v. 1. 2002. p. 195 – 206.

SPECHT, L. P.; CERATTI, J.A.P. Estudo laboratorial da viscosidade rotacional de asfalto-borracha. In: – XVII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. **Anais...** v. 1. 2003. p. 41 – 53.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. Porto Alegre, 2004. 278p. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

STEFENON, F. **Incorporação de resíduos industriais em concreto betuminoso usado à quente**. Porto Alegre, 2003. 101p. Dissertação de Mestrado – Modalidade Profissionalizante. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.