



AVALIAÇÃO LABORATORIAL DE MISTURA ASFÁLTICA DO TIPO SMA COM  
AGREGADO SIDERÚRGICO

Diogo Santos Tavares

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Rio de Janeiro  
Março de 2012

AVALIAÇÃO LABORATORIAL DE MISTURA ASFÁLTICA DO TIPO SMA COM  
AGREGADO SIDERÚRGICO

Diogo Santos Tavares

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

---

Prof<sup>ª</sup>. Laura Maria Goretti da Motta, D.Sc.

---

Prof. Jacques de Medina, L.D.

---

Dr<sup>ª</sup>. Sandra Oda, D.Sc..

---

Dr<sup>ª</sup>. Prepredigna Delmiro Elga Almeida da Silva, D.Sc.

---

Prof<sup>ª</sup>. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2012

Tavares, Diogo Santos

Avaliação Laboratorial de Mistura Asfáltica do Tipo SMA com Agregado Siderúrgico / Diogo Santos Tavares.

- Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XIX, 138 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Dissertação (mestrado) - UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 124-135.

1. Misturas Asfálticas. 2. SMA (*Stone Matrix Asphalt*). 3. Agregado Siderúrgico. I. Motta, Laura Maria Goretti. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, nosso pai, por ter me dado saúde, paz, perseverança e alegria para que eu pudesse alcançar meus objetivos e concretizar mais uma etapa.

À minha mãe, Edinalva, que entendendo ou não me apoiou todos os dias desta jornada com carinho, tolerância e abnegação. Agradeço o exemplo de humildade, fé, paciência, alegria, honestidade e coragem.

Aos meus irmãos (Juan, Júnior e Taísa), a minha namorada Monique e aos meus familiares (tios, primos e avó), que são minha base, pela compreensão e por sempre estarem torcendo e vibrando com minhas conquistas.

À minha orientadora e professora Laura Maria Goretti da Motta por toda orientação, atenção, tempo, simpatia, ensinamentos e pela oportunidade concedida, permitindo a continuidade do meu desenvolvimento acadêmico.

À pesquisadora Sandra Oda pela orientação, ensinamentos, paciência e compreensão nos momentos que não fiz o que deveria ser feito e por, principalmente, ter se mostrado amiga além de também orientadora.

Ao engenheiro do CENPES/PETROBRAS, Marcos Chacur, pelas sugestões e por ter permitido a realização de ensaios no laboratório do CENPES.

Aos técnicos do CENPES/PETROBRAS, Ulisses Santos Figueiredo, Sérgio Murilo Nunes Rocha e Vlander Luiz Júnior, pela ajuda nos momentos de desespero, realização dos ensaios e pela amizade.

Aos engenheiros Ilonir Antonio Tonial e Alexander Marcos Vivoni e ao técnico Ruy Menezes da PETROBRAS DISTRIBUIDORA, pela realização de ensaio no Laboratório da empresa.

Ao engenheiro da HARSCO METALS, Fernando Machado Ramos, pelo fornecimento dos agregados e pelo acompanhamento deste trabalho.

Ao engenheiro da Petrobras Distribuidora, Guilherme Edel, pelo fornecimento dos ligantes.

Aos integrantes do Laboratório de Pavimentação da COPPE/UFRJ: Washington Rafael, Rodrigo Souza, Leandro Pereira, Thiago Santos, Allan Moreno, Jaelson Budny, Vera Lúcia, Cristina, Mieka, Thaís Sampaio, Ana Souza, Thiago Aragão, Marcos Bororó e João Batista, pois, sem a ajuda, amizade e companheirismo, esse trabalho não teria sido tão bom de ser feito e quem sabe ter sido finalizado.

Ao engenheiro Leonardo Cavalcante da Prefeitura do Rio de Janeiro pela amizade e disponibilidade.

Ao CNPq e a COPPETEC, pelo apoio financeiro que foi fundamental para a realização deste trabalho.

Aos meus colegas de mestrado que compartilharam comigo as angústias e alegrias desta fase: André Freitas, Alessandra Conde, Diego Arthur, Erisvaldo Lima, Felipe Rosa, Flávia Carvalho, Itamar, Marcelus, Jorge Henrique, Lúcio Flávio, Katiane e Vinícius Lorenzi.

À banca examinadora, por terem aceitado o convite para avaliação e julgamento deste trabalho.

A todos aqueles que de certa forma contribuíram para a construção deste trabalho.

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

## AVALIAÇÃO LABORATORIAL DE MISTURA ASFÁLTICA DO TIPO SMA COM AGREGADO SIDERÚRGICO

Diogo Santos Tavares

Março/2012

Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Programa: Engenharia Civil

A busca por materiais alternativos para uso em pavimentação vem de longa data, visando ajudar a resolver o problema ambiental e também baratear as obras. A escória de aciaria como agregado para pavimentação é um destes materiais. Este trabalho discute fatores que influenciam na determinação da proporção adequada tecnicamente para o uso de agregado siderúrgico em misturas asfálticas. Aplicam-se os princípios da dosagem Superpave na composição de misturas asfálticas com uma amostra de agregado siderúrgico, proveniente de processo de fabricação de aço do tipo a oxigênio, tratado posteriormente por processos de redução da expansão e por britagem. Foi realizada a caracterização física e mecânica da escória, nas suas várias frações, visando analisar suas propriedades para utilização como agregado para pavimentação. Com isto, definiu-se a necessidade de compor a granulometria do esqueleto mineral com uso de finos de agregado natural. Foi utilizado o método Bailey para avaliação do esqueleto pétreo. Foram dosadas duas misturas do tipo SMA (*Stone Matrix Asphalt*), com dois ligantes asfálticos (CAP 30/45 e asfalto-borracha), avaliadas por ensaios mecânicos de: módulo de resiliência, resistência à tração, *flow number*, deformação permanente e fadiga. Os resultados permitem concluir que os agregados siderúrgicos avaliados são adequados para este tipo de mistura asfáltica.

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

LABORATORY EVALUATION OF SMA ASPHALT MIXTURE WITH AGGREGATES  
OF STEEL SLAG AGGREGATES

Diogo Santos Tavares

March/2012

Advisor: Laura Maria Goretti da Motta

Department: Civil Engineering

The search for alternative materials for use in pavements has long, to help solve the environmental problem and also cheapen the works. The steel slag as aggregate for paving is one of these materials. This paper discusses factors that influence in the determination of appropriate steel slag proportion design methodology for to be used in asphalt mixtures. Apply the principles of Superpave design methodology for asphalt mixtures with a slag steel aggregates, from the manufacturing process of the oxygen type steel, also treated by the process of reduction of expansion and by crushing. Was performed the physics and mechanic characterization of steel slag, in its various fractions, with the objective of analyze its properties for utilization as an aggregate for asphalt pavements. With this, emerged the need of compose the gradation of mineral skeleton with use of fine of natural aggregates. Was used Bailey Method to evaluation of stone skeleton. Were measured two mixtures of SMA type, with two binders (CAP 30/45 and binder rubber), evaluated by mechanic tests of: resilient modulus, indirect tensile strength, flow number, dynamic creep and fatigue life. The results allow conclude that the steel slag aggregate evaluated are adequate to be used in this type of mixtures.

# SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - JUSTIFICATIVA .....	4
1.2 - OBJETIVO .....	5
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 - AÇO.....	7
2.2 - ESCÓRIA DE ACIARIA .....	9
2.3 - ESCÓRIA DE ACIARIA LD.....	12
2.4 - EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA .....	18
2.5 - PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA .....	21
2.6 - SMA ( <i>Stone Matrix Asphalt</i> ).....	23
2.7 - USO DE ESCÓRIA DE ACIARIA EM OBRAS RODOVIÁRIAS.....	31
3 - MATERIAIS, MÉTODOS E DOSAGEM .....	44
3.1 - AGREGADO SIDERÚRGICO.....	45
3.1.1 - Análise do pH .....	49
3.1.2 - Análise Granulométrica .....	52
3.1.3 - Massa Específica, Densidade e Absorção.....	55
3.1.4 - Resistência Mecânica - “Los Angeles”.....	58
3.1.5 - Expansão - PTM 130 .....	59
3.1.6 - Composição da Mistura de Agregados .....	62
3.1.7 - Análise do Intertravamento pelo Método Bailey .....	65
3.2 - Ligantes .....	72
3.3 - Misturas Asfálticas .....	73
3.4 - Dosagem das Misturas.....	75
3.4.1 - Dosagem Mistura 01 .....	79

3.4.2 - Dosagem Mistura 02 .....	82
4 - ENSAIOS MECÂNICOS E DE AVALIAÇÃO COMPLEMENTAR - DESCRIÇÃO SUCINTA.....	86
4.1 - Ensaio de Escorrimento de Misturas Não Compactadas .....	87
4.2 - Módulo de Resiliência .....	89
4.3 - Resistência à Tração Indireta.....	92
4.4 - Dano por Umidade Induzida .....	93
4.5 - Fadiga .....	95
4.6 - Deformação Permanente .....	96
4.6.1 - <i>Flow Number</i> .....	97
4.6.2 - Simulador de Tráfego LCPC .....	99
4.6.3 - Simulador de Tráfego APA .....	101
5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	104
5.1 - Módulo de Resiliência .....	104
5.2 - Resistência à Tração Indireta.....	106
5.3 - Dano por Umidade Induzida .....	109
5.4 - Fadiga .....	109
5.5 - Deformação Permanente .....	115
5.5.1 - <i>Flow Number</i> .....	115
5.5.2 - Simulador de Tráfego LCPC .....	117
5.5.3 - Simulador de Tráfego APA .....	118
6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS.....	121
6.1 - Conclusões.....	121
6.2 - Sugestões .....	123
ANEXO I.....	136

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema simplificado de produção de aço (IBS, 2011) .....	8
Figura 2: Exemplos de agregados de escória de aciaria de forno elétrico (EAF) e básico a oxigênio (LD). .....	12
Figura 3: Esquema do conversor à oxigênio (SOUSA, 2007).....	12
Figura 4: Sequência de operação de um conversor à oxigênio (SOUSA, 2007).....	14
Figura 5: Exemplo de basculamento e de resfriamento da escória siderúrgica (SOUSA, 2007).....	14
Figura 6: Classificação e separação magnética da escória e partes metálicas (SOUSA, 2007).....	15
Figura 7: Aplicações da escória de aciaria (IBS, 2004). .....	16
Figura 8: Blocos produzidos com escória de aciaria (CESAR, 2008).....	17
Figura 9: Seção transversal típica de um pavimento asfáltico .....	22
Figura 10: Corpo de prova da estrutura de um pavimento asfáltico com SMA de uma rodovia alemã (Bernucci et al., 2008). .....	24
Figura 11: Visão da textura de um revestimento asfáltico com SMA (www.der.pr.gov.br/arquivos - consulta 23/2/2011). .....	26
Figura 12: Corpo de prova de uma mistura de SMA, com a superfície serrada à meia altura (CP de uma mistura asfáltica com agregado siderúrgico desta pesquisa). .....	26
Figura 13: Escorrimento de ligante ocorrido durante a compactação da massa asfáltica devido a seu alto teor (SILVA, 2005). .....	27
Figura 14: Efeito do borrifo de água (spray) em local sem SMA. ....	28
Figura 15: Drenabilidade de um revestimento com mistura do tipo SMA versus revestimento asfáltico comum (MCDANIEL et al., 2004). .....	29

Figura 16: Uso de escória de aciaria em sub-base na Venezuela (RODRÍGUEZ e PAREJO, 2010). .....	34
Figura 17: Aplicação de escória de aciaria como revestimento primário no município de Viana/ES (www.kaeme.eng.br - consulta: 8/2/2011). .....	34
Figura 18: Utilização da escória como agregado rodoviário (www.jornalvaledoaco.com.br - consulta: 8/2/2011). .....	35
Figura 19: Exemplo de danos ao pavimento com escória expansiva (pé de galinha) (JONES, 2006). .....	42
Figura 20: Exemplos de grandes deformações e trincamentos longitudinais em revestimento com escória expansiva (RODRIGUES, 2007). .....	43
Figura 21: Fluxograma da avaliação das características dos agregados deste estudo. ....	45
Figura 22: Estocagem do agregado siderúrgico no pátio da Harsco Metals em Volta Redonda, RJ, em março de 2011. ....	46
Figura 23: Agregados siderúrgicos enviados à COPPE em março de 2011, no estacionamento do Laboratório de Geotecnia (na pilha o graúdo, nos tambores o miúdo). .....	46
Figura 24: Agregado siderúrgico graúdo utilizado neste estudo. ....	47
Figura 25: Aspecto dos grãos graúdos de agregados siderúrgicos ingleses (JONES, 2006). .....	47
Figura 26: Quarteamento do material agregado siderúrgico deste estudo. ....	48
Figura 27: Comparação do preço do m <sup>3</sup> do agregado siderúrgico e da brita pela distância de transporte neste estudo. ....	49
Figura 28: pHmetro da COPPE usado no presente estudo. ....	50
Figura 29: Curva granulométrica do agregado siderúrgico deste estudo. ....	54
Figura 30: Curva granulométrica do pó de brita usado no presente estudo. ....	54
Figura 31: Ensaio de densidade da escória. Atenção para as bolhas formadas com a liberação de substância esbranquiçada. ....	57

Figura 32: Etapas do ensaio de Densidade do agregado miúdo - definição do ponto de superfície saturada e seca. ....	57
Figura 33: Passos do ensaio de abrasão Los Angeles.....	59
Figura 34: Recipientes contendo os CPs dentro da estufa no ensaio de expansão.....	61
Figura 35: Gráfico da expansão acumulada ao longo do tempo.....	62
Figura 36: Curva granulométrica da mistura SMA de escória + pó de escória e limites da faixa 19,0 mm da AASHTO. ....	63
Figura 37: Curva granulométrica da mistura SMA de escória + pó de brita e limites da faixa 19,0 mm da AASHTO. ....	64
Figura 38: Curva granulométrica final com agregado siderúrgico, pó de brita e finos do pó de brita selecionada para preparação das misturas asfálticas deste estudo.....	70
Figura 39: Misturador francês usado para produzir as misturas em batelada. ....	74
Figura 40: Compactador giratório utilizado neste estudo.....	75
Figura 41: Exemplo de mistura solta preparada para o ensaio Rice.....	76
Figura 42: Mistura asfáltica dentro do kitasato na mesa agitadora do ensaio Rice.....	77
Figura 43: Pesagem dos corpos de prova, seco e imerso, para obtenção da massa específica aparente.....	78
Figura 44: Exemplos de CPs da M01 moldados para a dosagem ( $\phi = 15\text{cm}$ ).....	79
Figura 45: Gráfico teor de ligante versus Volume de vazios - M01.....	81
Figura 46: Agregados não recobertos com 6% de ligante - M01. ....	82
Figura 47: Gráfico teor de ligante versus Volume de vazios - M02.....	84
Figura 48: Cesta de arame sobre o recipiente para o ensaio de escorrimento. ....	88
Figura 49: Conjunto do ensaio de escorrimento na estufa. ....	88
Figura 50: Resultado do ensaio de escorrimento da M01 deste estudo.....	89
Figura 51: Exemplo de corpo de prova, $\phi 100\text{ mm}$ , usado nos ensaios de MR. ....	91
Figura 52: Visão geral e detalhe do equipamento e amostra do ensaio de MR.....	91

Figura 53: Vista geral e detalhe do equipamento do ensaio de RT. ....	93
Figura 54: Etapas do ensaio de dano por umidade induzida. ....	95
Figura 55: Afundamento de Trilha de Roda (NASCIMENTO, 2008). ....	97
Figura 56: Gráfico Flow Number (WITCZAK et al., 2002). ....	98
Figura 57: Corpos de prova para ensaio FN. ....	98
Figura 58: Equipamento para ensaio de deformação permanente - simulador de tráfego LCPC. ....	99
Figura 59: Placas de SMA com agregado siderúrgico deste estudo. ....	100
Figura 60: Mesa compactadora usada na fabricação das placas para o ensaio no simulador LCPC. ....	100
Figura 61: Corpos de prova após o ensaio de APA (A) M02 (B) M01. ....	102
Figura 62: Equipamento APA da Petrobras Distribuidora usado no presente estudo. ....	103
Figura 63: Detalhe de dois corpos de prova deste estudo sendo ensaiado no APA. ....	103
Figura 64: Resultado do MR médio (três amostras) das Misturas 01 e 02 deste estudo. ....	105
Figura 65: Resultados médios de RT das Misturas 01 e 02 deste estudo. ....	108
Figura 66: Detalhe da penetração do ligante CAP 30/45 num agregado siderúrgico deste estudo. ....	108
Figura 67: Vida de fadiga versus diferença de tensões das misturas M01 e M02 deste estudo. ....	110
Figura 68: Vida de fadiga versus deformação específica resiliente das misturas M01 e M02 deste estudo. ....	110
Figura 69: Tela do programa SISPAV - Critério de fadiga para dimensionamento de pavimento para a mistura M01. ....	113
Figura 70: Tela do programa SISPAV - Estrutura analisada no dimensionamento de pavimento para a mistura M01. ....	113
Figura 71: Tela do programa SISPAV - Critério de fadiga para dimensionamento de pavimento para a mistura M02. ....	114

Figura 72: Tela do programa SISPAV - Estrutura analisada no dimensionamento de pavimento para a mistura M02. ....	114
Figura 73: Ciclos médios de FN para as misturas deste estudo. ....	116
Figura 74: Deformação final da placa da M01 deste estudo no simulador LCPC. ....	117
Figura 75: Deformação final da placa da M02 deste estudo no simulador LCPC. ....	118
Figura 76: Gráfico de deformação do APA para as amostras de M01 e M02 deste estudo.....	120

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição típica da escória pelo processo LD (IBS, 1998).....	10
Tabela 2: Produção brasileira de aço por processo (IABR, 2012).....	10
Tabela 3: Composição química típica do gusa (SOUSA, 2007).....	13
Tabela 4: Transformações nos principais elementos químicos (NASCIMENTO e LANGE, 2005).....	19
Tabela 5: Parâmetros que influenciam a expansão das escórias (MACHADO, 2000).....	19
Tabela 6: Camadas do pavimento (SENÇO, 1997 e RODRIGUES, 2007).....	23
Tabela 7: Conceitos obtidos nas avaliações da superfície do revestimento em SMA realizadas na construção do trecho e meses após (SILVA, 2005).....	30
Tabela 8: Comparação entre escória de aciaria e agregados naturais (GEISELER, 1996).....	32
Tabela 9: Características típicas das escórias de aciaria LD (CASTELO BRANCO, 2004).....	33
Tabela 10: Granulometria do agregado siderúrgico deste estudo.....	53
Tabela 11: Granulometria do pó de brita usado no presente estudo.....	53
Tabela 12: Resultados de densidade e de absorção dos materiais deste estudo.....	58
Tabela 13: Resultados do ensaio de expansibilidade dos três corpos de prova do agregado siderúrgico deste estudo.....	61
Tabela 14: Composição granulométrica da mistura do tipo SMA com escória e pó de escória.....	63
Tabela 15: Composição granulométrica da mistura do tipo SMA com escória e pó de brita.....	64
Tabela 16: Granulometria para determinação das peneiras de controle do método Bailey.....	66

Tabela 17: Proporções Bailey para a granulometria inicial deste estudo.....	67
Tabela 18: Valores limites e calculados das proporções de agregados da mistura do tipo SMA (VAVRIK et al., 2002). .....	67
Tabela 19: Curva granulométrica corrigida da mistura do tipo SMA com agregado siderúrgico e pó de brita. ....	68
Tabela 20: Proporções Bailey corrigidas para a nova granulometria deste estudo.....	68
Tabela 21: Valores limites e calculados corrigidos de agregados da Mistura do tipo SMA.....	69
Tabela 22: Curva granulométrica final da mistura do tipo SMA com agregado siderúrgico, pó de pedra e finos do pó de brita. ....	69
Tabela 23: Vazios da fração graúda do agregado em estado solto e compactado. ....	71
Tabela 24: Características do CAP 30/45 usado neste estudo.....	72
Tabela 25: Características do CAPFLEX-B usado neste estudo.....	73
Tabela 26: Quantidade de materiais para moldar os CPs, em função do teor de ligante - M01.....	79
Tabela 27: Teor de ligante versus Gmm para M01.....	80
Tabela 28: Teor de ligante, Volume de vazios e Vazios do Agregado Mineral - M01.....	81
Tabela 29: Quantidade de materiais para moldar os CPs de $\phi = 15\text{cm}$ , em função do teor de ligante - M02. ....	83
Tabela 30: Teor de ligante e Gmm - M02.....	83
Tabela 31: Teor de ligante, Volume de vazios e Vazios do Agregado Mineral - M02.....	84
Tabela 32: Resultado do ensaio de escoamento Mistura 01.....	89
Tabela 33: Resultados do MR deste estudo. ....	105
Tabela 34: Valores de MR de SMA com agregados minerais britados e com escória de aciaria.....	106
Tabela 35: Resultados de resistência à tração das misturas M01 e M02 deste estudo.....	107

Tabela 36: Resultados de resistência à tração deste estudo e de outros autores. ....	107
Tabela 37: Resultado de RT - ensaio de dano por umidade induzida. ....	109
Tabela 38: Parâmetros obtidos das curvas de fadiga deste estudo.....	111
Tabela 39: Ciclos de FN. ....	116
Tabela 40: Resultado do APA para a M01.....	119
Tabela 41: Resultado do APA para a M02.....	119

## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

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

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AG - Proporção de Agregado Graúdo

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo

CENPES - Centro de Pesquisa Petrobras

CP - Corpo de Prova

cP - *Centipoise*

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EUA - Estados Unidos da América

FAF - Proporção Fina dos Agregados Finos

fcl = Fator Campo Laboratório

FHWA - *Federal Highway Administration*

FN - *Flow Number*

GAF - Proporção Graúda dos Agregados Finos

$G_{mb}$  - Densidade aparente da mistura

$G_{mm}$  - Densidade máxima da mistura

$K_1$  - Coeficiente de Regressão

$K_2$  - Coeficiente de Regressão

$K_3$  - Coeficiente de Regressão;

$M_R$  - Módulo de Resiliência

N - Vida de Fadiga

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

PCP - Peneira de Controle Primário

PCS - Peneira de Controle Secundário

PCT - Peneira de Controle Terciário

PM - Peneira Média

REDUC - Refinaria de Duque de Caxias

$RR_T$  - Resistência Retida à Tração

$R_T$  - Resistência à Tração por compressão diametral

SHRP- *Strategic Highway Research Program*

SisPav - Programa de dimensionamento de pavimentos desenvolvido por FRANCO, 2007

SMA - *Stone Matrix Asphalt*

SUPERPAVE - *Superior Performing Asphalt Pavements*

TC - Tensão Controlada

TMN - Tamanho Máximo Nominal dos agregados

VAM - Vazios do Agregado Mineral

$V_v$  - Volume de Vazios

$\Delta$  - Deformação elástica ou resiliente

## 1 - INTRODUÇÃO

Com o aumento constante da demanda por matérias-primas para a construção civil, impulsionada pelo crescimento populacional, e conseqüentemente a geração de um enorme volume de resíduos, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de minimizar a extração de recursos naturais e maximizar o uso de resíduos. A construção de estradas tem um potencial alto para o consumo de resíduos, já que em pavimentação em apenas 1 km de via de 10 m de largura emprega-se entre 2.000 t a 3.250 t de agregados (VALVERDE, 2001).

Os agregados de diversas fontes são constituintes dos pavimentos em várias camadas. Estes têm, em geral, função de contribuir na estabilidade mecânica, suportando as tensões impostas na superfície e no interior do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Para a construção de um pavimento é necessário elevado volume de materiais, sendo grande parte composta por agregados. Citando a publicação do DNPM de 2006, Tavares *et al.* (2011) indicam que no ano de 2005 foram explorados cerca de 3.130.000 m<sup>3</sup> de rochas britadas e cascalho, no valor aproximado de 1,72 bilhões de reais. Deste total, os principais usos foram: Construção Civil (59,16%), Construção/Manutenção de Estradas (9,11%), Pavimentação Asfáltica (3,70%), Artefatos de Cimento (3,37%), Siderurgia (1,85%), Comércio de Materiais de Construção (1,22%), Aterro (0,64%), Cal (0,48%), Lastro de Ferrovia (0,39%). Assim, é muito evidente que o emprego de resíduos na pavimentação se mostre, cada vez mais, uma aplicação interessante e racional.

Para diminuir este consumo, alguns resíduos podem ser reutilizados, reprocessados ou reciclados para constituírem material para a construção civil e, particularmente, para a construção de pavimentos.

No relatório da *Recycled Materials Resource Center* (RMRC, 2008), está apresentado um balanço bastante detalhado dos vários resíduos que podem e estão sendo usados em pavimentação. O texto citado abrange o uso de materiais alternativos em seis aplicações principais de construção de rodovias: concreto asfáltico, concreto de cimento portland, base granular, aterros compactados, base ou sub-base estabilizada e aterros hidráulicos. Em cada uma dessas categorias de aplicação primária, há pelo menos um material possível e, em alguns casos, várias possibilidades de utilização. Este documento inclui diretrizes para 19

subprodutos de materiais diversos. Como exemplos de uso de alguns subprodutos ou resíduos em concreto asfáltico, RMRC (2008) lista os seguintes: escória de alto forno, escória de aciaria, cinza de fundo de carvão, cinzas volantes de carvão, areia de fundição, pós de fornos, resíduos de processamentos de minerais, escórias não ferrosas, revestimentos fresados, pneus inservíveis, lamas de cinzas e resíduos de vidro. Para uso em base ou sub-base estabilizada são listados onze subprodutos: escória de alto forno, escória de aciaria, cinza de fundo de carvão, cinzas volantes de carvão, areia de fundição, resíduos de processamentos de minerais, escórias não - ferrosas, revestimentos fresados, resíduos de sulfatos, concreto de cimento portland e Resíduos de Construção e Demolição (RCD).

No contexto desta dissertação, será dada ênfase à utilização das escórias siderúrgicas, sendo este um resíduo bastante abundante no Brasil tendo em vista a grande produção de aço nacional.

A fronteira entre o ferro e o aço foi definida na Revolução Industrial com a invenção de fornos que permitiam corrigir as impurezas do ferro, e também adicionar propriedades como resistência ao desgaste, ao impacto, à corrosão etc. Por causa dessas propriedades e do seu baixo custo, o aço passou a representar cerca de 90% de todos os metais consumidos pela civilização industrial. Durante a fabricação do aço, no entanto, são gerados diversos tipos de resíduos, dentre os quais um que se separa do aço líquido pela diferença de peso específico, que é conhecido como escória de aciaria (NASCIMENTO e LANGE, 2005).

Produzir mais aço com menos insumos e matérias-primas é prioridade das empresas brasileiras produtoras de aço. Os programas de conservação de energia, de recirculação de águas e de reciclagem do aço e co-produtos têm aumentado a eco-eficiência do setor.

Diante da escassez de recursos financeiros para aplicação nos mais diversos setores econômicos e da necessidade de proteção ambiental, torna-se cada vez mais viável o uso de técnicas e materiais alternativos. A escória de aciaria, um dos subprodutos da produção do aço, é um resíduo que já vem sendo utilizado de várias formas na engenharia, desde a utilização na construção de quebra-mares até na infra e superestrutura rodoviária (CASTELO BRANCO, 2004).

A produção brasileira de aço bruto estimado pelo Instituto Aço Brasil para 2010 foi de 33,1 milhões de toneladas. Considerando que cada tonelada de aço gera de 120 a 160 kg de escória de aciaria, e adotando a média de 140 kg de escória, tem-se que no Brasil foram

produzidas aproximadamente 4,6 milhões de toneladas deste subproduto no referido ano. Essa escória é depositada nos pátios das usinas gerando, assim, alto custo com a armazenagem, já que são necessárias amplas áreas para este fim (IBS, 2011).

Estudos realizados em diversos países mostram que há a possibilidade de reutilização da escória, antes considerada um resíduo, em várias atividades da engenharia civil: construção civil, pavimentação, ferrovia, fabricação de cimento e concreto, etc. (CASTELO BRANCO, 2004). Dentre os benefícios do uso da escória, pode-se destacar a sustentabilidade, a menor agressão ao meio ambiente e a economia. Pode-se citar como exemplo a aplicação de co-produtos derivados da escória em:

- Agregado de aciaria - frações mais finas: contenção de encostas, produção de cimentos e concretos;
- Agregado de aciaria - britas e frações mais grossas: lastro ferroviário, pátio de estacionamento, recuperação de vias em geral, construção de base e sub-base de rodovias e produção de mistura asfáltica;
- Agregado de alto forno: fabricação de cimento, produção de concreto e lã mineral.

Neste contexto, o principal aspecto abordado neste presente estudo é relativo à reutilização de resíduos e subprodutos das indústrias siderúrgicas nacionais na pavimentação. O uso destes como matéria-prima possibilita a redução de uso de recursos naturais, reduzindo a demanda de energia para sua extração, o transporte dos mesmos e o volume disposto nos aterros sanitários e industriais.

O crescimento do volume gerado de resíduos de todos os tipos e dos custos para a correta disposição dos mesmos, com o aumento da população e do consumo, tem forçado o aumento da conscientização ecológica da sociedade, tornando imprescindível a pesquisa por reciclagem ou reuso destes materiais. Do ponto de vista econômico, o uso de escória de aciaria em obras rodoviárias é vantajoso pelo custo mais baixo da escória em relação ao do agregado natural, sendo que os custos aumentam quanto mais distante for o local de demanda em relação aos centros geradores, em função do custo do transporte, deve-se também ser considerado o elevado peso específico da escória em relação aos agregados naturais. Do ponto de vista técnico, a indústria produtora de aço tem tentado melhorar na fonte as características

das escórias, tratando-as de forma a adequá-las ao uso nas várias obras de engenharia, tornando-as o que tem sido chamado de agregado siderúrgico.

## **1.1 - JUSTIFICATIVA**

Areias e rochas para britagem são facilmente encontradas na natureza e são considerados recursos minerais abundantes. Entretanto, essa relativa abundância deve ser encarada com o devido cuidado. Por serem produtos de baixo valor unitário, o custo do transporte encarece o preço para o consumidor final (VALVERDE, 2001).

O uso de escória de aciaria como agregado tem sido crescente por ser de grande importância ambiental e econômica. Como agregado, na Construção Civil, substitui parcialmente a areia e/ou a brita. No concreto, a escória entra como adição no cimento ou como agregado. Entretanto, a utilização da escória está condicionada à sua competitividade em custo com os agregados naturais na região (FARIA, 2007).

A escória siderúrgica resulta da agregação das impurezas do processo de produção do aço e outros produtos, separando-as dos metais. As escórias podem ser resultantes de diversos processos siderúrgicos, como por exemplo, do ferro, do aço, do níquel, do manganês, do cobre, etc. Os diversos tipos de escória têm funções semelhantes, porém variam extremamente nas suas propriedades físicas e químicas (BALTAZAR, 2001).

A utilização da escória de aciaria em pavimentos apresenta grandes vantagens e segue a linha da modernização com o desenvolvimento sustentável, justificando-se pelo aproveitamento dos resíduos da indústria siderúrgica e com isso colaborando para melhorar a eficiência energética global. O reaproveitamento da escória de aciaria é de grande importância para a indústria siderúrgica e para a sociedade. Do ponto de vista econômico, tanto a sociedade quanto a indústria siderúrgica têm vantagens, pois além do preço do agregado ser mais baixo do que aquele ofertado para o agregado natural, a indústria siderúrgica não terá gastos com deposição nem com o tratamento ambiental para o resíduo. Em termos globais, também diminui a exploração dos agregados naturais, portanto provoca menores danos ao meio ambiente.

Diversos estudos sobre a utilização do agregado siderúrgico em alguns setores da construção civil comprovam sua eficácia e qualidade que, muitas vezes, são maiores do que alguns agregados naturais. Contudo, o uso deste material também oferece algumas desvantagens, especialmente o fato do material apresentar heterogeneidade e alta expansibilidade quando não é feito o tratamento adequado prévio à sua comercialização.

A presente pesquisa tem a finalidade de contribuir para comprovar a viabilidade da utilização da escória de aciaria como agregado para a produção de misturas asfálticas com alta resistência à deformação permanente.

## **1.2 - OBJETIVO**

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a viabilidade técnica e econômica, através de ensaios de laboratório, do uso de agregado siderúrgico proveniente da Harsco Metals, situada no município de Volta Redonda, no Estado do Rio de Janeiro, como agregado para pavimentação. Este estudo foca mais especificamente o uso em revestimento asfáltico do tipo SMA (*Stone Matrix Asphalt*).

Para atingir o objetivo geral, vários procedimentos e passos experimentais foram necessários, entre os quais, citam-se:

- Realização de revisão bibliográfica sobre a escória de aciaria, enfatizando suas características e utilização nas camadas do pavimento rodoviário;
- Realização de ensaios de laboratório para determinar as características da amostra de escória de aciaria para utilização como agregado em mistura do tipo SMA.
- Determinação das características e a proporção de escória adequada para ser empregada em misturas asfálticas;
- Enquadramento dos agregados da Harsco Metals em misturas asfálticas do tipo SMA 19 mm.
- Avaliação do comportamento mecânico das misturas dosadas por meio de ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração indireta, fadiga, *flow number* e deformação permanente com o uso de simuladores de tráfego.

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos, sendo o primeiro esta introdução, e os seguintes assim distribuídos:

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica focada principalmente em uso de escórias e misturas asfálticas do tipo SMA.

Capítulo 3 - Materiais e métodos, onde são apresentados os ensaios utilizados e os resultados de caracterização dos materiais empregados nesta dissertação.

Capítulo 4 - Ensaio mecânicos e de avaliação complementar: São apresentados os ensaios e métodos para caracterização mecânica das misturas.

Capítulo 5 - Resultado e Análise dos ensaios mecânicos.

Capítulo 6 - Conclusões e Sugestões para pesquisas futuras.

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 - AÇO

Basicamente, o aço é uma liga de ferro e carbono, com percentagens deste último variando entre 0,008 e 2,11%. Distingue-se do ferro fundido que também é uma liga de ferro e carbono, mas com teor de carbono entre 2,11 e 6,67% (CHAVIERINI, 1977).

Devido à influência do carbono sobre a dureza do aço, costuma-se considerar os seguintes tipos de aços-carbono (CHAVIERINI, 1977):

- Aços doces: com percentual de carbono entre 0,15% e 0,25%;
- Aços meio-duros: com percentual carbono entre 0,25% e 0,50%;
- Aços duros: com percentual de carbono entre 0,5% e 1,40% (CHAVIERINI, 1977).

O ferro é encontrado em toda a crosta terrestre, fortemente associado ao oxigênio e à sílica. O minério de ferro é óxido de ferro misturado a uma areia fina. O carbono também é, encontrado em abundância na natureza, sob diversas formas. Na siderurgia usa-se carvão mineral, e em alguns casos, o carvão vegetal.

O carvão exerce duplo papel na fabricação do aço. Como combustível, permite alcançar altas temperaturas (cerca de 1.500°C) necessárias à fusão do minério. Como redutor, associa-se ao oxigênio que se desprende do minério com a alta temperatura, deixando livre o ferro. O processo de remoção do oxigênio do ferro para ligar-se ao carbono chama-se redução e ocorre dentro de um equipamento chamado alto forno (IBS, 2011).

Antes de serem levados ao alto forno, o minério de ferro e o carvão são previamente preparados para melhoria do rendimento e economia do processo. Essa etapa é chamada de preparação de carga. O minério é transformado em pelotas e o carvão é destilado, para obtenção do coque, dele se obtendo ainda subprodutos carboquímicos (IBS, 2011).

No processo de redução, o ferro se liquefaz e é chamado de ferro gusa ou ferro de primeira fusão. Impurezas como calcário, sílica, etc., formam a escória, que é matéria-prima para a fabricação de cimento (IBS, 2011).

A etapa seguinte do processo é o refino. O ferro gusa é levado para a aciaria, ainda em estado líquido, para ser transformado em aço, mediante queima de impurezas e adições. O refino do aço se faz em fornos a oxigênio ou elétricos (IBS, 2011).

Finalmente, a terceira fase clássica do processo de fabricação do aço é a laminação. O aço, em processo de solidificação, é deformado mecanicamente e transformado em produtos siderúrgicos utilizados pela indústria de transformação, como chapas grossas e finas, bobinas, vergalhões, arames, perfilados, barras, etc. Na Figura 1 está apresentado um esquema simplificado de produção de aço segundo IBS (2011).

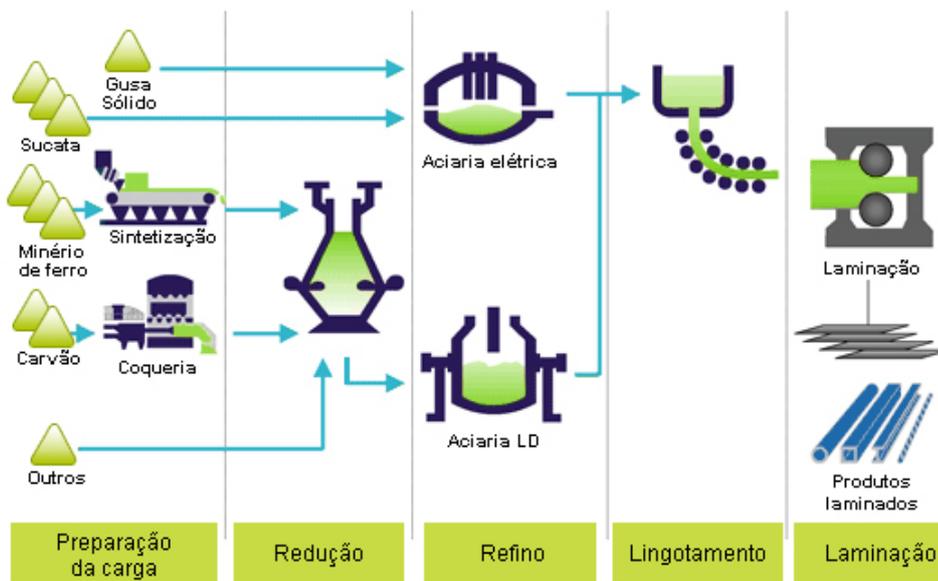


Figura 1: Esquema simplificado de produção de aço (IBS, 2011)

As usinas de aço do mundo inteiro são classificadas segundo o seu processo produtivo da seguinte forma:

1. Integradas → Que operam as três fases básicas: redução, refino e laminação. Produzem aço a partir de ferro gusa-líquido em alto forno, a partir do minério de ferro, com o uso de coque ou carvão vegetal como redutor. A transformação do gusa em aço (refino) é feita em fornos a oxigênio;
2. Semi-integradas → Que operam duas fases: Refino e laminação, a partir da fusão de metálicos (sucata, gusa e/ou ferro-esponja), fundida e refinada em forno elétrico.

3. Não-integradas → Não produzem aço. Dispõem de unidade de redução ou processamento.

No processo de fabricação do aço, são gerados resíduos durante as várias fases do processo, sendo um destes a denominada escória de aciaria, que passa a ser detalhada a seguir.

## 2.2 - ESCÓRIA DE ACIARIA

As escórias são resíduos oriundos da fusão de metais ou da redução de minérios que se formam após a combustão ou tratamento industrial de uma substância. Existem dois tipos de escórias siderúrgicas, produzidas em larga escala: de alto forno e de aciaria.

A escória de alto forno, resultante da fusão redutora dos minérios para obtenção do ferro gusa é obtida diretamente do alto forno, em geral, com elevado teor de carbono e várias impurezas. A escória de aciaria, que resulta da produção do aço, é obtida em conversores a oxigênio e fornos elétricos, durante a conversão do ferro gusa líquido e da sucata em aço (SOUSA, 2007).

A escória de aciaria tem sua formação nos processos de oxidação do aço e é composta principalmente por óxidos e silicatos. A composição química da escória é função da matéria-prima e da tecnologia de produção do aço. Tem como característica marcante ser expansível, devido às reações químicas desses óxidos.

No processo de produção do aço são eliminados CaO (óxido de cálcio), carbono e íons de alumínio, fósforo e silício, que podem tornar o aço frágil, quebradiço e difícil de ser transformado em barras. Todos estes elementos entram na composição da escória: silicatos de cálcio ( $\text{CaSiO}_3$ ), óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), ferrita cálcica ( $\text{CaFe}_2\text{O}_4$ ), óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) e outros (CASTELO BRANCO, 2004).

A composição típica de algumas escórias de aciaria produzidas no Brasil é mostrada na Tabela 1 (IBS, 1998). Observa-se que a escória de aciaria possui uma elevada variação na sua composição química e mineralógica, em função da matéria-prima e do processo de produção empregado. As espécies químicas, identificadas na escória de aciaria, são consequência das variações ocorridas nos processos de refino do aço, na forma de resfriamento da escória e na sua armazenagem após o resfriamento (MACHADO, 2000).

Tabela 1: Composição típica da escória pelo processo LD (IBS, 1998).

Composto	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO
Quantidade (%)	6 - 45	1 - 9	7 - 16	1 - 4	8 - 30	3 - 7

No Brasil, são utilizados para a produção e o refino do aço os seguintes processos: OH (*Open Heart*) que utiliza o forno Siemens-Martin, elétrico ou EAF (*Electric Arc Furnace*) que utiliza o forno de arco elétrico e o LD (*Linz-Donawitz*) ou BOF (*Blast Oxygen Furnace*) que utiliza o conversor a oxigênio, que eram responsáveis por cerca de 1,9%, 20,2% e 77,9% da produção de aço no país, respectivamente, no início do século XXI (MACHADO, 2000). A Tabela 2 apresenta a produção de aço bruto por processo no Brasil atualmente.

Tabela 2: Produção brasileira de aço por processo (IABR, 2012).

Produtos	Unidade: 10 <sup>3</sup> t	
	2011	2010
<b>ACIARIA</b>		
<i>OXIGÊNIO (LD)/EOF</i>	26.930,2	25.007,9
<i>ELÉTRICO</i>	8.231,4	7.811,8
<b>TOTAL</b>	35161,6	32819,7
<b>LINGOTAMENTO</b>		
<i>CONVENCIONAL</i>	1.132,4	1.088,2
<i>CONTÍNUO</i>	33.999,3	31.699,3
<b>ÁO PARA FUNDIÇÃO</b>	29,9	32,2

O processo *Siemens-Martin* (OH) está praticamente em desuso, por isto sua produção não foi contabilizada na Tabela 2 do IBS. Neste processo, adiciona-se sucata metálica juntamente com o calcário e o minério de ferro, e injeta-se oxigênio para provocar a fusão e a agitação do banho metálico. Na fase de refino, adiciona-se cal, principalmente, para a remoção do fósforo (SOUSA, 2007). A produtividade desse processo é baixa, cerca de 300 toneladas de aço em um período de 5 a 14 horas. Comparativamente, no processo BOF, a mesma quantidade de aço é obtida em apenas 30 a 45 minutos (SOUSA, 2007).

O processo EAF é baseado na transformação da energia elétrica em térmica. Uma corrente elétrica alternada, após passar por transformadores para a redução das voltagens, é conduzida a eletrodos de grafita ou de carbono amorfo por meio de terminais e cabos flexíveis

de cobre. As matérias-primas são colocadas em cestões em quantidades pré-determinadas (dependendo das características do aço que se deseja obter) e, posteriormente, são colocadas em uma abóbada (espécie de tampa do forno) fechada. O forno então é ligado e os materiais (carga metálica e cal escarificante) são fundidos (CASTELO BRANCO, 2004).

No processo LD (*Linz Donawitz*) ou BOF (*Basic Oxygen Furnace*) não há necessidade de fonte de calor externa. Com o conversor inclinado, a sucata é carregada por uma calha ou por um vagão basculante, seguindo-se o gusa líquido. Colocando-se o conversor na posição vertical, introduz-se a lança de oxigênio até uma distância pré-determinada (SOUSA, 2007). O aço é fabricado através das seguintes operações: carregamento do conversor, sopragem, observação do banho (temperatura e composição química), resopragem e formação do aço líquido e da escória. A última parte do processo é o lingotamento contínuo onde o aço é transformado em barras.

Nos processos BOF e EAF, a geração de escória varia de 100 a 170 kg de escória por tonelada de aço produzido, dependendo de características do processo de geração, das matérias-primas utilizadas e das diferentes especificações dos aços produzidos em cada siderúrgica. Para a escória de aciaria LD, são gerados, aproximadamente 110 kg de escória por tonelada de aço (SOUSA, 2007).

Na Figura 2 são mostrados exemplos de agregados de escórias provenientes do forno EAF e do LD. Verifica-se que, a escória do primeiro tipo apresenta coloração mais escura e grãos “porosos” e “lisos” (refinos oxidante e redutor, respectivamente), enquanto que a escória LD, além da coloração mais clara, apresenta apenas grãos “lisos”.



Figura 2: Exemplos de agregados de escória de aciaria de forno elétrico (EAF) e básico a oxigênio (LD).

### 2.3 - ESCÓRIA DE ACIARIA LD

A escória de aciaria é gerada no processo de fabricação do aço, resultante da transformação do ferro gusa em aço. A sigla LD deve-se ao fato do aço produzido no conversor de oxigênio (Figura 3) tipo LD (*Linz-Donawitz*) ou BOF (*Basic Oxygen Furnace*).

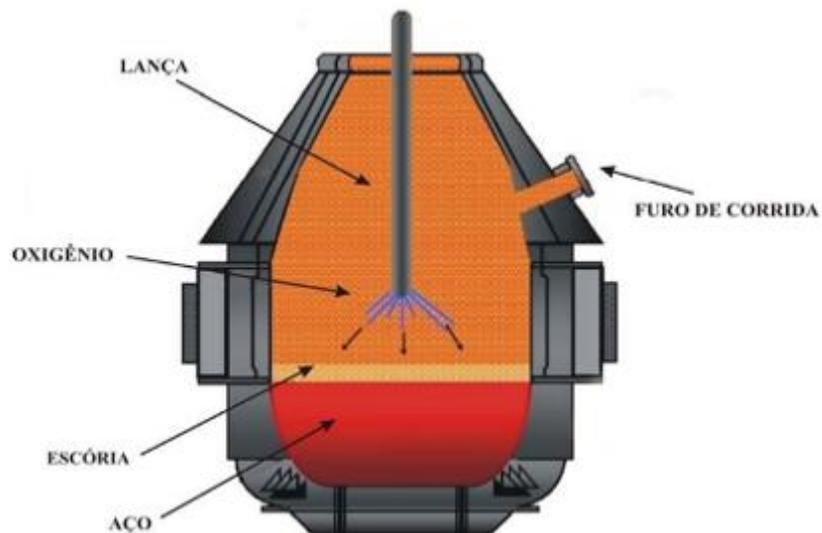


Figura 3: Esquema do conversor à oxigênio (SOUSA, 2007).

O processo de refino do aço tem por objetivo reduzir os teores de carbono do ferro gusa de 4% para 1% e também de outros elementos como o silício, o enxofre ou o fósforo. As temperaturas de trabalho, nos conversores a oxigênio, são bem mais elevadas que nos processos pneumáticos, por exemplo. Na zona de impacto do jato de oxigênio, a reação com o material líquido é violenta e imediata, com temperaturas locais da ordem de 2.500 - 3.000 °C. As diferenças de temperatura, concentração e peso específico resultam em uma enérgica movimentação do banho. Como a eficiência térmica do processo é excelente, pois não há o peso morto do nitrogênio no gás soprado, pode-se usar qualquer tipo de gusa, com teores limites pré-fixados (Tabela 3) segundo Sousa (2007).

Tabela 3: Composição química típica do gusa (SOUSA, 2007).

Composição química	
Elemento	%
C	3,6 - 4,2
Si	0,6 - 1,5
Mn	0,8 - 2,2
P	0,08 - 0,15
S	máx. 0,040

Com teores mais elevados de silício, pode-se adicionar maior quantidade de sucata, devido ao maior potencial em calorías; porém, a duração do revestimento do forno é diminuída pela escória ácida formada nos primeiros minutos da corrida.

À medida que se processa o sopro forma-se uma emulsão escória-metal e outros componentes são oxidados; o monóxido de carbono causa uma vigorosa agitação, acelerando as reações de refino. Completado o sopro, a lança de oxigênio é retirada e o conversor basculado para a horizontal, procedendo-se ao vazamento do aço. No final do vazamento do aço, retém-se a escória no conversor por meio de um material refratário, com densidade maior que a da escória e menor que a do aço líquido e procede-se à retirada da escória (Figura 4).



Figura 4: Sequência de operação de um conversor à oxigênio (SOUSA, 2007).

Após a separação do aço, a escória passa por processos de industrialização para a transformação da escória em co-produto da fabricação do aço. Após o basculamento, a escória é submetida a resfriamento súbito por meio da utilização de jatos de água (Figura 5), sendo direcionada para valas ou leitos de 12 a 15 metros de largura e de 4 a 5 metros de altura. Estes procedimentos permitem a formação de fragmentos grandes e regulares de escória.



Figura 5: Exemplo de basculamento e de resfriamento da escória siderúrgica (SOUSA, 2007).

Após o resfriamento, a escória é transportada para a planta de britagem e, através de sistemas de correias, vai para uma peneira vibratória para fins de classificação e de separação magnética (Figura 6).

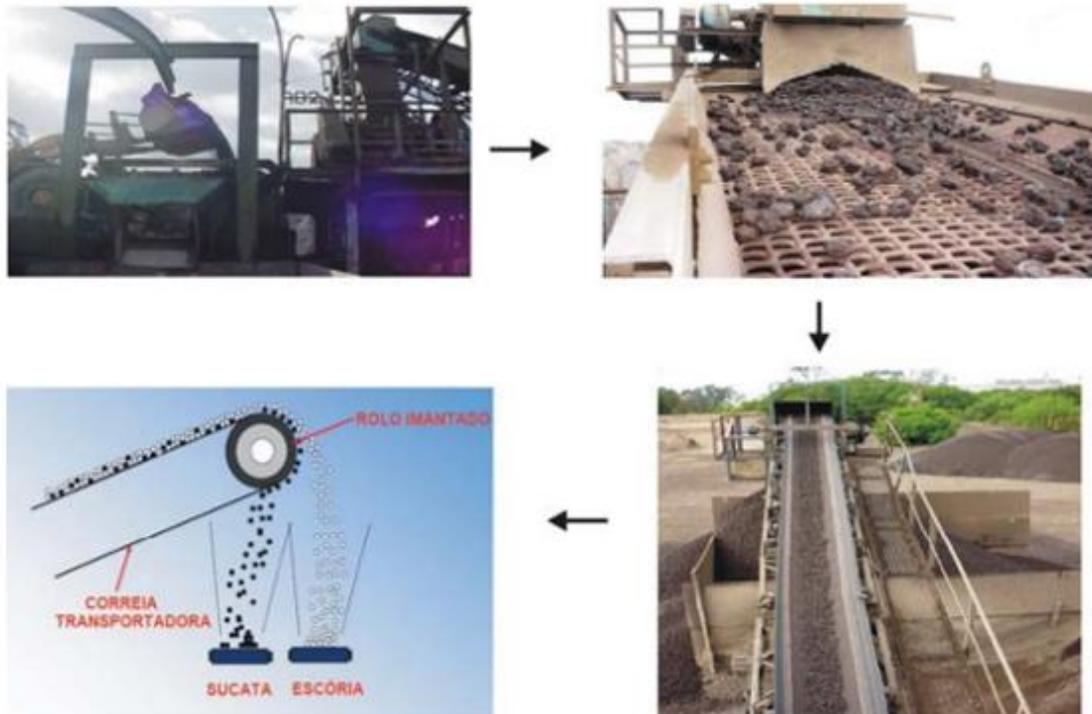


Figura 6: Classificação e separação magnética da escória e partes metálicas (SOUSA, 2007).

A separação magnética permite estabelecer vários tipos de escória com faixas granulométricas distintas: usualmente temos escória in natura de 0 - 25 mm e de 25 - 50 mm. As escórias in natura em geral passam por um processo de cura (período de estocagem) visando diminuir o efeito de expansão, antes de serem empregadas em obras de pavimentação em diversos tipos de vias. A escória de aciaria pode ser empregada para fins diversos como indicado na Figura 7 (IBS, 2004), nas proporções relativas de uso, no Brasil e no mundo.

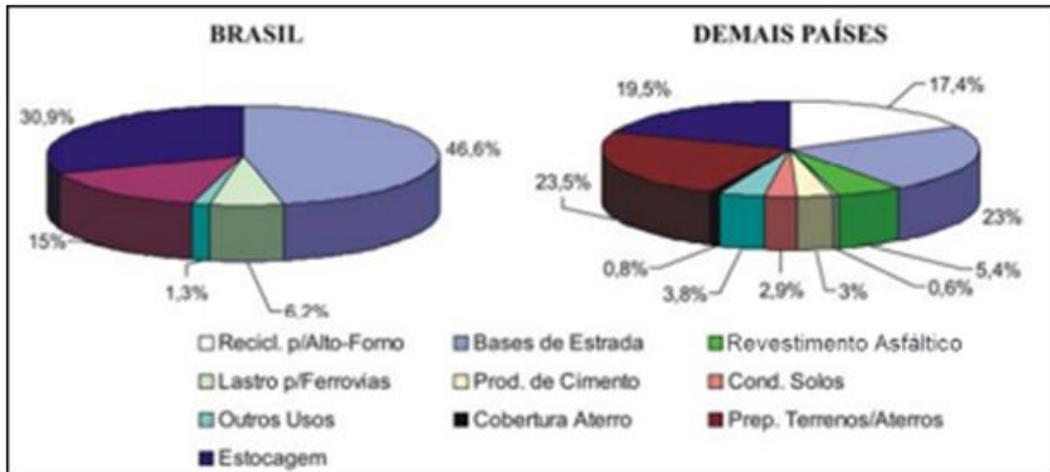


Figura 7: Aplicações da escória de aciaria (IBS, 2004).

A escória de aciaria outrora simplesmente estocada em aterros, atualmente é beneficiada e gera uma ampla variedade de produtos com diversas aplicações, sendo considerado um co-produto da atividade siderúrgica. Parte da escória beneficiada se transforma no agregado siderúrgico. Sua utilização tem contribuído para a preservação dos recursos minerais não renováveis, visto que é um produto que substitui os agregados naturais provenientes da mineração de britas de granito, gnaisses, basaltos, calcários e outros materiais não metálicos extraídos da natureza.

O agregado siderúrgico pode ser utilizado em: pavimentação (sub-base, base, revestimento asfáltico), lastro ferroviário, artefatos de concreto (blocos, tubos, guias, blocos intertravados etc.), contenção de encostas (*rip-rap*), gabiões, drenagens, fertilizantes e corretivos de solos. Todas as aplicações citadas possibilitam a substituição total ou parcial do agregado natural (brita de material pétreo) e os impactos que possam resultar do processamento da escória são menos significativos que as operações de extração da brita, além de consumirem menos energia. Na Figura 8, como exemplo, está mostrada a fabricação de blocos de concreto, para uso na construção civil, feitos com agregados siderúrgicos.



Figura 8: Blocos produzidos com escória de aciaria (CESAR, 2008).

As principais características do agregado siderúrgico, visando vários usos diferenciados, são (RODRIGUES, 2007):

- Elevada resistência mecânica, aliada a uma textura rugosa e morfologia de alta cubicidade, favorecendo maior tração e maior atrito;
- Elevada resistência à abrasão, ocasionando menor desgaste;
- Inexistência de material orgânico, atuando como inibidor natural para a vegetação;
- Alto peso específico, o que proporciona elevada resistência a movimentos laterais (especialmente útil em curvas e ladeiras);
- Baixo custo comparado aos seus concorrentes (brita);
- Fonte inesgotável de recursos; geração contínua de grandes volumes garantindo o fornecimento do material.

A utilização ou o reaproveitamento da escória de aciaria tem tido como principal obstáculo o elevado potencial de expansibilidade que esta pode apresentar quando aplicada em determinadas condições de confinamento. A expansibilidade da escória de aciaria pode ser reduzida, com algumas providências, tornado-a um agregado igual ou melhor do que os agregados oriundos da mineração de algumas rochas. Porém, alguns insucessos ocorridos com a utilização da escória não tratada convenientemente provocam temor nos técnicos que ainda não conhecem suficientemente as melhorias que tem sido feitas para controle deste problema,

ou, justificadamente, não tem uma forma muito adequada de distinguir esta estabilização de forma rápida e confiável. Há muitos fabricantes de aço no Brasil, muitos processos e depósitos de escória de várias idades. Portanto, não é trivial mesmo a distinção da qualidade adequada em relação a este aspecto fundamental que é a garantia da baixa expansão.

## **2.4 - EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA**

Um dos aspectos mais importantes da escória de aciaria, quando utilizada como agregado, que pode ser motivo de alguma limitação, é o seu comportamento expansivo, maior ou menor, dependendo do processo empregado na fabricação do aço e da forma como esta é resfriada inicialmente e tratada posteriormente na estocagem.

É consenso entre os pesquisadores, que o fenômeno da expansibilidade das escórias de aciaria é provocado pela hidratação do óxido de cálcio livre (CaO) e do óxido de magnésio não reagido (MgO). Em presença de umidade, estes óxidos hidratam-se, aumentando de volume. A expansão também pode estar associada ao polimorfismo do silicato dicálcico (C<sub>2</sub>S) e à oxidação e corrosão do ferro metálico (FeO). Também é consenso que o óxido de cálcio é responsável pela expansibilidade inicial, enquanto o óxido de magnésio pela manutenção do fenômeno de expansibilidade continuar por um longo tempo.

O tamanho dos grãos de escória de aciaria é também importante, pois com a redução da granulometria, uma maior superfície é exposta, possibilitando uma hidratação mais rápida do CaO. Além disso, as frações menores que 8 µm apresentam maiores teores de cálcio e menores teores de ferro, quando comparadas às frações mais grossas, possibilitando maior expansão (GEYER, 2001; RAPOSO, 2005).

Machado (2000), baseado em trabalho de Weast de 1971, apresenta as contribuições nas variações volumétricas em função das transformações ocorridas nas principais espécies químicas presentes nas escórias de aciaria. Na Tabela 4, encontram-se reproduzidas estas informações como apresentado em Nascimento e Lange (2005).

Tabela 4: Transformações nos principais elementos químicos (NASCIMENTO e LANGE, 2005).

ESPÉCIE QUÍMICA ORIGINAL		ESPÉCIE QUÍMICA APÓS TRANSFORMAÇÃO		VARIAÇÃO DE VOLUME (%)	MECANISMO
Fórmula	Nome	Fórmula	Nome		
CaO	Cal	Ca(OH) <sub>2</sub>	Portindita	99,4	Hidratação
MgO	Periclássio	Mg(OH) <sub>2</sub>	Brucita	119,5	Hidratação
FeO	Ferro Metálico	Fe(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido	271,7	Hidratação
FeO	Ferro Metálico	Fe(OH)	Goetita	192,0	Hidratação
FeO	Ferro Metálico	FeO	Wustita	77,4	Oxidação
FeO	Ferro Metálico	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematita	328,7	Oxidação
CaO	Cal	CaCO <sub>3</sub>	Calcita	105,9	Carbonatação

Vê-se que, a expansibilidade das escórias de aciaria é resultante de três mecanismos: hidratação (principal), oxidação e carbonatação. O processo de hidratação ocorre no óxido de cálcio livre, no óxido de magnésio reativo e no ferro metálico. O óxido de cálcio também sofre carbonatação. Este processo pode ocorrer ainda devido aos processos de corrosão e de oxidação do ferro metálico. Tais processos geram uma instabilidade volumétrica, podendo provocar expansões de até 14% do volume inicial da escória (ROHDE, 2002).

Além desta lista de transformações, pode-se ainda constatar que, a expansão da escória de aciaria é influenciada por alguns fatores e mecanismos, apresentados na Tabela 5. Os símbolos ↑ e ↓ indicam se o parâmetro influencia positivamente ou negativamente, respectivamente, as reações que provocam a expansão (MACHADO, 2000).

Tabela 5: Parâmetros que influenciam a expansão das escórias (MACHADO, 2000).

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

Os efeitos provocados durante a expansão da escória geram tensões internas que podem provocar trincas e fracionamento do material. Para a escória ser utilizada como agregado na construção civil é necessário portanto o tratamento desta em relação a expansão.

Os tratamentos de redução da expansão da escória de aciaria LD, utilizados no Brasil, tem sido estocagem ao ar livre (ao tempo) somente ou com molhagem e aeração diárias. Já nas escórias de aciaria EAF brasileiras, somente é realizado o tratamento ao tempo (RODRIGUES, 2007).

Nos tratamentos com molhagem, a cura consiste em provocar a estabilização química através da reação de hidratação e de carbonatação de substâncias expansíveis (como cal livre) por contato da escória com água e ar. Durante a cura, essas substâncias reagem, transformando-se em hidróxidos e carbonatos estáveis. É comum classificar a cura como normal, quando realizada com ar e água, e acelerada, quando realizada com água aquecida ou vapor (BALTAZAR, 2001).

Nos tratamentos ao tempo, também chamados de cura lenta ou normal, a escória produzida é beneficiada e estocada em pilhas, nos pátios a céu aberto, sendo seu principal controle o modo e o tempo de estocagem. Na cura normal, a escória siderúrgica é solidificada por resfriamento rápido, britada e empilhada ao ar livre, mantendo-se nessa situação até sua estabilização quanto à expansão. Como inconveniente desse processo de cura pode-se citar o longo período de estocagem necessário que varia de 6 meses a 2 anos. Apesar de ser um processo bastante utilizado, é muitas vezes inviável para as siderúrgicas de grande porte, devido ao enorme volume de escória produzido, o que demanda uma área considerável de estocagem.

Nascimento e Lange (2005) mostram resultados de um experimento com quatro tipos de escória sujeitas a tratamento normal e com hidratação, ao longo de vários dias, mostrando que se atinge um equilíbrio da expansão em muito menos dias quando se faz a molhagem diária das escórias. Em média, a expansão, de 3% considerada aceitável, foi atingida em cerca de 26 dias com a molhagem e em cerca de 150 dias no tratamento normal.

No entanto, deve-se questionar este valor de expansão admitido pela especificação tradicional brasileira, visto que, até para um solo ser utilizada no subleito, por exemplo, a DNIT ES 115 estabelece que a expansão é de no máximo 2%.

Para utilizar os agregados de escória de aciaria deve-se assegurar que estes óxidos livres estejam hidratados, ou seja, que esta escória tenha sido envelhecida por um determinado período de cura suficientemente grande (BALTAZAR, 2001; FREITAS, 2007).

## 2.5 - PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

A malha rodoviária brasileira encontra-se, em grande parte, necessitando de melhorias, tais como duplicações e reforço estrutural, além de ter extensão pavimentada insuficiente. A reversão desse quadro tem sido difícil devido à diminuição dos investimentos e ao aumento exponencial do tráfego. Desse modo, cabe à pesquisa em pavimentação o desenvolvimento de tecnologias que possibilitem a construção de rodovias com maior durabilidade, proporcionando um adiamento de uma intervenção de reabilitação e uma diminuição na frequência de atividades de manutenção (NEVES FILHO, 2004).

Os países que apresentam os melhores indicadores em relação ao desenvolvimento sustentável e a redução dos acidentes no trânsito são, também, os que priorizam ações de manutenção e ostentam as melhores condições de infraestrutura de transporte (REIS, 2010).

O pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas, construída sobre a superfície final de terraplanagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O pavimento rodoviário classifica-se tradicionalmente em dois tipos básicos: rígido e flexível. Mais recentemente, há uma tendência de se usar a nomenclatura pavimentos de concreto de cimento Portland e pavimentos asfálticos, respectivamente, para indicar o tipo do pavimento, já que “rígido” e “flexível” estão mais associados ao comportamento quanto à distribuição de tensões e aos critérios de ruptura, e hoje, sabe-se que os dois tipos de revestimento podem apresentar fadiga e deformações permanentes, dependendo da composição da estrutura total (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os pavimentos de concreto-cimento são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento portland. Tais pavimentos são substancialmente “mais rígidos” do que os pavimentos flexíveis. Eventualmente, estes pavimentos podem ser reforçados por telas ou barras de aço, que são utilizadas para aumentar o espaçamento entre as juntas usadas ou

promover reforço estrutural. É usual designar-se a subcamada desse pavimento como sub-base, uma vez que a qualidade do material dessa camada equivale à sub-base de pavimentos asfálticos (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os pavimentos asfálticos (Figura 9) clássicos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída de agregados e ligante asfáltico e a base de material granular. É formado por diversas camadas mostradas na Tabela 6 (SENÇO, 1997, RODRIGUES, 2007).

O revestimento asfáltico pode ser composto por camada de rolamento - em contato direto com as rodas dos veículos e por camadas intermediárias ou de ligação, por vezes denominadas *binder*, embora essa designação possa levar a certa confusão, uma vez que esse termo é utilizado na língua inglesa para designar o ligante asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, pode-se ter ausência de algumas camadas. As camadas da estrutura repousam sobre o subleito, ou seja, a plataforma da estrada terminada após a conclusão de cortes e aterros, camada final de terraplenagem (CFT). A definição da composição, assim como da espessura de cada camada que constitui o pavimento é estabelecida no dimensionamento do mesmo. Classicamente, admite-se que essas camadas a partir do subleito se tornam técnica e economicamente mais nobres, à medida que se aproximam da superfície.

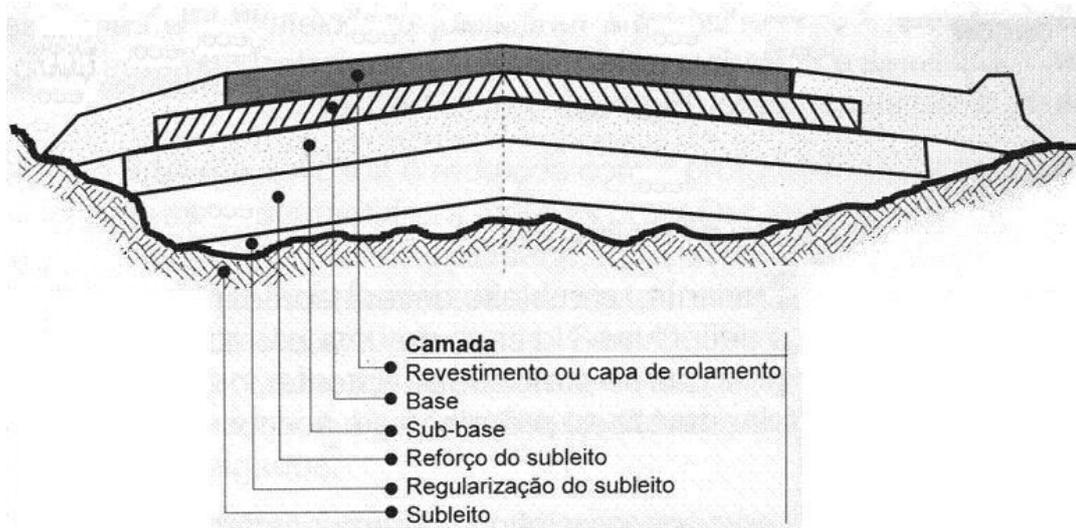


Figura 9: Seção transversal típica de um pavimento asfáltico (SENÇO, 1997 e RODRIGUES, 2007).

Tabela 6: Camadas do pavimento (SENÇO, 1997 e RODRIGUES, 2007).

<b>Camada</b>	<b>Características</b>
Subleito	Terreno de fundação do pavimento.
Regularização do subleito	Destinada a conformar o subleito, transversal e longitudinalmente.
Reforço do subleito	Camada de espessura constante, com características superiores às da regularização e inferiores às da sub-base.
Sub-base	Camada complementar à base, quando necessária, por razões técnicas e econômicas. O material deve ter características tecnológicas superiores às do material de reforço.
Base	Camada destinada a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los às camadas inferiores.
Revestimento	Também chamada capa de rolamento, recebe diretamente a ação do tráfego; deve ser impermeável, melhorar a superfície quanto às condições de conforto e segurança e resistir ao desgaste.

## 2.6 - SMA (*Stone Matrix Asphalt*)

Com o aumento exponencial do volume e da carga de tráfego ocorrido nos últimos tempos, intensificou-se a busca por revestimentos asfálticos diferenciados, que atendam os vários aspectos de solicitações a que estão sujeitos: flexibilidade adequada para resistir ao trincamento, resistência à deformação permanente e cisalhante, e proporcionar atrito pneu-pavimento, entre outros aspectos.

O acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda é uma das principais formas de deterioração estrutural dos pavimentos asfálticos. Em função do aumento do volume de tráfego e da evolução tecnológica da indústria automobilística, trafegam caminhões com maiores cargas por eixo, pressões maiores, novos tipos de pneus e rodagem (por exemplo, pneus extralargos - *super single*): a resistência à deformação permanente deve merecer toda a atenção na dosagem de misturas asfálticas.

O SMA é um tipo de mistura asfáltica desenvolvido na Alemanha no final da década de 1960, que, devido a sua maior resistência à deformação permanente, se comparado a outras misturas, é muito utilizado em países europeus e nos EUA para revestimento de aeroportos e rodovias de alto volume de tráfego. Mais recentemente, este tipo de mistura asfáltica tem sido

empregado no Brasil em locais especiais, como rodovias que necessitam maior resistência a deformação e necessitam maior segurança ao rolamento.

A sigla SMA significa *Stone Matrix Asphalt* que traduzido para o português é Matriz Pétreo Asfáltica, porém, manter a denominação pela sigla original internacionaliza a terminologia e gera menos confusão de conceitos e especificações.

Com o crescimento do volume e peso das cargas, houve também aumento da espessura do revestimento asfáltico em geral. Assim, como é necessário atender a vários aspectos de comportamento da mistura asfáltica ao longo desta espessura maior, é comum a dosagem de misturas de composições diferentes para serem usadas em cada profundidade, cada uma atendendo mais especificamente a um requisito. As misturas do tipo SMA são empregadas tradicionalmente como camada final de revestimento (capa) justamente por seu tipo de esqueleto mineral favorecer a resistência ao cisalhamento superficial gerado pelas mudanças de velocidade dos veículos, apresentar boa resistência à deformação permanente em geral, e também, atender o nível de atrito e impermeabilidade recomendados.

Na figura 10, mostra-se uma parte de um pavimento usado na Alemanha, a título ilustrativo deste conceito de camadas asfálticas múltiplas retirado de material didático correspondente ao livro de Bernucci *et al.* (2008-CD de aulas).



Figura 10: Corpo de prova da estrutura de um pavimento asfáltico com SMA de uma rodovia alemã (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Com base na experiência da Europa, do Japão e dos Estados Unidos com o uso de misturas asfálticas do tipo SMA, observam-se menores custos de manutenção e de

reabilitação, devido ao melhor desempenho e a maior durabilidade dos pavimentos projetados para rodovias com alto volume de tráfego (NEVES FILHO, 2004).

No Brasil, o primeiro serviço de pavimentação com a utilização do SMA foi o de recapeamento do autódromo “José Carlos Pace”, o autódromo de Interlagos em São Paulo, em fevereiro de 2000. Em agosto de 2001, foi realizada a aplicação em uma rodovia de alto volume de tráfego no estado de São Paulo, na via Anchieta, com o objetivo de avaliar o desempenho do SMA. Este trecho foi executado na curva mais fechada e perigosa da via, conhecida por curva da onça. Os resultados, após 5 anos de operação, indicaram o sucesso da solução técnica adotada. Segundo dados da concessionária responsável, os índices de acidentes no local foram reduzidos em 60% (REIS *et al.*, 2002; REIS, 2010).

O SMA é um revestimento asfáltico (Figura 11), usinado a quente, concebido para maximizar o contato entre os agregados graúdos, aumentando a interação grão/grão e a resistência à ação do tráfego. A mistura (Figura 12) se caracteriza por conter uma elevada porcentagem de agregados graúdos, entre 70 a 80% em peso e, devido a essa particular graduação, forma-se um grande volume de vazios entre os agregados graúdos. Esses vazios, por sua vez, são preenchidos por um mástique asfáltico, constituído pela mistura da fração de areia, fíler, ligante asfáltico e fibras. O SMA é uma mistura rica em ligante asfáltico, com um consumo de ligante em geral entre 6,0% a 7,5%. Geralmente, este tipo de revestimento é aplicado em espessuras entre 1,5 cm e 7,0 cm, dependendo da faixa granulométrica. Estas misturas impermeáveis (sob o ponto de vista daquilo que é exigido para pavimentos), com volume de vazios que variam de 4 a 6% em pista.



Figura 11: Visão da textura de um revestimento asfáltico com SMA  
([www.der.pr.gov.br/arquivos](http://www.der.pr.gov.br/arquivos) - consulta 23/2/2011).

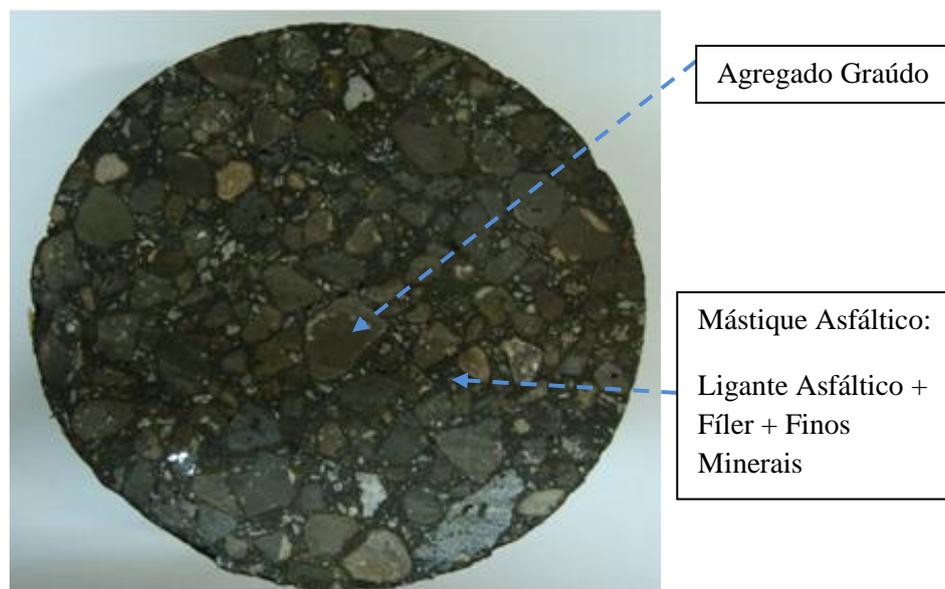


Figura 12: Corpo de prova de uma mistura de SMA, com a superfície serrada à meia altura  
(CP de uma mistura asfáltica com agregado siderúrgico desta pesquisa).

A filosofia desta mistura consiste, basicamente, na estruturação do esqueleto de agregado graúdo descontínuo de tal forma que devido à presença de porcentagem elevada de agregado graúdo, os esforços são transmitidos pedra a pedra. Os vazios do agregado graúdo são quase totalmente preenchidos por argamassa de ligante e filer, denominada mástique. A transmissão dos esforços de compressão é realizada através do contato entre os agregados graúdos; portanto, a resistência mecânica do agregado graúdo deve ser compatível com o nível de tensões aplicadas (MERIGHI<sup>1</sup> *et al.*, 2001 *apud* SILVA, 2005).

Devido à sua particular granulometria, o SMA é uma mistura rica em ligante asfáltico, com consumo em geral de 6% a 7,5%, senão ainda maior. Por esse motivo, muitas vezes é necessário o uso de fibras para evitar o escorrimento do ligante (Figura 13) durante a usinagem, transporte e aplicação (SILVA, 2005).



Figura 13: Escorrimento de ligante ocorrido durante a compactação da massa asfáltica devido a seu alto teor (SILVA, 2005).

A granulometria de uma mistura do tipo SMA é, normalmente, nomeada pelo diâmetro máximo nominal (uma abertura de peneira maior do que a primeira peneira que retém mais de 10%). Também é importante citar a peneira conhecida como de ponto de quebra, definida

---

<sup>1</sup> MERIGHI, J.V., Fortes, R.M. e Merighi, C. Study of cold mixes bitumen emulsions under the optics of the concept of Stone Matrix Asphalt. In: SYMPOSIUM ON MAINTENANCE AND REHABILITATION OF PAVEMENTS AND TECHNOLOGICAL CONTROL, 2., Auburn, 2001. USA. 17p. 1 CD-ROM.

como o diâmetro da peneira que separa as proporções relativas dos agregados graúdos e miúdos. Na Europa, os tipos de SMA mais utilizados são 0/5 (agregados com diâmetro inferior a 5 mm), 0/6, 0/8 e 0/11, sendo este último o mais comumente usado para vias de tráfego pesado. Nos EUA, as faixas granulométricas de SMA têm Diâmetro Máximo Nominal (DMN) do agregado: 25,0 mm, 19,0 mm, 12,5 mm, 9,5 mm e 4,75 mm (NEVES FILHO, 2004).

O SMA, comparado a outros revestimentos asfálticos apresenta inúmeras vantagens, dentre as quais se citam:

- Maior resistência à deformação permanente e qualidade ao rolamento;
- Maior resistência ao trincamento e às desagregações;
- Boa microtextura e macrotextura (que promove atrito e aderência pneu - pavimento);
- Elevado escoamento da água, com redução da aquaplanagem, do borrfifo de água (*spray*) (Figura 14) e menor reflexão da luz em período chuvoso;
- Resistência à derrapagem;
- Redução de ruído.



Figura 14: Efeito do borrfifo de água (*spray*) em local sem SMA.

Na Figura 15 mostra-se um exemplo comparativo da elevada drenabilidade (escorrimento superficial) de um trecho com SMA quando comparado ao revestimento asfáltico comum. É bem visível a diferença do efeito da permanência da água na superfície.

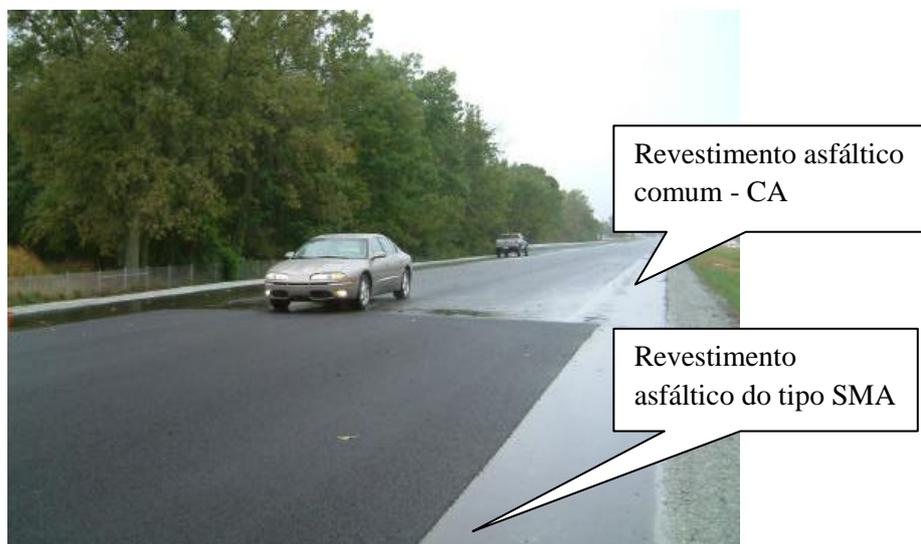


Figura 15: Drenabilidade de um revestimento com mistura do tipo SMA versus revestimento asfáltico comum (McDANIEL *et al.*, 2004).

Em 2002, na Rodovia Presidente Dutra (BR-116 - Trecho que liga Rio de Janeiro à São Paulo), foi executado um trecho experimental de SMA na faixa alemã 0/8S, utilizando o ligante do tipo CAP 20, com teor de projeto de 7,5%. O projeto foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias da Nova Dutra; o trecho foi executado pela Concessionária Nova Dutra, no período de 25 a 26/07/2002, a construtora foi a SA Paulista (CHAVES *et al.*, 2002).

Este trecho com extensão de 830,0 metros compreendeu duas faixas de rolamento, localizado entre o km 202 + 30,0 m e km 202 + 860,0 m, na Pista Sul da Rodovia Presidente Dutra, sentido Rio de Janeiro - São Paulo, município de Arujá - SP. O trecho apresentava volume médio diário de tráfego de 26118 veículos, sendo 29% de caminhões e 4% ônibus.

A execução do trecho pela Concessionária Nova Dutra teve como principal finalidade a melhoria funcional do revestimento, ou seja, aumento na segurança em pista molhada e conforto ao rolamento. Optou-se pela aplicação de um revestimento com espessura média em torno de 2,0 cm (SILVA, 2005).

Para a verificação das condições de superfície foram feitas, logo após a conclusão do trecho, avaliação subjetiva para obtenção do Valor da Serventia Atual (VSA) (DNER-PRO 007/94) e avaliação objetiva para determinação do Índice de Gravidade Global (IGG) (DNER-PRO 008/94). Após 2 anos e 7 meses da execução do trecho, foi feita, novamente, avaliação objetiva da superfície. A determinação desses índices teve como objetivo retratar do grau de deterioração superficial e conforto ao rolamento oferecido pelo revestimento de SMA executado no trecho. A classificação do pavimento em termos de serventia (Valor de Serventia Atual - VSA) e estado de superfície (Índice de Gravidade Global - IGG) seguiu o padrão das normas. Os conceitos obtidos nas avaliações estão discriminados na Tabela 7.

Tabela 7: Conceitos obtidos nas avaliações da superfície do revestimento em SMA realizadas na construção do trecho e meses após (SILVA, 2005).

Parâmetro Avaliado	Conceito na construção	Conceito após 2anos e 7 meses
VSA	Ótimo	Bom
IGG	Bom	Regular

Após 2 anos e 7 meses foram realizados ensaios de avaliação objetiva da superfície de acordo com o procedimento DNER-PRO 008/94 para avaliação do grau de deterioração superficial do revestimento, cujo resultado do IGG é 75 (regular). Os principais motivos desta avaliação foi o polimento dos agregados, a exsudação e os pequenos pontos de desagregação (SILVA, 2005).

Muitos estudos de laboratório sobre SMA já foram feitos no Brasil, tais como Mourão (2003), Vasconcelos (2004) entre outros. Todos discutem com muitos detalhes as características deste tipo de mistura, o uso ou não de fibras, o tipo de ligantes, o tipo de fíler, as exigências com relação à escolha dos agregados, etc, nas condições mecânicas obtidas para a mistura asfáltica.

Muitas obras também têm sido feitas recentemente, tais como na cidade do Rio de Janeiro na chamada Estrada Grajaú - Jacarepaguá, e nos corredores expressos denominados Transcarioca e Transoeste (RAMOS *et al.*, 2011).

Portanto, este tipo de mistura asfáltica vem se tornando conhecido e popular no país. Mas, pelas exigências que apresenta de qualidade dos agregados, especialmente quanto ao

desgaste à abrasão e granulometria especial, o avanço do seu emprego fica comprometido tendo em vista que nem sempre a geologia favorece a obtenção de agregados que satisfaçam as condições necessárias ao uso em misturas asfálticas do tipo SMA.

Assim, nesta pesquisa, avalia-se o uso de um agregado siderúrgico como agregado para SMA como forma de viabilizar a substituição de agregados naturais, mais especificamente de atender os requisitos para os casos onde não haja britas naturais que atendam os mesmos ou também como forma de melhoria do meio ambiente.

## **2.7 - USO DE ESCÓRIA DE ACIARIA EM OBRAS RODOVIÁRIAS**

Devido a preocupações de ordem, principalmente, ambiental e econômica, é crescente a busca pelo uso de materiais alternativos em vários setores da economia. Nas literaturas, nacional e internacional, encontram-se várias pesquisas a respeito do aproveitamento de resíduos industriais. Como exemplo de aplicação de materiais alternativos, tem-se o uso de escórias de aciaria para os mais variados fins (FREITAS, 2007).

Este material tem sido regularmente empregado no Brasil em pavimentação há décadas. As Normas DNER-EM 262/94 e DNER-PRO 263/94 especificam a expansão volumétrica aceitável para a utilização do material em pavimentação rodoviária. A especificação de serviço DNIT ES 115/2009 regulamenta seu uso como base.

No entanto, estas normas citadas apresentam valores que tem permitido a seleção nem sempre adequada de escórias com condições para não apresentarem problemas no pavimento. Tanto que vários defeitos graves e particulares resultantes do uso destes agregados alternativos têm sido relatados, como por exemplo, em Rodrigues (2007) e Raposo (2005).

Desde 1979 a escória de aciaria vem sendo utilizada na infraestrutura de estradas em países como Estados Unidos, Inglaterra, Japão e Canadá. No Brasil, baseada nas informações disponíveis, este uso teve início em 1986, com a execução de 100 km de base e sub-base no estado do Espírito Santo (SILVA e MENDONÇA, 2001; CASTELO BRANCO, 2004).

Países como Grã-Bretanha, Alemanha, Polônia, França, Japão, Estados Unidos e Rússia utilizam escória de aciaria, sozinha ou combinada, como agregado em revestimentos asfálticos há vários anos. Resultados dos ensaios (Tabela 8) comumente utilizados na caracterização dos agregados naturais britados mostram que a escória de aciaria é um produto

tecnicamente competitivo no mercado de agregados para a construção civil, em especial para a pavimentação rodoviária (GEISELER, 1996).

Tabela 8: Comparação entre escória de aciaria e agregados naturais (GEISELER, 1996).

Características	Tipo de Agregado		
	Escória LD	Basalto	Granito
Massa específica dos sólidos ( <i>Bulk density</i> ) (g/cm <sup>3</sup> )	3,1 - 3,7	2,8 - 3,1	2,6 - 2,8
Determinação da resistência ao impacto em agregados britados ( <i>Resistance to impact determined on crushed aggregates</i> ) (8-12 mm) (% massa)	10 - 26	9 - 20	12 - 27
Absorção de água ( <i>Absorption of water</i> ) (% massa)	0,2 - 1,0	<0,5	0,3 - 1,2*
Resistência ao congelamento e degelo ( <i>Freeze/thaw resistance spelling &lt; 5mm</i> ) (% massa)	≤1,0	≤1,0	0,8 - 2,0*
Abrasão Los Angeles ( <i>Los Angeles Test aggregate particle size 8/12 mm</i> ) (% massa)	9 - 18	—	15 - 20
Valor de polimento de rocha ( <i>Polished Stone Value</i> ) (PSV)	54 - 57	45 - 55	45 - 55
Resistência à britagem ( <i>Crushing Strength</i> ) (N/mm <sup>2</sup> )	>100	>250	>120*

\*Valores médios de um local específico na Alemanha.

Na Tabela 9 estão apresentadas as principais características médias ou típicas de escórias de aciaria LD. Nota-se que em geral estas apresentam baixa porosidade e dureza considerável.

Segundo a Companhia Siderúrgica Tubarão (CST, 2010), o fator que mais afeta as propriedades finais deste produto é a granulometria: quanto mais miúdo for esse material, menor a sua resistência à compressão; quanto mais graúdo for este material, maior tende a ser sua resistência. Outras propriedades importantes são a capacidade de carga elevada e a alta resistência ao desgaste. Porém, é necessário citar o que ainda hoje é o maior impasse para uso na pavimentação asfáltica: possível expansibilidade elevada, devido à presença de óxidos livres reativos.

Tabela 9: Características típicas das escórias de aciaria LD (CASTELO BRANCO, 2004).

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

A escória de aciaria pode ser utilizada nas diversas camadas do pavimento, desde o reforço do subleito até o revestimento betuminoso em substituição aos agregados pétreos, desde que a expansibilidade esteja dentro dos limites (CERJAN-STEFAKOVIC *et al.*, 1997 e ROHDE, 2002). Isto é possível por se tratar de um material que pode atender a todas as granulometrias, apresenta baixa abrasão Los Angeles, boa adesividade para emulsões e CAPs (SILVA e MENDONÇA, 2001). Porém deve-se considerar a alcalinidade da escória de aciaria, tendo em vista o potencial de influência no meio ambiente. O pH da escória de aciaria pode atingir valores que variam entre 10 e 14 (ROHDE, 2002).

Na Figura 16 está mostrada uma obra na Venezuela onde a escória está sendo usada como base (RODRÍGUEZ e PAREJO, 2010), enquanto na Figura 17 mostra-se uma obra no Brasil de uso em revestimento primário (KAEME, 2011).



Figura 16: Uso de escória de aciaria em sub-base na Venezuela (RODRÍGUEZ e PAREJO, 2010).

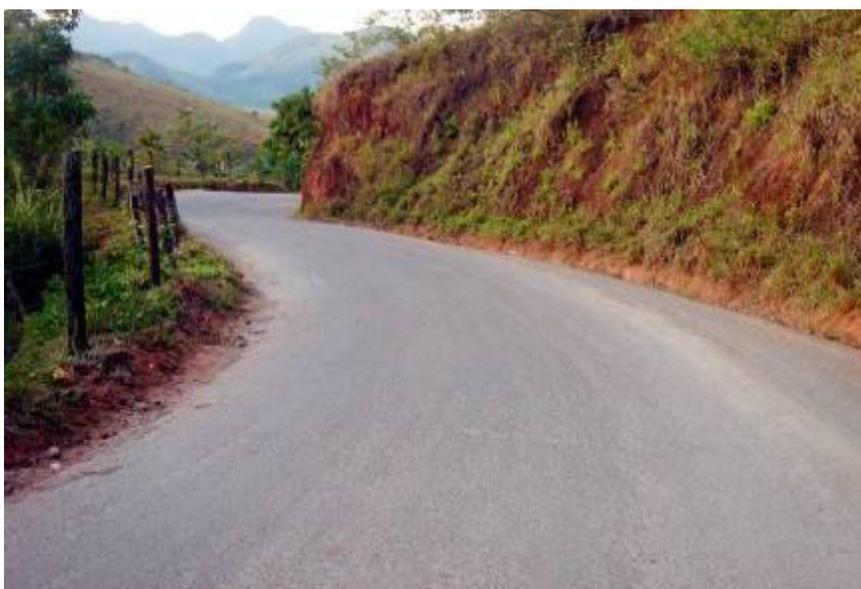


Figura 17: Aplicação de escória de aciaria como revestimento primário no município de Viana/ES (www.kaeme.eng.br - consulta: 8/2/2011).

A principal opção de aproveitamento da escória de aciaria tem sido como agregado para as camadas inferiores do pavimento (Figura 18). Sua utilização como agregado em misturas asfálticas se dá em menor escala (ROHDE, 2002). No caso de uso como camada de base, a especificação de serviço ES 115 (DNIT, 2009) indica o uso da escória de aciaria

sempre combinada com solos naturais lateríticos como forma de minimizar os efeitos adversos da possível expansão residual.



Figura 18: Utilização da escória como agregado rodoviário ([www.jornalvaledoaco.com.br](http://www.jornalvaledoaco.com.br) - consulta: 8/2/2011).

As principais vantagens da utilização da escória de aciaria aplicada em obras rodoviárias são (RODRÍGUEZ e PAREJO, 2010):

- Permite a substituição dos agregados pétreos tradicionais;
- Devido à maior resistência mecânica, requer menor utilização de finos durante a compactação da obra;
- Melhor comportamento para o efeito da água devido à inexistência de fração fina plástica e melhor drenabilidade quando usado em lastro;
- Permite a redução de espessuras de camadas asfálticas requeridas sobre uma camada de base de escória.

As escórias de aciaria também apresentam como característica a hidraulicidade, que é o processo pelo qual o material endurece através da reação com a água. Na prática rodoviária, esta recebe o nome de cimentação ou concrecionamento. Esta propriedade é importantíssima, pois além de melhorar as demais características mecânicas da camada compactada, propicia

um comportamento estrutural semelhante aos das estruturas rígidas ou semi-rígidas. Quimicamente, a hidraulicidade é o fenômeno que ocorre quando a água, em contato com a escória, reage com pequeníssima quantidade de CaO e SiO<sub>2</sub>, formando uma película de hidratos na superfície da escória. Em atmosfera alcalina, ocorre a formação de hidratos contendo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, cuja combinação transforma a escória num material de alta dureza (LIMA *et al.*, 2000 e ROHDE, 2002).

NOURELDIN e Mc DANIEL<sup>2</sup> (1989) *apud* NÓBREGA (2007) avaliaram a utilização de escória de aciaria em diferentes porcentagens (87,0%; 73,0%; 59% e 40%) em misturas asfálticas para serem utilizadas em pavimentos com alto volume de tráfego. Como resultados obtiveram que as misturas com utilização deste resíduo apresentaram alta estabilidade Marshall (até 1.273 Kg) e resistência à tração de 1,1 MPa. Os autores ainda realizaram avaliação em campo e verificaram boa condição de superfície e resistência a derrapagem. Foi sugerido que a expansibilidade da escória fosse combatida com a utilização de um maior teor de cimento asfáltico apesar da redução da estabilidade que essa produz. O alto teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> neste material provocou um endurecimento da mistura asfáltica e aumentou o trincamento quando a mesma foi utilizada em baixas temperaturas. Sugeriram então o uso de misturas asfálticas mais “abertas” e a substituição dos finos da escória por finos de agregados naturais para diminuir o alto peso específico do material.

Para serem utilizadas como agregado para pavimentação, as escórias de aciaria devem atender aos requisitos estipulados na especificação de materiais DNER - EM 262/94, norma que precisa de atualização, tal como foi feita para uso da escória em base. Rohde (2002) comenta os principais pontos das exigências para uso da escória em pavimentação:

- Potencial de expansão determinado pelo PTM 130 (*Pennsylvania Testing Method*), adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (atualmente Método DNIT ME 113/2009): máximo de 3% de expansão ou o valor de determinado pela especificação particular de projeto;

---

<sup>2</sup> NOURELDIN, A.S. e McDANIEL, R.S. Evaluation of Surface Mixtures of Steel Slag and Asphalt. Transportation Research Record, 1989. N 1269.

- Teor de impurezas: as escórias de aciaria devem estar isentas de impurezas orgânicas e de contaminação com escórias de alto forno, solos e outros materiais que possam prejudicar os valores especificados em projeto;
- Granulometria: a composição granulométrica da escória de aciaria deve se manter na proporção de 40% na faixa de até 1,27 cm (1/2”) e 60% na faixa de 1,27 cm a 5,08 cm (2”) de abertura nominal e deve atender à granulometria de projeto. A granulometria da escória de aciaria destinada a revestimentos deverá ser função de estudo em laboratório para atendimento das características de projeto;
- Condições específicas: a escória de aciaria deve, ainda, obedecer aos seguintes limites:
  - a) Absorção de água determinada pelo método AASHTO T 85-08: máximo de 1% a 2% em peso;
  - b) Massa específica determinada pelo método AASHTO T 85-08: de 3 a 3,5 g/cm<sup>3</sup>;
  - c) Massa unitária determinada pelo método NBR 7251-82: de 1,5 a 1,7 kg/dm<sup>3</sup>;
  - d) Desgaste por abrasão Los Angeles determinado pelo método ABNT MB-170-83: máximo igual a 25% para sub-base e revestimento;
  - e) Durabilidade ao sulfato de sódio, determinada pelo método ASTM C88-76, cinco ciclos: máximo de 5%.

O Departamento de Transportes da Pensilvânia (PennDot, 2006), que criou o método PTM 130, especifica (desde 1978), que uma pilha de escória de aciaria deve permanecer em cura úmida por no mínimo seis meses e apresentar expansão menor que 0,5% para ser usado em sub-base, base, revestimento primário e revestimento asfáltico. Caso não atenda este requisito manter a pilha de estoque por mais dois meses em cura úmida.

Huang *et al.* (2007) dizem que o critério mais adequado para garantir a estabilização da expansão da escória de aciaria é deixar estocada por 12 a 18 meses. RMRC (2008) cita também o tempo de estocagem de 18 meses como necessário para hidratar todos os óxidos expansivos.

Emery (2003) também comenta que para a escória de aciaria ser aceita para uso em pavimentação no Canadá, na pilha de estocagem deve apresentar para o ensaio PTM 130 o valor de expansão de somente 0,5%. Também afirma que misturas asfálticas feitas com

escória de aciaria dão excelentes resultados, e o cimento asfáltico provê uma proteção contra a expansão, desde que estejam devidamente “envelhecidas”. Quanto menor o tamanho máximo do agregado siderúrgico menos expansão, segundo o autor. Misturas asfálticas com escória no tem sido usadas no Canadá desde 1969, tendo uso excelente em pátios e áreas industriais. As densidades aparentes de concreto asfáltico com escória ficam no intervalo de 2,85 a 2,90. Os valores de Módulo de resiliência de concreto asfáltico com escória são de 20 a 80% maiores do que com agregado convencional.

Rohde (2002) estudou a utilização da escória de aciaria elétrica como agregado para pavimentação e concluiu que a mesma pode ser empregada como material para base e sub-base, seja por meio de estabilização granulométrica ou pela modificação com cinza pesada e cal de carbureto (resíduos industriais da queima do carvão mineral por usinas termelétricas e da fabricação de gás acetileno, respectivamente), apresentando benefícios técnicos, ambientais e econômicos. A autora optou pela correção granulométrica do resíduo, através de britagem e composição, para enquadrar o material numa faixa brasileira, no caso a faixa C do DNIT, e melhorar seus valores de CBR e sua trabalhabilidade. A partir de uma análise paramétrica dos resultados obtidos, verificou que um pavimento composto por 7,5 cm de concreto asfáltico e 40 cm de brita graduada de basalto apresenta comportamento, quanto as deformações elásticas, equivalente a uma estrutura composta por 7,5 cm de concreto asfáltico e 25 cm de escória granulometricamente corrigida.

Castelo Branco (2004) estudou escória de processo de aproveitamento de sucata da siderúrgica Gerdau de Maracanaú-CE, tendo dificuldades de dosagem devido à heterogeneidade dos grãos. No entanto, quando feita uma seleção esta autora, obteve bons resultados mecânicos em mistura asfáltica densa com utilização do resíduo em sua composição.

Freitas (2007) estudou agregados siderúrgicos da empresa CST para composição de mistura asfáltica de módulo elevado, obtendo muito bom resultado. Como ligantes asfálticos, foram utilizados três tipos: CAP 30/45, CAP 30/45 modificado com 4% de Sasobit, provenientes da Refinaria Duque de Caxias (REDUC), e Resíduo de Vácuo (RV) da Refinaria Presidente Getúlio Vargas no Paraná (REPAR). Os valores médios dos módulos de resiliência foram, respectivamente, para os três ligantes citados: 8608 MPa, 9173 MPa e 8062 MPa. Quanto à resistência à tração os resultados foram: 1,79 MPa, 1,92 MPa e 1,76 MPa. Todos

estes valores foram bastante aproximados dos obtidos com os mesmos ligantes e agregado convencional. Também nos ensaios de fadiga o desempenho ficou semelhante entre cada ligante e os agregados, siderúrgico e convencional, respectivamente.

Rocha (2010) dosou e aplicou num trecho experimental, a solução de tratamento superficial duplo, com agregado siderúrgico da empresa Arcelor Mittal, tratado pela empresa Kaeme, na região de Vitória, ES, com bom desempenho sob tráfego durante o tempo de observação em campo de cerca de 8 meses, equivalente ao trecho executado com agregado convencional.

Zhen-Hua *et al.* (2003) mostram resultados de uso de agregado siderúrgico da China em mistura asfáltica tipo SMA com ligante PG 76-22 modificado e conclui que a escória apresenta excelentes características e que os projetos testados satisfizeram os critérios de dosagem usuais na região como o VAM (17,8%) e o Vv (3,8%), entre outros parâmetros.

Ahmedzade e Sengoz (2008) avaliaram o uso de escória de aciaria em concreto asfáltico comparando com misturas feitas com calcário, na Turquia. Mostram que as características mecânicas das misturas com escória são melhores do que as da mistura de controle, obtendo resistência a tração indireta a 20°C em torno de 1,0 MPa com a escória, boa resistência ao dano por umidade induzida e maior condutividade elétrica. Esta maior condutividade é importante segundo os autores para locais frios para combate ao gelo.

Takahashi *et al.* (2011) apresentam estudo feito no Japão de avaliação de vários tipos de escória quanto ao desgaste ou possível formação de pó dos agregados provenientes destes resíduos, em uso em misturas asfálticas, o que poderia causar contaminação ao meio ambiente. Concluem que estas características dependem do tamanho dos grãos e do intertravamento obtido. Mas que em geral não provocam danos.

Wang *et al.* (2010) apresentam discussão teórica da questão da expansibilidade das escórias e dos ensaios de avaliação. Sugerem mudanças nos critérios que têm sido usados, especialmente para uso em base de pavimentos. Este estudo poderia embasar decisões de mudanças sobre o tipo de ensaio de expansibilidade escolhido para uso no Brasil e seus limites.

Kehagia (2009) discute condições de atrito em revestimentos construídos com escória de aciaria na Grécia. Conclui que a escória promove maior atrito e melhor macrotextura do

que os agregados naturais e britados de rochas. Além disto, as misturas com escória apresentam bom comportamento mecânico geral. O mesmo resultado positivo para a escória quanto ao atrito e macrot textura foi apresentado por Asi (2007) comparando vários tipos de misturas asfálticas com e sem agregado siderúrgico em suas composições.

Griffiths e Krstulovich (2002) apresentam um balanço dos vários tipos de materiais reciclados que são usados em pavimentação no estado de Illinois nos EUA, entre eles vários tipos de escória. Indica que no estado tem sido usados, desde 1975, somente os agregados graúdos de escória de aciaria em misturas asfálticas, às vezes com alguns problemas no controle de qualidade. Mais recentemente medidas foram tomadas para melhorar as especificações para uso.

Wu *et al.* (2007) relatam aplicação de agregado siderúrgico em SMA na China, comparando com uso de basalto. Os materiais foram avaliados com Raio X, microscopia e porosimetria por intrusão de mercúrio. O ligante asfáltico utilizado foi um PG 76-22. O SMA selecionado foi de tamanho nominal máximo de 13,0 mm. A porcentagem de cada fração da composição granulométrica foi a seguinte:

- escória de aciaria (9,5 -16,0 mm): 48%
- escória de aciaria (4,75 -9,5 mm): 24%
- agregado miúdo de basalto (2,36 - 4,75 mm): 6%
- fíler de basalto (< 2,36 mm): 11%
- fíler mineral (< 0,075 mm): 11%

O teor de asfalto foi de 6,4%, sendo a dosagem realizada pelo método Marshall. Foi construído trecho experimental numa auto-estrada da China e observado por 3 anos com bom desempenho.

Kök e Kuloğlu (2008) apresentam resultados de resistência à tração indireta e de módulo de *creep* de misturas asfálticas preparadas com agregados de escória de aciaria (BOF), comparadas com misturas com calcário e basalto, na Turquia. Utilizaram o método Marshall. O ligante foi convencional de penetração 100-150. O teor de ligante foi equivalente nas três misturas (5,0%; 4,9% e 5,0% respectivamente). A mistura com a escória apresentou melhores resultados nos dois ensaios do que as outras duas.

Ziari e Khabiri (2007) comparam desempenho de misturas asfálticas com agregado calcário e várias proporções de escória até 20%, ligante 60 - 70 de penetração e dosagem Marshall. O tamanho máximo do agregado siderúrgico foi de 4,75 mm. Concluem que a proporção de 10% foi melhor.

Yi (2008) estudou misturas asfálticas densas e porosas com escória de aciaria, testadas suas propriedades físicas e mecânicas. Dois projetos de misturas densas com incorporação de asfalto de penetração 80/100 e uma mistura porosa incorporando asfalto 60/70 foram ensaiados. As misturas densas foram com 100% escória de aciaria densa (SSDA) e 50% de escória de aço e 50% de agregado de granito (SSGDA). A mistura porosa foi feita com 100% de escória de aciaria. Os módulos de resiliência foram obtidos em conformidade com a norma ASTM D 4123-82, (pulso de 0,1 segundo e repetição de pulso a cada 3 segundos), a três temperaturas e duas condições de moldagem: imediatamente após a mistura e após 4 horas de envelhecimento da mistura solta (135°C). Os resultados de módulo de resiliência a 25°C, teor de 5,5% de ligante, para a condição sem envelhecimento foram: SSDA foi 3300 MPa; SSGDA foi 2069 MPa. A moldagem feita com a mistura envelhecida 4 horas levou ao aumento de 21% no módulo para a mistura só de escória e a 73% de aumento com a mistura de escória e granito.

Num boletim de divulgação da *National Slag Association (Slag Successes)* de 2006, consta o relato de uma obra de SMA com uso de escória de uma auto - estrada em Indiana, de tráfego pesado: foi utilizado 85% de agregado de escória de aciaria na mistura asfáltica da auto-estrada *Bishop Ford (NSA, 2006a)*.

Os boletins NSA (2006b, 2006c) mostram a aplicação de SMA com agregados de escória de aciaria em duas frações granulométricas, acrescida de agregado natural de dolomita, e fíler mineral, em várias interseções com elevado volume de tráfego.

Em outro boletim da mesma associação citada (NSA, 202-2\_1) consta que o Departamento de Estradas do Colorado estudou várias alternativas de misturas asfálticas especiais de alto desempenho e recomendou o uso de 25% de escória na composição combinado com ligante asfáltico modificado com 25% de TLA (peletes de asfalto natural).

Como já comentado, no Brasil o uso mais significativo das escórias de aciaria é como material para base e sub-base para pavimentação. Porém, sua utilização ainda é muito limitada, devido ao seu potencial expansivo, quando em contato com a água. As

características das escórias de aciaria variam muito e dependem do modo como ela foi obtida e o tratamento a que ela foi submetida (RODRIGUES, 2007).

A utilização da escória sem o devido tratamento acarreta em danos ao pavimento, como o defeito chamado de “pé de galinha” (Figura 19) segundo Jones (2006), e até grandes fissurações no pavimento (Figura 20), segundo Rodrigues (2007).



Figura 19: Exemplo de danos ao pavimento com escória expansiva (pé de galinha) (JONES, 2006).



Figura 20: Exemplos de grandes deformações e trincamentos longitudinais em revestimento com escória expansiva (RODRIGUES, 2007).

Historicamente, a aplicação da escória de aciaria na construção de rodovias foi uma das primeiras preocupações da indústria siderúrgica. Porém, muitas dessas obras, já executadas, tiveram sérios problemas técnicos com origem na falta de conhecimento e domínio do fator expansão destes materiais. No entanto, existem algumas obras rodoviárias com mais de dez anos de serventia que atendem satisfatoriamente às exigências de projeto à medida que o tratamento prévio do material vem sendo feito (BALTAZAR, 2001).

Portanto, para viabilizar a aplicação da escória de aciaria em pavimentos rodoviários, é necessário um tratamento para estabilizar a expansão a níveis aceitáveis, transformando os óxidos de magnésio e cálcio livres em compostos estáveis. Esta atitude de transformar a escória de aciaria em agregado siderúrgico, por tratamentos prévios que incluem várias técnicas e cuidados, tem sido tomada por várias empresas atualmente no Brasil o que vai melhorar o desempenho nos pavimentos.

### 3 - MATERIAIS, MÉTODOS E DOSAGEM

Neste capítulo, são apresentadas a descrição e a caracterização dos agregados e dos ligantes utilizados na presente pesquisa, bem como os resultados básicos. Também são descritos os ensaios realizados para a dosagem das misturas do tipo SMA.

Os materiais utilizados inicialmente neste estudo como agregados (graúdo e miúdo) foi o agregado siderúrgico (escória de aciaria LD), proveniente da Harsco Metals, localizada no município de Volta Redonda, distante cerca de 120 km da capital Rio de Janeiro.

No primeiro estágio da pesquisa, foi feita uma tentativa de montar a curva granulométrica com 100% da amostra de agregado siderúrgico. Como a absorção do material fino de escória foi muito alta, o que gerou muito impacto no teor de ligante, optou-se pela substituição do fino de escória pelo fino de agregado convencional do tipo gnaisse-granítica. Esta parte do experimento está relatada em Tavares *et al.* (2011) e não será apresentada em detalhes neste volume.

O material miúdo (pó de pedra e fíler) utilizado foi de material mineral de origem gnaisse-granítica, proveniente da Pedreira Pedra Sul de Juiz de Fora, Minas Gerais. A Figura 21 ilustra o fluxograma dos ensaios realizados nos agregados deste estudo. Quanto aos ligantes, foram escolhidos dois: um convencional (CAP 30/45) e um modificado com borracha de pneu, processo *terminal blending* feito pela PETROBRAS Distribuidora que não informou o teor de borracha incorporada.

Com isto, foram dosadas e avaliadas mecanicamente duas misturas asfálticas do tipo SMA, ambas na mesma faixa granulométrica, composta de agregados siderúrgicos e finos pétreos naturais cada uma com um ligante, um sendo o CAP 30/45 e o outro o asfalto borracha CAPFLEX-B.

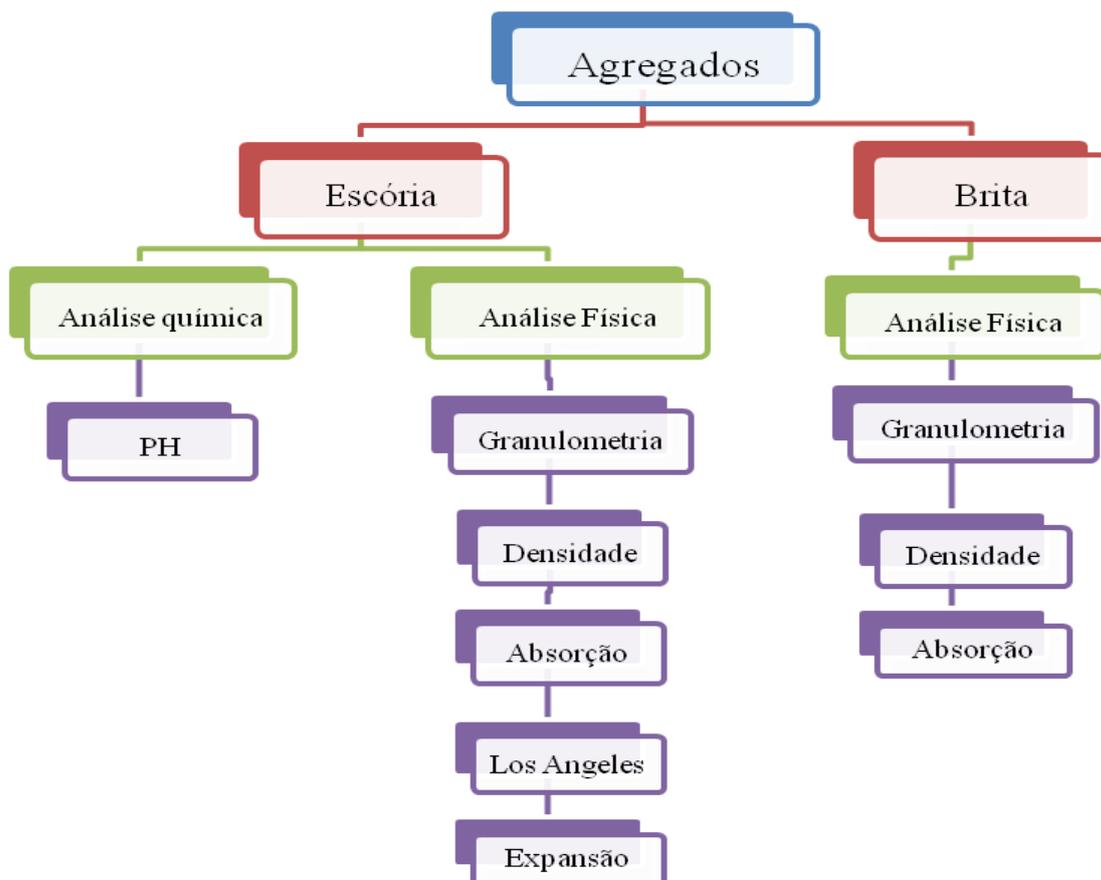


Figura 21: Fluxograma da avaliação das características dos agregados deste estudo.

### 3.1 - AGREGADO SIDERÚRGICO

A escória em estudo é uma escória de forno à oxigênio comercializada como agregado siderúrgico, com a denominação Neobrita, pela Harsco Metals. Este material foi submetido a tratamento prévio para redução da expansão no pátio da empresa e britagem.

O material estudado se encontrava empilhado (Figura 22) no pátio da empresa em Volta Redonda, há cerca de 8 meses, na época da amostragem. Foi coletado pela Harsco Metals na planta de estocagem e enviado à COPPE/UFRJ em caminhão contendo 1500 kg de material graúdo e 400 kg de material fino (Figura 23). A coleta de amostras não obedeceu a um procedimento normatizado, apenas foram coletadas em partes diferentes da pilha, resultando em boa representatividade do material. O agregado siderúrgico em questão é comercializado como sendo de diâmetro igual a 12,5 mm.



Figura 22: Estocagem do agregado siderúrgico no pátio da Harsco Metals em Volta Redonda, RJ, em março de 2011.



Figura 23: Agregados siderúrgicos enviados à COPPE em março de 2011, no estacionamento do Laboratório de Geotecnia (na pilha o graúdo, nos tambores o miúdo).

Na Figura 24, tem-se uma visão mais aproximada de uma amostra do agregado siderúrgico graúdo da Harsco, utilizado nesta pesquisa. É possível perceber que todos os grãos têm uma fina camada de pó ao seu redor. Isto deveria ser evitado, pois prejudica muito a interação dos grãos com o ligante asfáltico.

Nick Jones, em palestra no CILA, em 2011, mostrou várias fotos de pilhas de agregado siderúrgico em uso em obras de pavimentação na Inglaterra e fica muito visível a limpeza superficial dos grãos graúdos. Um exemplo está apresentado na Figura 25. Os grãos do agregado siderúrgico deste estudo são de cor cinza escuro, com formas variáveis (arredondadas e angulares), textura superficial lisa e aspecto não poroso.



Figura 24: Agregado siderúrgico graúdo utilizado neste estudo.



Figura 25: Aspecto dos grãos graúdos de agregados siderúrgicos ingleses (JONES, 2006).

Os grãos do agregado siderúrgico deste estudo são de cor cinza escuro, com formas variáveis (arredondadas e angulares), textura superficial lisa e aspecto não poroso.

Antes de realizar os ensaios de caracterização, o agregado siderúrgico foi seco em estufa a temperatura de  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Em seguida, foi feito o quarteamento do material de acordo com a norma NBR NM27/2001, como mostra a Figura 26.



Figura 26: Quarteamento do material agregado siderúrgico deste estudo.

A utilização de agregado siderúrgico, caso a avaliação técnica seja adequada, se justifica também pelo valor de aquisição do produto e da qualidade que ele oferece se comparado aos agregados naturais. Somente do ponto de vista econômico, pode-se analisar na Figura 27, de forma simplista, o valor de aquisição do  $\text{m}^3$  do agregado siderúrgico e do agregado natural (brita) neste caso. Os preços foram cotados na região da capital do estado do Rio de Janeiro, com retirada dos agregados no local e foi feita a comparação para até qual distância seria viável o uso do agregado siderúrgico ao invés do agregado natural. O preço referente ao  $\text{m}^3$  da brita era de R\$76,00 com retirada na pedreira e o preço do agregado siderúrgico era de R\$ 8,00 com retirada na empresa, à época em que este estudo foi feito em 2011. Naturalmente estas condições particulares influenciam o resultado.

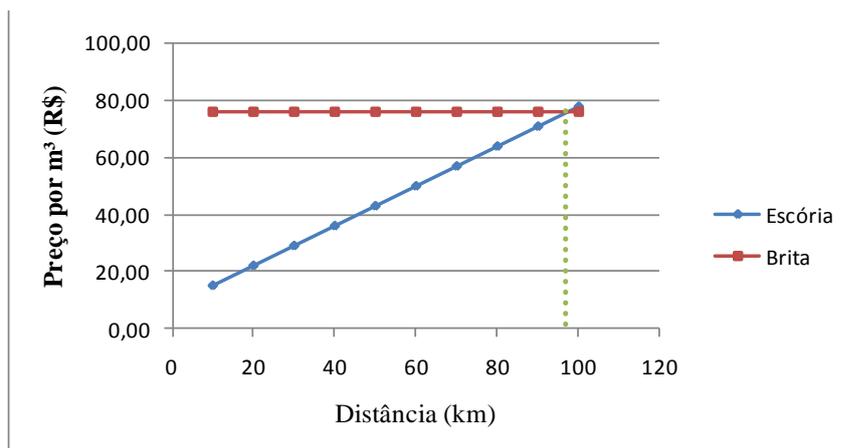


Figura 27: Comparação do preço do m<sup>3</sup> do agregado siderúrgico e da brita pela distância de transporte neste estudo.

Analisando-se o gráfico tem-se que, o agregado siderúrgico (escória) é mais vantajoso até uma distância de 97 km da área de produção. Ressalta-se que, o valor da brita é para retirada na pedreira, ou seja, não está incluso o frete. Foi considerado nos cálculos, o valor do frete como R\$ 0,70 por m<sup>3</sup> de agregado por km. No entanto, é preciso também considerar que o peso do agregado siderúrgico para o mesmo volume em relação à brita é bem maior, tendo em vista que em geral a massa específica da escória é muito maior. Assim, estes cálculos são meramente ilustrativos com relação a atratividade do produto siderúrgico sob o ponto de vista do valor de aquisição para colocação na usina ou na obra no contexto analisado.

### 3.1.1 - Análise do pH

O pH é uma medida da acidez ou alcalinidade de uma solução, numericamente igual a 7 para soluções neutras, aumentando com a alcalinidade e diminuindo com o aumento da acidez. A escala de pH comumente usada em várias categorias de uso é de 0-14.

O pH de um material é um parâmetro importante para definir se é ou não adequado o seu emprego em algumas aplicações, sob o ponto de vista técnico e ambiental. No Brasil, o método disponível para determinação de pH é o Método Eletrométrico, segundo a norma ABNT NBR 9251, utilizado para avaliação de solos. No caso de resíduos, as normas ABNT

NBR 10005:2004 e ABNT NBR 10006:2004 descrevem como preparar os extratos lixiviados e solubilizados, respectivamente, para os ensaios pertinentes a identificação de possível contaminação ambiental. É importante comentar que em todas as especificações ou normas de emprego de escória de aciaria em pavimentação pesquisadas foi encontrada qualquer menção a problemas técnicos devido a este parâmetro.

Sob o ponto de vista ambiental, a norma brasileira ABNT NBR 10004: 2004, faz menção ao intervalo de pH entre 2 e 12,5 como de materiais não perigosos, de forma geral, correspondendo os pHs maiores que 12,5 a possibilidade de serem materiais corrosivos. Diz a norma: “Um resíduo é caracterizado como corrosivo se uma amostra representativa dele for: aquosa e apresentar pH inferior ou igual a 2, ou superior ou igual a 12,5, ou a sua mistura com água, na proporção de 1:1 em peso, produzir uma solução que apresente pH inferior a 2 ou superior ou igual a 12,5.”

Para determinação do pH da escória foi usado um medidor de pH (também conhecido como pHmetro) (Figura 28) que consiste em um eletrodo acoplado a um potenciômetro. O medidor de pH é um milivoltímetro com uma escala que converte o valor de potencial do eletrodo em unidades de pH. Este tipo de eletrodo é conhecido como eletrodo de vidro, que na verdade, é um eletrodo do tipo “íon seletivo”.



Figura 28: pHmetro da COPPE usado no presente estudo.

Os procedimentos usados, descritos sucintamente a seguir, foram aplicados a uma amostra do agregado siderúrgico deste estudo passante na peneira de 9,5 mm. Optou-se também por realizar o ensaio com a escória recoberta com CAP 30/45, uma vez que a escória está sendo avaliada em misturas asfálticas.

1) O pH da escória foi determinado segundo a norma ABNT NBR 10004:2004: água na proporção de 1:1 em peso para ver a corrosividade do resíduo. O pH da escória pura foi 12,6, acima do limite. Este valor se justifica pela presença dos óxidos. No entanto, o valor do pH da escória recoberta com CAP 30/45 foi 11,52, abaixo do limite.

2) Em seguida foi determinado o pH do extrato lixiviado, segundo a norma ABNT NBR 10005:2004. O valor obtido do lixiviado da escória pura foi 12,15 e o valor da escória recoberta com CAP 30/45 foi 6,48, abaixo do valor limite. Portanto, estes resultados não enquadraram o agregado siderúrgico deste estudo como perigoso.

3) Por último foi obtido o extrato solubilizado, segundo a norma ABNT NBR 10006:2004 e o pH determinado foi como o inicial: 12,60.

No caso do uso em pavimentação, o dado importante é o valor do pH do lixiviado pois este é que representa a possível corrosividade pois seria o que eventualmente se desprenderia dos agregados siderúrgicos sob ação das chuvas.

No caso do uso em misturas asfálticas este aspecto fica ainda mais minimizado tendo em vista que todas as partículas estarão envolvidas pelo ligante asfáltico, e eventualmente, como o ligante é ácido, haverá também certa neutralização da alcalinidade da escória.

RMRC (2008) afirma que em geral a escória de aciaria é ligeiramente alcalina, com um pH da solução geralmente na gama de 8 a 10. No entanto, o pH do lixiviado pode exceder 12, nível que pode ser corrosivo para tubos de alumínio ou de aço galvanizado colocados em contato direto com a escória, o que seria eventualmente associado a algum tubo de drenagem. Jones (2006) afirma que na Inglaterra este valor tipicamente está entre 10 e 12. Huang et al (2007) mostram que no Reino Unido, apesar de ter sido detectado eventualmente valores altos de pH, toda a escória de aciaria produzida é reciclada, especialmente como agregado para pavimentação.

Motz e Geiseler (2001) afirmam que na Inglaterra se usa de longa data a escória de aciaria como fertilizante para a agricultura e obras hidráulicas, além do uso na pavimentação. Para isto vários testes ambientais foram desenvolvidos, especialmente de lixiviação, e foi estabelecido que para a escória de aciaria o pH pode variar de 10-13 para uso geral em

pavimentação e em obras hidráulicas. Concluem dizendo que as propriedades de engenharia e ecológicas dos agregados siderúrgicos são aceitas em muitos países como adequadas como material de construção e que na Inglaterra o uso da escória de aciaria em obras de pavimentação e hidráulicas tem contribuído para evitar a exploração do agregado natural em cerca de 93%.

AggRegain (2011) reafirma que na Inglaterra e Reino Unido, baseados na Especificação para obras rodoviárias [Volume MCHW 1] e do Manual de Projeto de Estradas e Pontes [HD 35/04], a escória de aciaria pode ser usada, sem restrições técnicas nem ambientais em:

- misturas betuminosas (base, camada de ligação e capa), com interesse particular para superfície pela sua elevada resistência ao polimento, resistência ao desgaste e forma adequada;
- misturas com ligantes hidráulicos (MCS) para sub-base e base;
- para sub-base e camada de nivelamento;.
- para aterros;
- fabricação de clínquer; e
- fertilizantes e agente melhorador de solo.

Portanto, como tem sido usada inclusive como fertilizante na agricultura admite-se que sob o ponto de vista ambiental o valor do pH não é impedimento para uso do agregado siderúrgico em obras rodoviárias.

### **3.1.2 - Análise Granulométrica**

A análise granulométrica apresentada para o agregado siderúrgico deste estudo é correspondente à fração graúda, conforme é comercializado. A granulometria do pó de escória não será apresentada, pois a alta absorção do pó de escória, como se pode verificar a seguir no item 3.1.3, acabou onerando a mistura (TAVARES *et al.*, 2011), como comentado, levou à substituição do material fino de escória por aquele proveniente do agregado natural.

O procedimento foi realizado segundo a norma ASTM C136-06 e os resultados encontram-se nas Tabelas 10 e 11 e nas Figuras 29 e 30, respectivamente para o agregado siderúrgico e para o pó de pedra de agregado natural britado.

Tabela 10: Granulometria do agregado siderúrgico deste estudo.

Abertura das peneiras		% Passante			
#	mm	Amostra1	Amostra2	Amostra3	Média
1 ½"	38,0	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,0	99,55	100,00	98,73	99,43
¾"	19,0	95,23	96,16	94,25	95,22
½"	12,5	68,89	74,28	62,76	68,65
3/8"	9,5	44,17	50,86	40,59	45,21
Nº 4	4,75	6,70	4,93	5,26	5,63
Nº 8	2,36	6,11	4,19	4,56	4,95
Nº 16	1,18	5,90	4,02	4,34	4,75
Nº 30	0,60	5,49	3,78	4,03	4,44
Nº 50	0,30	4,81	3,37	3,52	3,90
Nº 200	0,075	0,84	0,65	0,95	0,81

Tabela 11: Granulometria do pó de brita usado no presente estudo.

Abertura das peneiras		% Passante			
#	mm	Amostra1	Amostra2	Amostra3	Média
1"	25,0	100,0	100,0	100,0	100,0
¾"	19,0	100,0	100,0	100,0	100,0
½"	12,5	100,0	100,0	100,0	100,0
3/8"	9,5	100,0	100,0	100,0	100,0
Nº 4	4,75	98,8	99,1	98,8	98,9
Nº 8	2,36	80,1	80,4	80,2	80,2
Nº 16	1,18	58,3	58,5	58,4	58,4
Nº 30	0,60	47,7	47,8	47,6	47,7
Nº 50	0,30	36,4	36,5	36,3	36,4
Nº 100	0,15	24,2	24,3	24,2	24,2
Nº 200	0,075	14,3	14,3	14,3	14,3

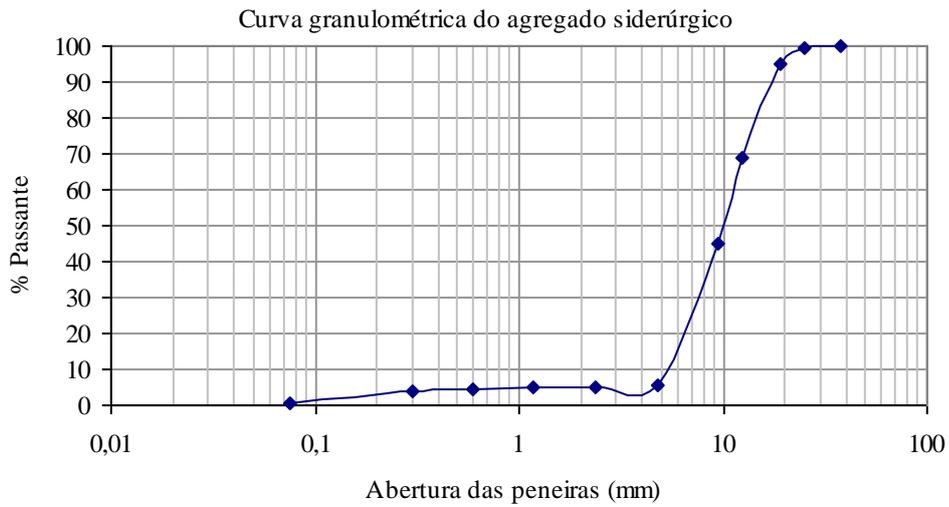


Figura 29: Curva granulométrica do agregado siderúrgico deste estudo.

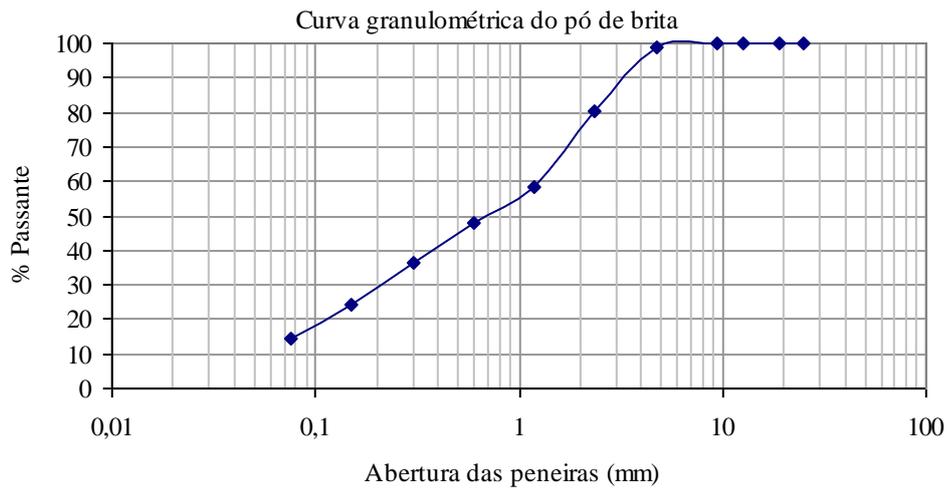


Figura 30: Curva granulométrica do pó de brita usado no presente estudo.

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 10 e 11, pode-se observar que o agregado siderúrgico é classificada pelo TMN como 19,0 mm e o pó de brita apresenta TMN igual a 4,75 mm. É preciso chamar a atenção que este agregado siderúrgico da Harsco Metals tem sido comercializado como de 12,5 mm.

Para tornar a fabricação dos corpos de prova das misturas a serem avaliadas o mais homogêneo possível, todo o material foi peneirado e separado pelas respectivas peneiras. Isto

também é necessário tendo em vista que a curva granulométrica do SMA é difícil de ser atendida pelas britagens convencionais brasileiras.

### 3.1.3 - Massa Específica, Densidade e Absorção

Neste trabalho, as normas utilizadas para a determinação da massa específica, da densidade e da absorção foram: ASTM C 127-07 (para o agregado graúdo) e ASTM C 128-07 (para o agregado miúdo).

No caso do agregado siderúrgico, um dos parâmetros que deve ser considerado com mais atenção é a absorção. Esse tipo de agregado apresenta valores mais elevados do que os granitos e os gnaisses, típicos do Rio de Janeiro, influenciando diretamente na quantidade de asfalto necessário para a mistura, assim como nos seus parâmetros volumétricos.

Os três tipos de densidades ou massas específicas considerados foram: densidade real, densidade aparente e densidade efetiva. Para a determinação desses valores foram consideradas as seguintes definições, como descrito em Cavalcanti (2010):

- Densidade Real,  $G_{sa}$ : não inclui o volume dos poros permeáveis à água ou ao asfalto, ou seja, só admite o volume dos sólidos:

$$G_{sa} = \frac{A}{A - C} \quad (1)$$

onde:

A = Massa seca, em gramas

C = Massa imersa, em gramas

- Densidade Aparente,  $G_{sb}$ : inclui o volume de poros permeáveis à água e ao asfalto, ou seja, considera o material como um todo e ignora a contribuição individual dos outros componentes:

$$G_{sb} = \frac{A}{B - C} \quad (2)$$

onde:

A = Massa seca, em gramas

B = Massa na condição de superfície saturada seca, em gramas

C = Massa imersa, em gramas

- Massa Específica Efetiva: inclui o volume dos poros permeáveis à água, mas não ao asfalto. A massa específica efetiva não é diretamente calculada e em geral pode ser admitida como sendo a média entre a massa específica real e a massa específica aparente segundo PINTO (1996).
- Absorção (%) é o aumento da massa de agregado devido ao preenchimento por água de seus vazios permeáveis, expresso como porcentagem de sua massa seca. É calculada pela seguinte fórmula:

$$A(\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (3)$$

onde:

A = absorção do agregado, em percentagem

$M_h$  = Massa saturada e superfície seca, em gramas

$M_s$  = Massa seca, em gramas.

Durante a realização desses ensaios pode-se observar que o agregado siderúrgico liberava uma substância esbranquiçada, formando bolhas, o que possivelmente foi alguma reação com o recipiente de alumínio utilizado inicialmente para dispor o material. Quando se passou a utilizar recipiente de plástico, surgia uma camada de pó, mas não as bolhas e a espuma esbranquiçada, conforme apresentado na Figura 31(a, b, e c).



(a) imersão

(b) vasilha plástica

(c) recipiente de alumínio

Figura 31: Ensaio de densidade da escória. Atenção para as bolhas formadas com a liberação de substância esbranquiçada.

Na Figura 32 estão mostrados alguns passos para a realização do ensaio de densidade do agregado miúdo, de acordo com a norma ASTM C 128-07, que permite calcular também a absorção desta fração. Os resultados médios obtidos com o agregado siderúrgico, o pó de escória e o pó de brita são apresentados na Tabela 12.



Figura 32: Etapas do ensaio de Densidade do agregado miúdo - definição do ponto de superfície saturada e seca.

Como dito anteriormente, optou-se pela utilização do pó de brita na composição da mistura devido à alta absorção do pó de escória, analisada pelo ensaio de absorção, após tentativas não bem sucedidas de uso desta fração em mistura asfáltica, que absorveu grande volume de ligante asfáltico.

Tabela 12: Resultados de densidade e de absorção dos materiais deste estudo.

Material	Densidade Aparente, Gsb	Densidade Real, Gsa	Absorção, %
Escória	2,931	3,399	4,70
Pó de escória	2,754	3,012	9,20
Pó de brita	2,664	2,702	0,52

### 3.1.4 - Resistência Mecânica - “Los Angeles”

O agregado graúdo deve resistir ao impacto e ao desgaste por atrito entre partículas. Para avaliar essas qualidades, usualmente utiliza-se a máquina de abrasão Los Angeles (ASTM C 131-06). O ensaio de abrasão Los Angeles reproduz o impacto na amostra através da queda de esferas de aço sobre os agregados e da queda dos próprios agregados, uns sobre os outros; simula o desgaste por meio do atrito dos agregados entre si e com as paredes do tambor, enquanto ele gira, a uma velocidade que varia de 30 a 33 rpm.

Em função das características granulométricas do agregado siderúrgico, foram preparadas três amostras de  $5000 \pm 25$  g cada. As amostras foram lavadas e secas em estufas a temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  até obter a constância de massa. Em seguida, cada amostra individualmente foi colocada juntamente com 12 esferas de aço dentro do tambor da máquina Los Angeles e submetida a 500 revoluções (Figura 33). Após o ensaio, o material é passado na peneira de malha quadrada de 1,7mm. O valor da abrasão Los Angeles é expresso pela porcentagem, em peso, do material que passa, após o ensaio, pela peneira de malhas quadradas de 1,7mm em relação ao que existia inicialmente nesta peneira. Os resultados podem ser influenciados pela forma das partículas.



Figura 33: Passos do ensaio de abrasão Los Angeles.

O agregado siderúrgico avaliado neste trabalho apresentou desgaste Los Angeles igual a 22,4%, sendo, portanto, adequado para uso em misturas do tipo SMA, que exige abrasão inferior e 30,0%. A título de comparação, pode-se informar que os agregados graúdos da pedreira Pedra Sul, de onde proveio o pó utilizado no presente estudo apresenta tipicamente abrasão igual a 30%.

### 3.1.5 - Expansão - PTM 130

Um dos maiores entraves quanto à utilização da escória de aciaria em obras de pavimentação asfáltica é o seu potencial expansivo. Segundo alguns trabalhos já realizados com escória, uma forma de diminuir a expansão da escória de aciaria é armazená-la em pequenas pilhas de altura reduzida, de 1,5 a 2,0 metros (CASTELO BRANCO, 2004; LIMA *et al.*, 2000). Para isso, as pilhas devem ter no máximo 10.000 toneladas de material e não devem ser muito altas para evitar que alguma parte do material não seja curada.

Segundo informações fornecidas pela Harsco Metals, o agregado siderúrgico utilizado nesta pesquisa apresenta baixo índice de expansibilidade. No entanto, como parte deste trabalho, foi realizado o ensaio PTM 130 do Departamento de Transportes da Pensilvânia para

verificar o índice de expansão da amostra trazida ao laboratório. Esse é o método utilizado pelo DNER (ME 262-94) para estabelecer o limite de expansão da escória para ser empregada em obras rodoviárias.

O ensaio PTM 130 (RT 01.70/2009) foi realizado de acordo com as seguintes etapas, descritas em várias das referências bibliográficas consultadas:

- As amostras, secas ao ar, foram passadas na peneira de 50,8 mm e foi desprezada a fração retida nesta peneira;
- Em seguida, foi determinada a umidade ótima através do ensaio de compactação (DNER - ME 049-94);
- Foram preparados três corpos de prova, CPs, na umidade ótima, usando o molde do ensaio de ISC (diâmetro de 152 mm). A compactação dos corpos de prova foi realizada em três camadas e com energia modificada (56 golpes por camada);
- Os CPs foram deixados submersos em água (conjunto molde + CP dentro de um recipiente com água) dentro de uma estufa a temperatura de  $71 \pm 3^\circ\text{C}$  (Figura 34). A leitura inicial foi feita após 2 horas da amostra na estufa. As medidas de expansão vertical foram realizadas durante sete dias, sendo feita uma leitura por dia;
- Após esse período, os CPs foram retirados da condição submersa e foram mantidos na condição saturada (adicionando-se água ao molde) por mais sete dias, realizando uma leitura diária;
- O cálculo da porcentagem total de expansão volumétrica foi feito utilizando a seguinte relação:

$$\text{Expansão total} = \frac{\text{leitura}_{14\text{dias}} - \text{leitura}_{\text{inicial}}}{h_{\text{amostra}}} \quad (4)$$

onde:

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

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

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



Figura 34: Recipientes contendo os CPs dentro da estufa no ensaio de expansão.

Os resultados de expansão são apresentados na Tabela 13 e na Figura 35. Confirmou-se que, o agregado siderúrgico deste estudo apresenta baixa expansão, portanto sendo adequado para o uso em pavimentação. Deve-se lembrar de que este agregado siderúrgico ficou estocado por mais de 8 meses no pátio da empresa, em pilhas de altura baixa e controlada para conter somente escórias depositadas numa mesma época.

Tabela 13: Resultados do ensaio de expansibilidade dos três corpos de prova do agregado siderúrgico deste estudo.

Dia	Data	Condição	Expansão Acumulada (%)			
			CP 1	CP2	CP3	Média
0	2/5/2011	submersa	0,00	0,00	0,00	0,00
1°	3/5/2011		0,01	0,00	0,00	0,00
2°	4/5/2011		0,01	0,00	0,01	0,00
3°	5/5/2011		0,01	0,00	0,02	0,01
4°	6/5/2011		0,02	0,01	0,03	0,02
5°	7/5/2011		0,02	0,04	0,07	0,04
6°	8/5/2011		0,02	0,04	0,07	0,04
7°	9/5/2011	saturada	0,04	0,10	0,22	0,12
8°	10/5/2011		0,06	0,12	0,28	0,15
9°	11/5/2011		0,08	0,16	0,32	0,19
10°	12/5/2011		0,15	0,19	0,33	0,22
11°	13/5/2011		0,25	0,22	0,35	0,27
12°	14/5/2011		0,25	0,22	0,35	0,27
13°	15/5/2011		0,25	0,22	0,35	0,27
14°	16/5/2011	0,27	0,30	0,37	0,31	

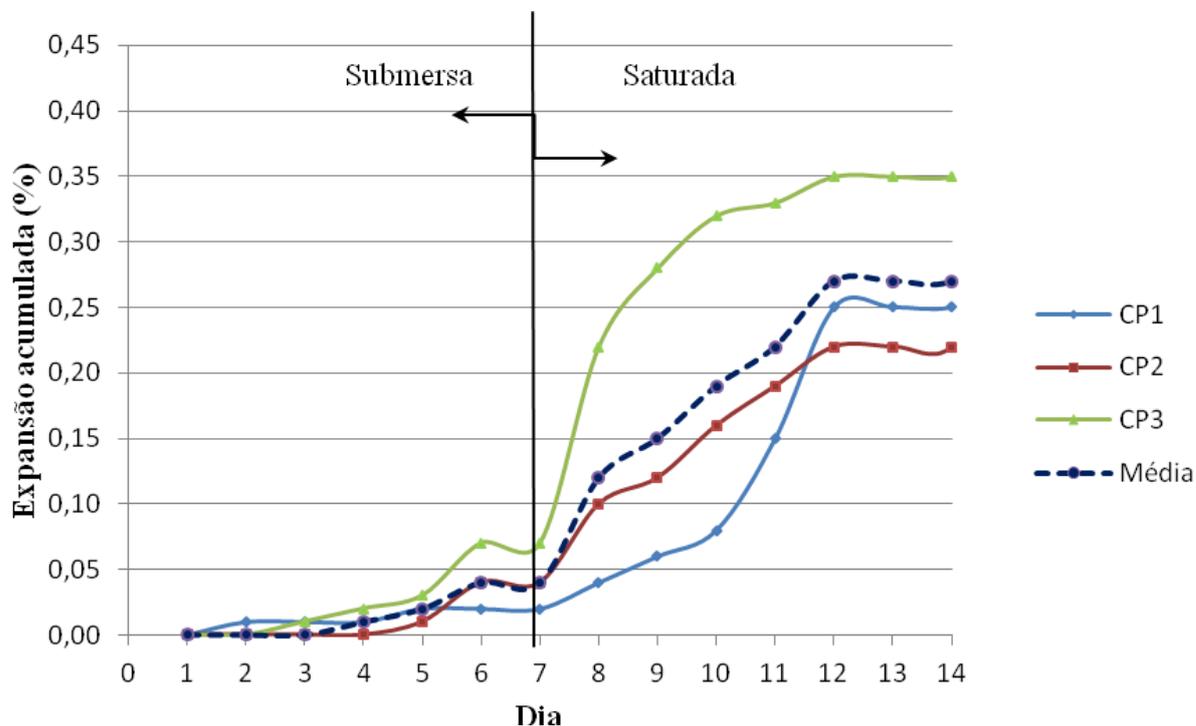


Figura 35: Gráfico da expansão acumulada ao longo do tempo.

### 3.1.6 - Composição da Mistura de Agregados

O objetivo inicial deste trabalho foi utilizar apenas agregado siderúrgico e pó de escória na produção da mistura asfáltica do tipo SMA. A Tabela 14 e a Figura 36 apresentam a curva granulométrica obtida com a primeira composição testada usando exclusivamente os materiais, graúdo e miúdo, de escória, a título demonstrativo da primeira tentativa de composição. Detalhes deste estudo exploratório pode ser visto em Tavares *et al* (2011). Pelo alto grau de absorção do pó de escória, este arranjo não foi adequado tendo em vista o alto consumo de ligante que seria necessário neste caso. Assim sendo, devido a alta absorção do pó de escória, o mesmo foi substituído por um pó de brita e todo o estudo descrito a seguir será referente a esta nova composição granulométrica.

Tabela 14: Composição granulométrica da mistura do tipo SMA com escória e pó de escória.

Peneira		Escória		Pó de escória		Curva granulométrica	AASHTO SMA Faixa 19,0 mm	
#	mm	% Passante	<b>77,30</b>	% Passante	<b>22,70</b>	<b>100,0</b>	mínimo	máximo
1" 1/2	37,50	100,0	77,3	100,0	22,7	100,0	100	100
1"	25,00	99,4	76,9	100,0	22,7	99,6	100	100
3/4"	19,00	95,2	73,6	100,0	22,7	96,3	90	100
1/2"	12,50	68,6	53,1	100,0	22,7	75,8	50	88
3/8"	9,50	35,0	27,1	99,8	22,7	49,7	25	60
No 4	4,75	5,6	4,3	89,7	20,4	24,7	20	28
No 8	2,36	5,0	3,8	68,1	15,5	19,3	16	24
No 16	1,18	4,8	3,7	53,2	12,1	15,7		
No 30	0,600	4,4	3,4	34,0	7,7	11,1		
No 50	0,300	3,9	3,0	16,9	3,8	6,9		
No 100	0,150	2,5	1,9	3,2	0,7	2,7		
No 200	0,075	0,8	0,6	0,7	0,2	0,8	8	11

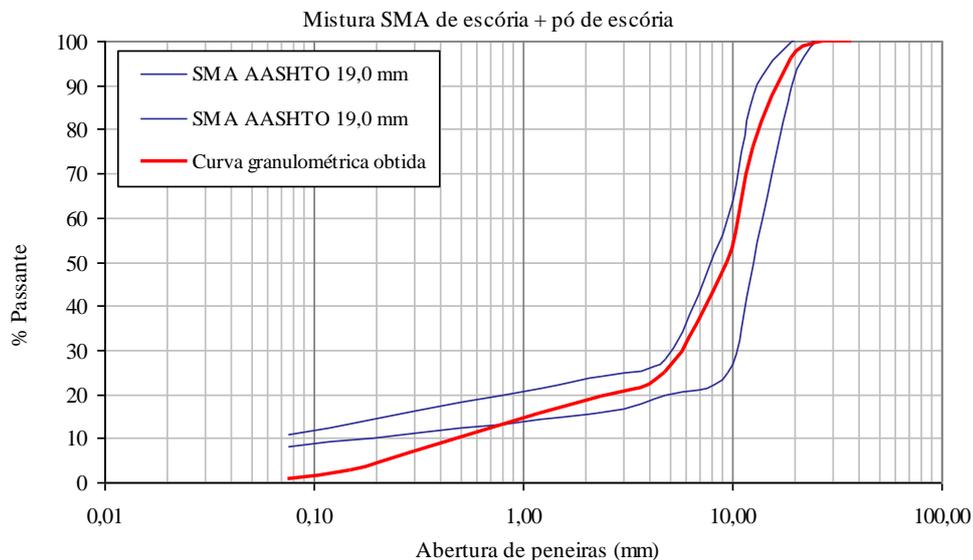


Figura 36: Curva granulométrica da mistura SMA de escória + pó de escória e limites da faixa 19,0 mm da AASHTO.

A Tabela 15 apresenta a nova composição granulométrica da mistura escolhida inicialmente contendo o agregado siderúrgico graúdo e o pó de pedra (natural), assim como na Figura 37 está a curva granulométrica obtida com 77,3% de agregado siderúrgico + 22,7% de pó de brita. A faixa de SMA selecionada foi a 19,0 mm da AASHTO M 325-08 - *Stone Matrix Asphalt* (SMA), em função do TMN obtido para a amostra do agregado siderúrgico deste estudo. Apesar da faixa de SMA não considerar as peneiras N<sup>o</sup> 16 (1,18 mm), N<sup>o</sup> 30 (0,60 mm), N<sup>o</sup> 50 (0,30 mm) e N<sup>o</sup> 100 (0,15 mm) na sua composição, o peneiramento dos

materiais foi realizado incluindo essas peneiras, em função da necessidade das mesmas para a análise do intertravamento pelo Método Bailey.

Tabela 15: Composição granulométrica da mistura do tipo SMA com escória e pó de brita.

Peneira		Escória		Pó de brita		Curva granulométrica	AASHTO SMA Faixa 19,0 mm	
#	mm	% Passante	<b>77,30</b>	% Passante	<b>22,70</b>	<b>100,0</b>	mínimo	máximo
1"	25,0	99,4	76,9	100,0	22,7	<b>99,6</b>	100	100
3/4"	19,0	95,2	73,6	100,0	22,7	<b>96,3</b>	90	100
1/2"	12,5	68,6	53,1	100,0	22,7	<b>75,8</b>	50	88
3/8"	9,5	45,2	34,9	100,0	22,7	<b>57,6</b>	25	60
Nº 4	4,75	5,6	4,3	99,0	22,5	<b>26,8</b>	20	28
Nº 8	2,36	5,0	3,8	80,4	18,2	<b>22,1</b>	16	24
Nº 16	1,18	4,8	3,7	58,8	13,3	<b>17,0</b>		
Nº 30	0,60	4,4	3,4	48,2	10,9	<b>14,4</b>		
Nº 50	0,30	3,9	3,0	36,5	8,3	<b>11,3</b>		
Nº 100	0,150	2,5	1,9	24,3	5,5	<b>7,5</b>		
Nº 200	0,075	0,8	0,6	14,3	3,2	<b>3,9</b>	8	11

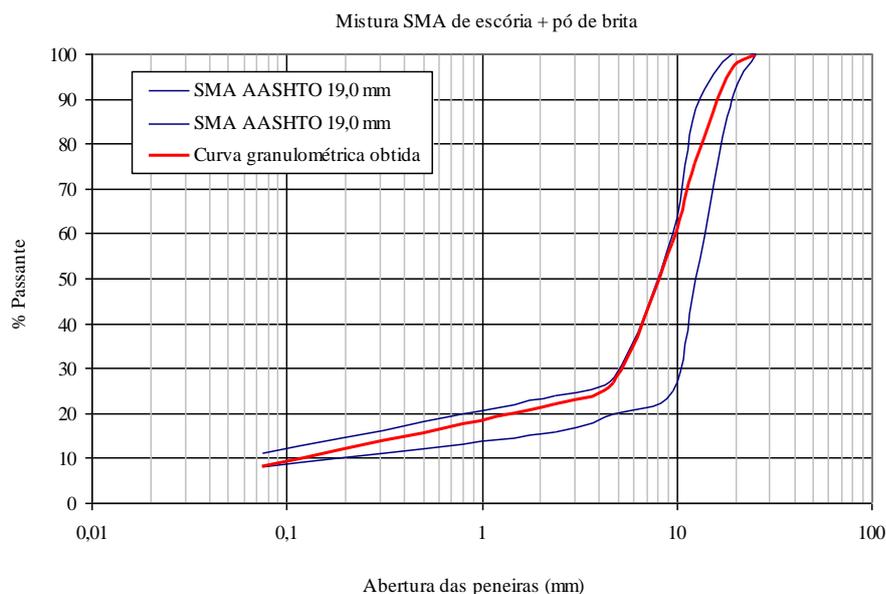


Figura 37: Curva granulométrica da mistura SMA de escória + pó de brita e limites da faixa 19,0 mm da AASHTO.

A partir da Tabela 15, pode-se verificar que a curva granulométrica obtida não atende a faixa selecionada AASHTO 19,0 mm quanto à porcentagem passante na peneira Nº200 (0,075 mm). No caso de misturas do tipo SMA, a quantidade de material fino passante na peneira Nº200 é fundamental, uma vez que a principal característica desse tipo de mistura é a

elevada porcentagem de agregados graúdos, entre 70 a 80% em peso, que formam um grande volume de vazios entre os agregados. Estes, por sua vez, devem ser preenchidos por um mástique asfáltico, constituído pela mistura de finos (passante na peneira N°200), ligante asfáltico e fibras. Por esse motivo, foi necessário o peneiramento de grande quantidade de pó de brita para a retirada do material da peneira N° 200 e assim compor forçadamente uma granulometria que se enquadrasse inteiramente na especificação, como será mostrado mais à frente. Antes de realizar as misturas propriamente, foi feita a análise do intertravamento dos agregados pelo método Bailey como mostrado a seguir.

### **3.1.7 - Análise do Intertravamento pelo Método Bailey**

O método Bailey foi desenvolvido pelo engenheiro Robert Bailey do Departamento de Transportes de Illinois (IDOT) na década de 1980 e consiste em uma forma de seleção granulométrica que visa a escolha de uma estrutura adequada de agregados de misturas asfálticas a quente (CUNHA, 2004).

O método permite também ajustes na quantidade de vazios das misturas em função da porcentagem de cada material e considera o intertravamento dos agregados graúdos o principal fator relacionado à resistência à deformação permanente da mistura (NASCIMENTO, 2008; CAVALCANTI, 2010).

Esta seleção granulométrica está relacionada diretamente com as características de compactação de cada fração de agregado na mistura, com os Vazios do Agregado Mineral (VAM) e com os vazios da mistura (Vv). Possibilita a seleção da estrutura de agregados da mistura visando maior intertravamento dos agregados graúdos, seu uso é compatível com qualquer metodologia de dosagem: Superpave, Marshall, Hveem etc, (CUNHA, 2004).

Para realizar a análise do intertravamento pelo método Bailey foram realizadas as seguintes etapas:

- Após determinar a composição da curva granulométrica do SMA (Tabela 16), foi determinado o TMN, a partir deste ponto identificado pela sigla NMAS, da mistura de agregados, que é a peneira anterior a primeira peneira que retém mais de 15% de material: NMAS = 19,0 mm (este critério de 15% só é valido para o Bailey).

- Em seguida foram determinadas as peneiras de controle da mistura de agregados: HS, PCS, SCS e TCS.

Tabela 16: Granulometria para determinação das peneiras de controle do método Bailey.

Peneira		Curva granulométrica obtida neste estudo
#	mm	
1 1/2"	37,5	<b>100,0</b>
1"	25,4	<b>99,6</b>
3/4"	19,1	<b>96,3</b>
1/2"	12,5	<b>75,8</b>
3/8"	9,52	<b>57,6</b>
Nº 4	4,75	<b>26,8</b>
Nº 8	2,36	<b>22,1</b>
Nº 16	1,18	<b>17,0</b>
Nº 30	0,6	<b>14,4</b>
Nº 50	0,30	<b>11,3</b>
Nº 100	0,15	<b>7,5</b>
Nº 200	0,075	<b>3,9</b>

$$\text{Half Sieve} = \text{NMAS} \times 0,5 = 19,0 \times 0,5 = 9,5 \quad \Rightarrow \text{HS} = 9,5 \text{ mm}$$

$$\text{PCS} = \text{NMAS} \times 0,22 = 19,0 \times 0,22 = 4,18 \quad \Rightarrow \text{PCS} = 4,75 \text{ mm}$$

$$\text{SCS} = \text{PCS} \times 0,22 = 4,75 \times 0,22 = 1,045 \quad \Rightarrow \text{SCS} = 1,18 \text{ mm}$$

$$\text{TCS} = \text{SCS} \times 0,22 = 1,18 \times 0,22 = 0,2596 \quad \Rightarrow \text{TCS} = 0,30 \text{ mm}$$

A partir da quantidade de material passante na PCS pode-se definir se mistura de agregados tem comportamento graúdo (CA) ou fino (FA) (ASPHALT INSTITUTE, 2011):

- Se 49,9% ou menos da mistura de materiais passa na PCS, considera-se graúdo, CA;
- Se 50% ou mais da mistura de materiais passa na PCS, considera-se fino, FA.

Neste caso, a % de material passante na PCS, peneira 4,75 mm, é 26,8% < 49,9%.

Portanto, os agregados analisados são graúdos.

Foram determinadas as proporções CA, Fac e Faf (Tabela 17), a partir das peneiras de controle:

$$\text{Half Sieve} = \text{NMAS} \times 0,5 = 19,0 \times 0,5 = 9,5 \quad \Rightarrow \text{HS} = 9,5 \text{ mm} \quad 49,8\%$$

$$\begin{aligned}
 PCS &= NMAS \times 0,22 = 19,0 \times 0,22 = 4,18 & \Rightarrow PCS = 4,75 \text{ mm} & 26,8\% \\
 SCS &= PCS \times 0,22 = 4,75 \times 0,22 = 1,045 & \Rightarrow SCS = 1,18 \text{ mm} & 17,0\% \\
 TCS &= SCS \times 0,22 = 1,18 \times 0,22 = 0,2596 & \Rightarrow TCS = 0,30 \text{ mm} & 11,3\%
 \end{aligned}$$

Tabela 17: Proporções Bailey para a granulometria inicial deste estudo.

$Proporção CA = \frac{\% \text{ passante na HS} - \% \text{ passante na PCS}}{100 - \% \text{ passante na HS}}$	$Proporção CA = \frac{57,6 - 26,8}{100 - 57,6} = 0,73$
$Proporção FAc = \frac{\% \text{ passante na SCS}}{\% \text{ passante na PCS}}$	$Proporção FAc = \frac{17,0}{26,8} = 0,63$
$Proporção FAf = \frac{\% \text{ passante na TCS}}{\% \text{ passante na SCS}}$	$Proporção FAf = \frac{11,3}{17,0} = 0,71$

Os valores calculados foram comparados com os limites das proporções em função do tipo de comportamento da mistura. No caso de mistura do tipo SMA os limites das proporções são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Valores limites e calculados das proporções de agregados da mistura do tipo SMA (VAVRIK *et al.*, 2002).

Valores limites	Parâmetro	Valores calculados
0,35 - 0,50	CA	0,73
0,60 - 0,85	FAc	0,63
0,65 - 0,90	FAf	0,66

Pode-se verificar que a proporção CA não atende os limites especificados, o que pode implicar em dificuldades de compactação da mistura em campo. Por esse motivo, foi feita uma alteração na granulometria original do agregado siderúrgico e a adição de um fíler natural, que consistiu no peneiramento do próprio pó de pedra usado como agregado miúdo. O objetivo foi enquadrar a curva granulométrica e atender os limites especificados pelo método Bailey, conforme apresentado na Tabela 19.

Tabela 19: Curva granulométrica corrigida da mistura do tipo SMA com agregado siderúrgico e pó de brita.

Peneira		Escória		Pó de brita		Fíler Mineral		Curva granulométrica	AASHTO SMA Faixa 19,0 mm	
#	mm	% Passante	77,3	% Passante	17,3	% Passante	5,4	100,0	mínimo	máximo
1 1/2"	37,5	100,00	77,3	100,0	17,3	100,0	5,4	100,0	100	100
1"	25,4	99,4	76,9	100,0	17,3	100,0	5,4	99,6	100	100
3/4"	19	95,2	73,6	100,0	17,3	100,0	5,4	96,3	90	100
1/2"	12,5	68,6	53,1	100,0	17,3	100,0	5,4	75,8	50	88
3/8"	9,5	35,0	27,1	100,0	17,3	100,0	5,4	49,8	25	60
Nº 4	4,75	5,6	4,3	99,0	17,1	100,0	5,4	26,9	20	28
Nº 8	2,36	5,0	3,8	80,4	13,9	100,0	5,4	23,1	16	24
Nº 16	1,18	4,8	3,7	58,8	10,2	100,0	5,4	19,2		
Nº 30	0,60	4,4	3,4	48,2	8,3	100,0	5,4	17,2		
Nº 50	0,30	3,9	3,0	36,5	6,3	100,0	5,4	14,7		
Nº 100	0,15	2,5	1,9	24,3	4,2	100,0	5,4	11,6		
Nº 200	0,075	0,8	0,6	14,3	2,5	95,0	5,1	8,2	8	11

Com essa alteração foram recalculadas as proporções, mostradas na Tabela 20, e os novos valores calculados são apresentados na Tabela 21, a partir de:

$$\text{Half Sieve} = \text{NMAS} \times 0,5 = 19,0 \times 0,5 = 9,5 \quad \Rightarrow \text{HS} = 9,5 \text{ mm} \quad 49,8\%$$

$$\text{PCS} = \text{NMAS} \times 0,22 = 19,0 \times 0,22 = 4,18 \quad \Rightarrow \text{PCS} = 4,75 \text{ mm} \quad 26,9\%$$

$$\text{SCS} = \text{PCS} \times 0,22 = 4,75 \times 0,22 = 1,045 \quad \Rightarrow \text{SCS} = 1,18 \text{ mm} \quad 19,2\%$$

$$\text{TCS} = \text{SCS} \times 0,22 = 1,18 \times 0,22 = 0,2596 \quad \Rightarrow \text{TCS} = 0,30 \text{ mm} \quad 14,7\%$$

Tabela 20: Proporções Bailey corrigidas para a nova granulometria deste estudo

$\text{Proporção CA} = \frac{49,8 - 26,9}{100 - 49,8} = 0,46$
$\text{Proporção FAc} = \frac{19,2}{26,9} = 0,71$
$\text{Proporção FAf} = \frac{14,7}{19,2} = 0,77$

Tabela 21: Valores limites e calculados corrigidos de agregados da Mistura do tipo SMA.

Valores limites	Parâmetro	Valores calculados
0,35-0,50	CA	0,46
0,60-0,85	FAc	0,71
0,65-0,90	FAf	0,77

Dessa forma, pode-se verificar que todas as proporções estão dentro dos limites, garantindo o intertravamento dos agregados. A Tabela 22 e a Figura 38 apresentam a curva granulométrica final corrigida com agregado siderúrgico, pó de pedra e finos do pó, considerando as peneiras da mistura de SMA da especificação AASHTO 19,0 mm.

Tabela 22: Curva granulométrica final da mistura do tipo SMA com agregado siderúrgico, pó de pedra e finos do pó de brita.

Peneira		Curva granulométrica	AASHTO SMA - Faixa 19,0 mm	
#	mm		mínimo	máximo
1 1/2"	37,5	100,0	100	100
1"	25,4	99,6	100	100
3/4"	19	96,3	90	100
1/2"	12,5	75,8	50	88
3/8"	9,5	49,8	25	60
Nº 4	4,75	26,9	20	28
Nº 8	2,36	23,1	16	24
Nº 16	1,18	19,2	-	-
Nº 30	0,60	17,2	-	-
Nº 50	0,30	14,7	-	-
Nº 100	0,15	11,6	-	-
Nº 200	0,075	8,2	8	11

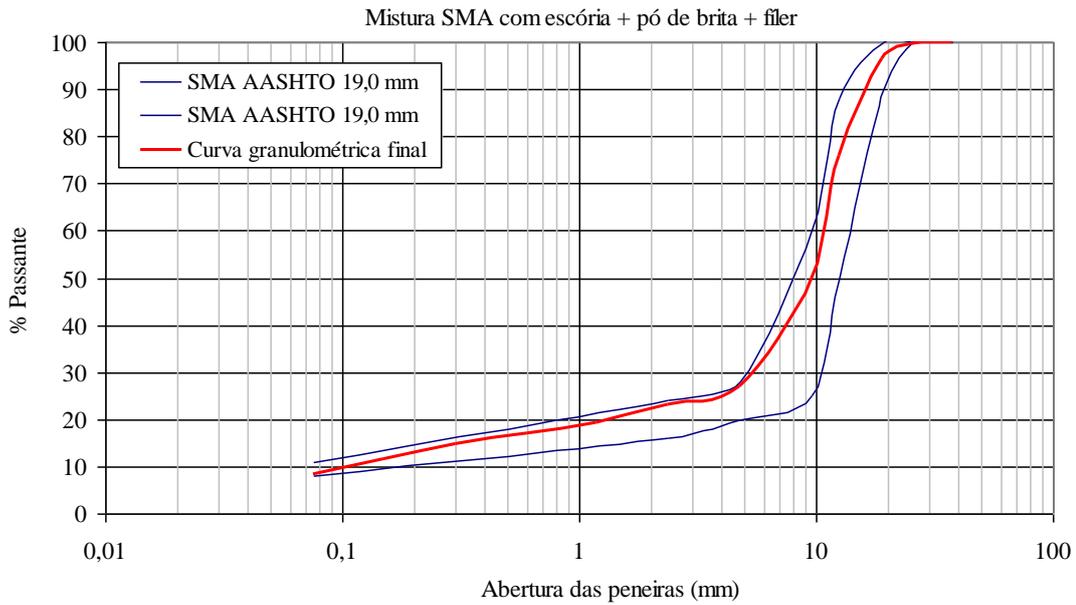


Figura 38: Curva granulométrica final com agregado siderúrgico, pó de brita e finos do pó de brita selecionada para preparação das misturas asfálticas deste estudo.

Além do cálculo das proporções, a análise granulométrica pelo método Bailey avalia o comportamento da mistura, gráudo ou miúdo, através da análise do volume de vazios disponível na fração gráuda e pelo volume ocupado pela fração miúda. Caso o volume de vazios da fração gráuda ( $VCA_{RUW}$ ) seja maior do que a porcentagem de vazios dos agregados gráudos na mistura asfáltica ( $VCA_{mix}$ ) tem-se um comportamento gráudo da mistura. Por outro lado, se o volume da fração gráuda for menor, tem-se um comportamento fino. A determinação desses volumes é feita com base na massa específica solta e compactada dos agregados gráudos e da massa específica compactada das frações miúdas (AASHTO T19-09).

Para determinar o  $VCA_{RUW}$  (vazios da fração gráuda do agregado compactado) e o  $VCA_{MIX}$  (vazios da fração gráuda do agregado na mistura compactada) devem ser utilizadas as seguintes expressões:

$$VCA_{RUW} = \frac{G_{sb-g} G_w - G_{RUW}}{G_{sb-g} G_w} \times 100 \quad (5)$$

onde:

$VCA_{RUW}$  = vazios da fração gráuda do agregado compactado, %;

$G_{RUW}$  = massa específica da fração graúda do agregado seco compactado,  $\text{g/cm}^3$  -  
deve ser determinada conforme a AASHTO T 19-09;

$G_w$  = massa específica da água ( $0,998 \text{ g/cm}^3$ );

$G_{sb-g}$  = massa específica aparente da fração graúda do agregado,  $\text{g/cm}^3$ .

$$VCA_{mix} = 100 - \left( \frac{G_{mb}}{G_{sb-g}} \times P_{CA} \right) \quad (6)$$

onde:

$VCA_{mix}$  = vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada, %;

$G_{mb}$  = massa específica aparente da mistura compactada,  $\text{g/cm}^3$ ;

$G_{sb-g}$  = massa específica aparente da fração graúda do agregado,  $\text{g/cm}^3$ ;

$P_{CA}$  = % de fração graúda do agregado em relação ao peso total da mistura.

Foram determinados os vazios da fração graúda do agregado em estado solto e compactado. Os resultados são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23: Vazios da fração graúda do agregado em estado solto e compactado.

Material	$VCA_{LUW}$		$VCA_{RUW}$	
	Valores obtidos %	Limites %	Valores obtidos %	Limites %
Agregado siderúrgico	40,1	43 a 49	39,2	37 a 43
Pó de pedra	35,1	35 a 43	25,2	28 a 36

Pode-se verificar pelos resultados apresentados na Tabela 23, que os vazios em estado solto,  $VCA_{LUW}$ , do agregado siderúrgico não estão dentro dos limites. É importante ressaltar que esses valores limites foram estabelecidos para os agregados convencionais, com valor de densidade mais baixo, em torno de 2,700, do que a densidade da escória, de 3,399. O valor obtido de vazios em estado compactado,  $VCA_{RUW}$ , pode ser justificado pelo fato da escória apresentar maior densidade, angularidade e resistência, o que implica em menor compactação.

No pó de pedra, o valor obtido de vazios no estado compactado,  $VCA_{RUW}$ , pode ser justificado devido ao recipiente utilizado ter as bordas arredondadas, facilitando assim a compactação.

Após a análise do intertravamento pelo Método Bailey, foi realizada a dosagem das misturas asfálticas compostas por escória e pó de brita para determinar o teor ótimo de ligante asfáltico, que será apresentada mais a frente.

### 3.2 - Ligantes

Neste estudo foram utilizados dois tipos de ligantes asfálticos, o CAP 30/45 puro e o CAPFLEX-B que é um ligante comercializado já modificado por borracha. O CAP 30/45 é proveniente da Refinaria de Duque de Caxias (REDUC), situada no município de Duque de Caxias - RJ. Os certificados de qualidade e enquadramento nas especificações foram fornecidos pela própria REDUC. Tabela 24 mostra as principais características da amostra de ligante asfáltico CAP30/45 deste estudo.

Tabela 24: Características do CAP 30/45 usado neste estudo.

Características	Unidade	Especificação		Resultado	Método
		Lim. Inf.	Lim. Sup.		
Penetração (0,1 mm)	mm	30	45	44	NBR 6576
Ponto de Amolecimento	°C	55	-	56	NBR 6560
Viscosidade SayboltFurol a 135°C	s	192	-	284	NBR 14950
Viscosidade SayboltFurol a 150°C	s	90	-	138	NBR 14950
Viscosidade SayboltFurol a 177°C	s	40	150	45	NBR 14950

O CAPFLEX-B (Asfalto Borracha) é proveniente da Fábrica de Asfalto do Vale do Paraíba (FASFVAP), que faz parte da Petrobras Distribuidora, situada no município de São José dos Campos - SP. O ligante é comercializado já modificado por borracha de pneu moído. Os certificados de qualidade e enquadramento nas especificações foram fornecidos pela própria FASFVAP. A Tabela 25 mostra as principais características do ligante asfáltico CAPFLEX-B.

Tabela 25: Características do CAPFLEX-B usado neste estudo.

Características	Unid.	Especificação		Resultado	Método
		Lim. Inf.	Lim. Sup.		
Penetração (0,1 mm)	mm	35	70	44,3	NBR 6576
Ponto de Amolecimento	°C	55	-	62,5	NBR 6560
Recuperação Elástica (%)	%	50	-	60	NBR 15086
Viscosidade Brookfield 175°C, sp31	cP	1500	4000	3004	NBR 15184

### 3.3 - Misturas Asfálticas

As misturas asfálticas produzidas neste trabalho foram confeccionadas na mesma faixa granulométrica, AASHTO 19,0 mm, utilizando os mesmos agregados e as mesmas proporções: 77,3% de agregado siderúrgico, 17,3% de pó de brita e 5,4% de fíler (os finos do pó de pedra). O que difere nas misturas é o tipo de ligante utilizado, pois, o objetivo principal deste trabalho é avaliar o uso deste agregado siderúrgico em mistura do tipo SMA 19 mm.

Julgou-se que não seria necessário fazer uma mistura de referência com um agregado convencional tendo em vista que a questão não é se este permite obter um SMA satisfatório, fato já comprovado por inúmeros trabalhos brasileiros, tais como em Mourão (2003), Vasconcelos (2004) e Babadopulos *et al.* (2008), entre outros. A questão deste estudo foi verificar se os agregados siderúrgicos recebidos desta determinada empresa satisfariam os requisitos de uma mistura do tipo SMA, sem necessariamente comparar com uma mistura de referência específica. A comparação se fará com dados da literatura.

As misturas realizadas foram denominadas da seguinte forma:

- Mistura 01: Agregados + CAP 30/45
- Mistura 02: agregados + CAPFLEX-B.

Todas as misturas asfálticas foram produzidas empregando um misturador automático, equipamento francês BBMAX 80 (Figura 39), que apresenta a vantagem de fornecer grande quantidade de mistura com bom envolvimento dos agregados pelo ligante em pouco tempo, por bateladas.



Figura 39: Misturador francês usado para produzir as misturas em batelada.

O tempo de mistura da massa é de 2 minutos e após as massas terem sido misturadas, as mesmas foram condicionadas ao envelhecimento de curto prazo de acordo com o que preconiza a norma AASHTO R30-06. Este condicionamento tem como objetivo levar em consideração o tempo de transporte. A norma informa que as misturas devem ficar por  $2\text{ h} \pm 5$  minutos na temperatura de compactação com tolerância de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  antes de serem compactadas. Após o envelhecimento, a massa foi compactada no compactador giratório (Figura 40) que compacta a mistura por amassamento, seguindo os procedimentos descritos na NBR 15897 e empregando 75 giros com energia de 600 kPa, conforme descrito na norma M325-08 (mistura do tipo SMA).



Figura 40: Compactador giratório utilizado neste estudo.

### 3.4 - Dosagem das Misturas

A dosagem das misturas asfálticas foi feita empregando-se o método Superpave, atendendo as especificações AASHTO R 35-09 e AASHTO M 323-07, usando corpos de prova de 15 cm de diâmetro. A quantidade de material por corpo de prova, CP, varia de 4500 a 4700 g, dependendo da massa específica dos agregados. São necessários 3 CPs em cada teor de ligante, sendo 4 teores de ligante por dosagem, com 150 mm de diâmetro e altura entre 110 mm e 120 mm. No caso de misturas com escória, que apresenta massa específica mais elevada, a quantidade de amostra necessária para moldar cada corpo de prova foi de 5300 g.

Inicialmente, para a mistura 01 (CAP 30/45), utilizou-se 6,0% como referência para o teor de ligante inicial, que é considerado o teor mínimo para misturas do tipo SMA e para a mistura 02, (CAPFLEX-B) utilizou-se 6,0% também, e esperando um consumo maior devido a diferença nas viscosidades, foram testados teores mais elevados.

A metodologia Superpave preconiza que o teor de ligante de projeto seja aquele para o qual o volume de vazios ( $V_v$ ) da mistura seja de 4%, entre outras condições volumétricas. Para o cálculo do volume de vazios da mistura é necessário a massa específica máxima medida da mistura ( $G_{mm}$ ) que pode ser obtida através do método Rice seguindo o método ABNT NBR 15619:2008.

O Rice é um método que utiliza vácuo para determinar a densidade da mistura entre o agregado e o ligante, considerando a quantidade de ligante que é absorvido pelo agregado e a diferença entre as viscosidades da água e do ligante. Para a o TMN do agregado (19 mm) é necessário 2500 gramas da mistura em cada teor de ligante. Durante o resfriamento da mistura é necessário a separação entre os agregados com o auxílio de uma espátula (Figura 41) a fim de evitar que se formem grumos. O não recobrimento completo dos grãos que se percebe não está necessariamente ligado à falta de adesividade diretamente, pois foi testado também com agente melhorador de adesividade e não melhorou o envolvimento. Uma das causas pode ser a presença excessiva de pó sobre a superfície dos grãos graúdos, como comentado.



Figura 41: Exemplo de mistura solta preparada para o ensaio Rice.

Após a mistura separada e medida sua massa seca, pesar o recipiente, kitasato, somente com água e com o seu exterior totalmente seco, depois retirar a água e colocar a mistura dentro do kitasato. Adiciona-se água destilada até garantir que a amostra fica submersa quando levada para a mesa agitadora. O kitasato precisa ser pesado somente com água destilada.

Na mesa agitadora a mistura dentro do kitasato com água é vibrada (Figura 42), além de ser aplicado vácuo de 730 mm Hg através de uma bomba de vácuo, por aproximadamente 15 minutos. Após este tempo é liberado o vácuo, todo o volume do kitasato é completado com água destilada, retiram-se as bolhas existentes, seca-se o exterior e o kitasato é levado à balança para ser verificada sua massa total.

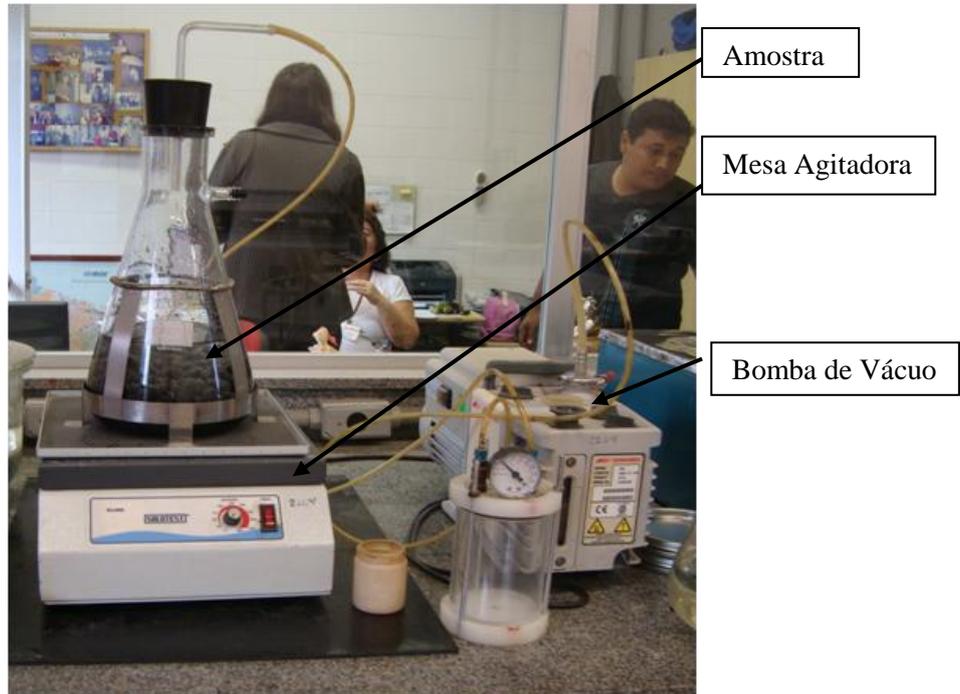


Figura 42: Mistura asfáltica dentro do kitasato na mesa agitadora do ensaio Rice.

A obtenção da  $G_{mm}$  é feita através da seguinte equação:

$$G_{mm} = \frac{A}{(A - (B - C))} \quad (8)$$

onde:

$G_{mm}$  = Massa específica medida

A = Massa da amostra intemperizada em gramas (g);

B = Massa do sistema (massa+kitasato+tampa+água (rasado)) imerso em água, (g) e

C = Massa do Kitasato (kitasato+tampa+água (rasado)) imerso em água (g).

Após as moldagens dos corpos de prova é calculada a massa específica aparente seguindo os procedimentos, ilustrado na Figura 43, da norma ABNT 15573:2008, onde a  $G_{mb}$  é obtida pela seguinte equação:

$$G_{mb} = \frac{P_{ar}}{P_{sat} - P_{\acute{a}gua}} \quad (9)$$

onde:

$G_{mb}$  = Massa específica aparente;

$P_{ar}$  = Peso seco em gramas (g);

$P_{sat}$  = Peso saturado em gramas (g) e

$P_{\acute{a}gua}$  = Peso imerso em gramas (g).



Figura 43: Pesagem dos corpos de prova, seco e imerso, para obtenção da massa específica aparente.

Com os valores de  $G_{mm}$  e  $G_{mb}$ , é possível calcular os volumes vazios ( $V_v$ ) da mistura através da seguinte equação:

$$V_v = 100x \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (10)$$

Moldam-se vários corpos de prova com teores diferentes de ligante, e, plotando os valores de Volume de vazios *versus* teor ligante em um gráfico, no qual, seguindo a especificação da norma AASHTO M325-08 (Misturas SMA), fixa-se o Volume de vazios em 4% e obtém-se o teor dito “ótimo” ou de projeto.

### 3.4.1 - Dosagem Mistura 01

A Mistura 01 compreende a mistura de agregados (agregado siderúrgico, pó de pedra e fíler natural) na proporção calculada para atender o Bailey mais o CAP 30/45. Inicialmente, tomou-se 6,0% como referência para o teor de ligante inicial, considerado o teor mínimo para misturas do tipo SMA. Na Tabela 26 está apresentado um resumo das quantidades de material retido em cada peneira para cada CP (Figura 44) de 5300 g, em função dos teores de ligante selecionados para a dosagem (6,0; 6,5 e 7,0%).

Tabela 26: Quantidade de materiais para moldar os CPs, em função do teor de ligante - M01.

Peneira mm	6,0%			6,5%			7,0%		
	Escória	Pó Brita	Fíler	Escória	Pó Brita	Fíler	Escória	Pó Brita	Fíler
25,4	23,1	0,0	0,0	23,0	0,0	0,0	24,6	0,0	0,0
19,1	161,7	0,0	0,0	160,9	0,0	0,0	172,1	0,0	0,0
12,5	1.024,4	0,0	0,0	1.018,9	0,0	0,0	1.089,8	0,0	0,0
9,52	1.294,0	0,0	0,0	1.287,1	0,0	0,0	1.376,6	0,0	0,0
4,75	1.132,2	8,6	0,0	1.126,2	8,6	0,0	1.204,5	8,5	0,0
2,36	23,1	160,3	0,0	23,0	159,5	0,0	24,6	158,6	0,0
1,18	7,7	186,2	0,0	7,7	185,2	0,0	8,2	184,2	0,0
0,6	15,4	91,4	0,0	15,3	90,9	0,0	16,4	90,4	0,0
0,3	19,3	100,8	0,0	19,2	100,3	0,0	20,5	99,8	0,0
0,15	53,9	105,2	0,0	53,6	104,6	0,0	57,4	104,0	0,0
0,075	65,5	86,2	13,5	65,1	85,7	13,4	69,6	85,3	13,3
Fundo	30,8	123,2	255,6	30,6	122,6	254,2	32,8	121,9	252,9
Ligante	318,0			344,5			371,0		



Figura 44: Exemplos de CPs da M01 moldados para a dosagem ( $\phi = 15\text{cm}$ ).

As densidades máximas medidas médias ( $G_{mm}$ ) obtidas no ensaio Rice para os três teores de ligante testados estão na Tabela 27, média de três corpos de prova.

Vale comentar que foi muito difícil acertar os valores deste ensaio, tendo em vista que os agregados siderúrgicos variam muito em forma, textura superficial e absorção. Castelo Branco (2004) também relata esta dificuldade com o agregado siderúrgico do seu trabalho.

Azari *et al* (2006) apresentam um relatório de um plano interlaboratorial desenvolvido com 27 laboratórios voluntários para discutir precisão de determinação das propriedades volumétricas de misturas asfálticas feitas com agregados porosos (4 a 5% de absorção). Naturalmente, este estudo inclui estudo de repetibilidade e reprodutibilidade do ensaio Rice de obtenção da  $G_{mm}$  e também da massa específica aparente dos corpos de prova.

Os autores citados anteriormente concluíram que a precisão do método ASTM D2041 para agregados porosos é significativamente diferente do obtido com agregados não porosos. Para agregados porosos o estudo sugere limite de 0,005 para um operador e entre laboratórios de 0,010 (para não porosos são 0,002 e 0,004, respectivamente). Também discutiram o efeito do tempo de envelhecimento de curto prazo nestes resultados. Baseado nas análises estatísticas sobre a significância deste fator nos parâmetros volumétricos, sob o ponto de vista prático, recomenda-se um tempo de envelhecimento de 4 horas para misturas asfálticas com agregados porosos antes de medir a  $G_{mm}$ , entre outras considerações (AZARI *et al.*, 2006). Nos próximos estudos com agregado siderúrgico recomenda-se seguir este tempo de quatro horas ao invés das duas de envelhecimento que foram adotadas na presente pesquisa.

Tabela 27: Teor de ligante *versus*  $G_{mm}$  para M01.

Teor de ligante (%)	$G_{mm}$
6,0	2,814
6,5	2,762
7,0	2,735

Seguindo as especificações da norma AASHTO M325-08, observando-se o Volume de vazios ( $V_v$ ) e os Vazios do Agregado Mineral ( $VAM$ ) é possível obter o teor dito “ótimo” ou de projeto da Mistura 01. A norma preconiza 4% de  $V_v$  e o  $VAM$  maior do que 17. Na Tabela 28 e na Figura 45, mostram-se os valores médios obtidos sendo possível assim obter o

teor “ótimo”. Reforça-se aqui o comentário de que o teor de ligante de 6% é o mínimo recomendado pela maioria das normas de SMA.

Tabela 28: Teor de ligante, Volume de vazios e Vazios do Agregado Mineral - M01.

Teor de ligante (%)	Gmm	Gmb	Vv (%)	VAM
6,0	2,814	2,711	3,7	11,2
6,5	2,762	2,712	1,8	11,6
7,0	2,735	2,708	1,0	12,2

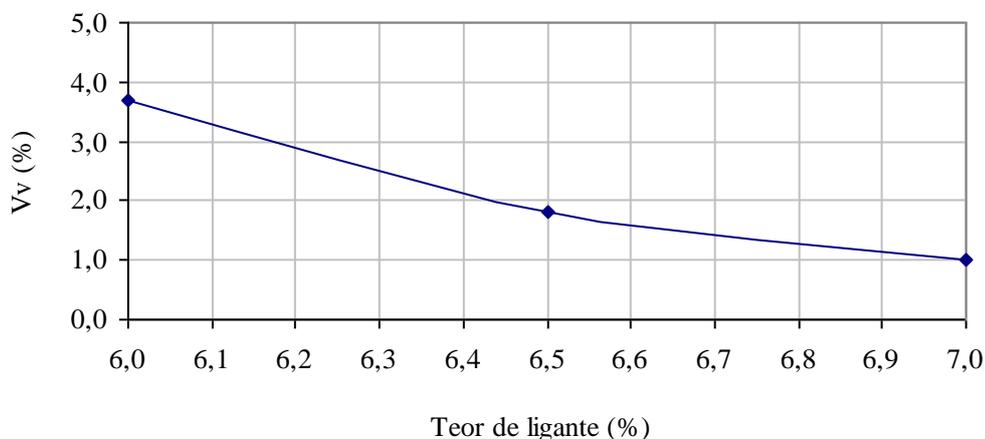


Figura 45: Gráfico teor de ligante *versus* Volume de vazios - M01.

Visualizando o gráfico da Figura 45, vê-se que o teor de ligante correspondente a 4% de vazios seria menor do que o menor teor testado, que foi de 6,0%, por estes cálculos. Mas mesmo com o teor de 6%, o agregado não ficou completamente recoberto (Figura 45 e 46). Assim, embora tendo sido repetido inúmeras vezes o Rice, admitiu-se que o critério de recobrimento total dos agregados deveria ser o adotado para definir o valor de teor “ótimo”. Assim para a mistura 01, com o CAP convencional o teor de 6,5% de ligante foi escolhido como o de projeto. Admite-se que a fase de definição do teor de projeto somente pelos parâmetros volumétricos é uma primeira etapa e que o teor de 4% de vazios não deve ser absoluto, especialmente quando se trata de materiais porosos ou diferentes dos convencionais. A segunda fase de uma análise adequada de um projeto de uma mistura asfáltica deve contemplar também a avaliação mecânica e a trabalhabilidade.

Numa primeira fase deste estudo, foram avaliados, por exemplo, os módulos de resiliência e a resistência à tração de todos os teores de ligante pesquisados (Tavares *et al.*, 2011). Com isto foi possível ver que não havia grande influência do teor de ligante nestes parâmetros e assim, confirmou-se a decisão de adotar o teor de 6,5% como o de projeto.

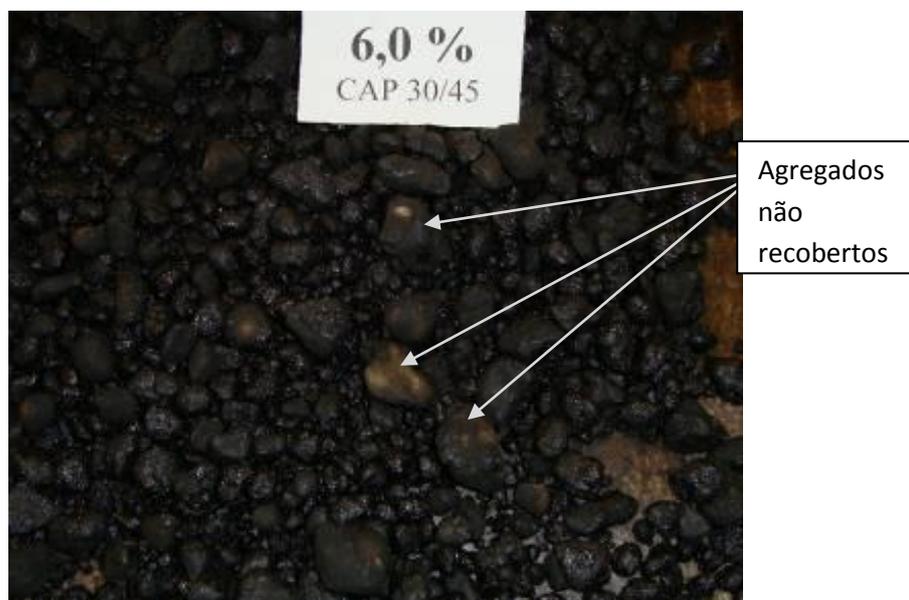


Figura 46: Agregados não recobertos com 6% de ligante - M01.

Os Vazios do Agregado Mineral (VAM) também não foram atendidos, mas, neste caso, admite-se que a norma foi elaborada para agregados naturais, com massas específicas menores e não para o agregado siderúrgico. Mesmo estando o valor de VAM fora do que preconiza a norma, foram moldados os corpos de prova da mistura M01 com 6,5% de ligante CAP 30/45 para serem submetidos aos ensaios mecânicos para verificação do seu comportamento. Para os ensaios mecânicos de MR, RT e fadiga, foram moldados corpos de prova de 10 cm de diâmetro e aproximadamente 6 cm de altura, todos no compactador giratório, com 75 giros, energia que é a recomendada pela norma AASTHO de SMA.

### 3.4.2 - Dosagem Mistura 02

A Mistura 02 compreende a mistura de agregados (agregado siderúrgico, pó de pedra e fíler natural) na proporção calculada pelo Bailey mais o ligante modificado por borracha

CAPFLEX-B. Também, tomou-se 6,0% como referência para o teor de ligante inicial, mesmo esperando um teor mais alto com asfalto borracha, mas como a norma cita este valor mínimo de ligante, este foi tomado por referência inicial. Na Tabela 29 está apresentado um resumo das quantidades de material retido em cada peneira para cada CP de 5300 g, em função de alguns dos teores de ligante selecionados para a dosagem (6; 6,5; 7; 7,5 e 8%). A dosagem, como no caso da mistura 01, foi feita com corpos de prova de 15 cm de diâmetro.

Tabela 29: Quantidade de materiais para moldar os CPs de  $\phi = 15\text{cm}$ , em função do teor de ligante - M02.

Peneira mm	6,0%			6,5%			7,0%			7,5%			8,0%		
	Escória	Pó Brita	Fíler												
25,4	23,1	0,0	0,0	23,0	0,0	0,0	24,6	0,0	0,0	22,7	0,0	0,0	22,6	0,0	0,0
19,1	161,7	0,0	0,0	160,9	0,0	0,0	172,1	0,0	0,0	159,2	0,0	0,0	158,3	0,0	0,0
12,5	1.024,4	0,0	0,0	1.018,9	0,0	0,0	1.089,8	0,0	0,0	1.008,0	0,0	0,0	1.002,6	0,0	0,0
9,52	1.294,0	0,0	0,0	1.287,1	0,0	0,0	1.376,6	0,0	0,0	1.273,3	0,0	0,0	1.266,4	0,0	0,0
4,75	1.132,2	8,6	0,0	1.126,2	8,6	0,0	1.204,5	8,5	0,0	1.114,2	8,5	0,0	1.108,1	8,4	0,0
2,36	23,1	160,3	0,0	23,0	159,5	0,0	24,6	158,6	0,0	22,7	157,8	0,0	22,6	156,9	0,0
1,18	7,7	186,2	0,0	7,7	185,2	0,0	8,2	184,2	0,0	7,6	183,2	0,0	7,5	182,2	0,0
0,6	15,4	91,4	0,0	15,3	90,9	0,0	16,4	90,4	0,0	15,2	89,9	0,0	15,1	89,4	0,0
0,3	19,3	100,8	0,0	19,2	100,3	0,0	20,5	99,8	0,0	18,9	99,2	0,0	18,8	98,7	0,0
0,15	53,9	105,2	0,0	53,6	104,6	0,0	57,4	104,0	0,0	53,1	103,5	0,0	52,8	102,9	0,0
0,075	65,5	86,2	13,5	65,1	85,7	13,4	69,6	85,3	13,3	64,4	84,8	13,2	64,1	84,4	13,2
Fundo	30,8	123,2	255,6	30,6	122,6	254,2	32,8	121,9	252,9	30,3	121,3	251,5	30,2	120,6	250,1
Ligante	318,0			344,5			371,0			397,5			424,0		

As densidades máximas medidas médias ( $G_{mm}$ ) obtidas no ensaio Rice para a mistura M02 estão na Tabela 30, sendo esta a média de três corpos de prova. Da mesma forma que na M01, foram feitas inúmeras repetições deste ensaio para cada teor de ligante testado na M02, até se conseguir definir estes valores apresentados, que atenderam ao limite de dispersão entre três resultados.

Tabela 30: Teor de ligante e  $G_{mm}$  - M02.

Teor de ligante (%)	$G_{mm}$
6,0	2,837
6,5	2,785
7,0	2,748
7,5	2,711
8,0	2,674

Seguindo as especificações da norma AASHTO M325-08, observando-se o Volume de vazios (Vv) e os Vazios do Agregado Mineral (VAM) é possível obter o teor de projeto da Mistura 02. A norma preconiza 4% de Vv e o VAM maior do que 17. Na Tabela 31 e na Figura 47, é possível observar os valores médios obtidos destes parâmetros.

Tabela 31: Teor de ligante, Volume de vazios e Vazios do Agregado Mineral - M02

Teor de ligante (%)	Gmm	Gmb	Vv (%)	VAM
6,0	2,837	2,634	7,1	13,7
6,5	2,785	2,636	5,8	14,1
7,0	2,748	2,610	5,0	15,4
7,5	2,711	2,604	3,9	16,0
8,0	2,674	2,579	3,5	17,3

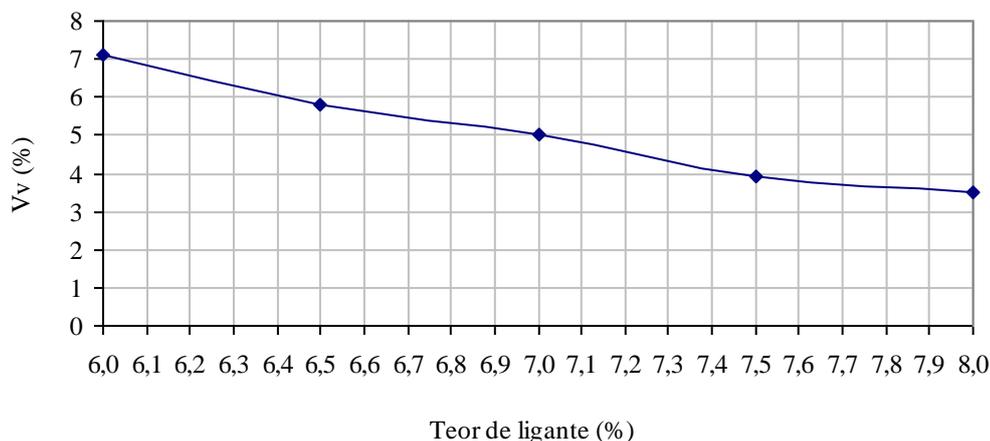


Figura 47: Gráfico teor de ligante *versus* Volume de vazios - M02.

Visualizando o gráfico, vê-se que o teor de ligante correspondente a 4% de vazios é de aproximadamente 7,5% e este teor foi tomado como valor de teor “ótimo”.

Não diferente da Mistura 01, os Vazios do Agregado Mineral (VAM) não foram atendidos, talvez porque a norma foi elaborada para agregados naturais e não para agregados siderúrgicos de densidade bem maior. Mesmo estando o valor de VAM fora do que preconiza a norma, a mistura foi submetida aos ensaios mecânicos para verificar o seu comportamento. Para a maioria dos ensaios mecânicos os corpos de prova foram moldados com 10 cm de diâmetro.

### 3.5 - Ensaio mecânicos realizados

Para avaliar as características técnicas das duas misturas de SMA dosadas, foram preparados corpos de prova para serem submetidos aos seguintes ensaios:

- Ensaio de escorrimto - executado segundo a norma AASHTO T 305/2009;
- Ensaio de dano por umidade induzida - segundo norma AASHTO T 283/07;
- Módulo de resiliência - executado segundo o método COPPE e Norma DNIT ME 135/2010;
- Resistência à tração indireta por compressão diametral - executado segundo a Norma DNIT 136/2010 - ME;
- Fadiga por compressão diametral a tensão controlada - executado segundo procedimento desenvolvido pela COPPE;
- Ensaio de *Flow Number* - executado segundo procedimento da Rede Temática de Asfalto (2010), baseado em NCHRP 465 (2002);
- Ensaio de simulador de tráfego LCPC - executado segundo procedimento Rede Temática de Asfalto (2010), baseado em normas francesas citadas adiante;
- Ensaio de simulador de tráfego APA (*Asphalt Pavement Analyzer*) - executado segundo procedimento proposto por SKOK *et al* (2003).

Naturalmente a descrição destes ensaios deveria vir neste capítulo de métodos. No entanto, optou-se por colocar a descrição sucinta de cada procedimento no próximo capítulo, para destacar os ensaios realmente definidores das características das misturas determinantes na decisão sobre a aplicabilidade dos agregados siderúrgicos testados em misturas do tipo SMA.

#### **4 - ENSAIOS MECÂNICOS E DE AVALIAÇÃO COMPLEMENTAR - DESCRIÇÃO SUCINTA**

Após a dosagem das misturas com o uso do agregado siderúrgico, as mesmas foram submetidas a ensaios mecânicos no teor “ótimo” de projeto com a finalidade de caracterização mecânica das características essenciais de um projeto de SMA incluindo o ensaio de escorrimento e as condições mecânicas. A moldagem dos corpos de prova (CPs) e as misturas dos agregados e ligantes (massas) obedeceram aos mesmos procedimentos descritos no capítulo anterior. A diferença dos corpos de prova utilizados para os ensaios mecânicos está na geometria dos mesmos, que na caracterização mecânica, foram de 100 mm de diâmetro e na dosagem de 150 mm. A exceção foi dos ensaios de deformação permanente: uns foram feitos em placas de 50 mm de espessura x 180 mm de largura x 500 mm de comprimento, moldadas em uma mesa compactadora própria (LCPC), e outros foram em CPs de 150 mm de diâmetro por 75 mm de altura (APA).

A quantidade de massa por corpo de prova foi estipulada de acordo com o volume de vazios de cada ensaio, sendo calculada a massa necessária para ocupar o volume do molde referente à determinada altura.

Antes do início dos ensaios de comportamento mecânico, também foi realizado o ensaio de escorrimento na mistura 01, para verificar a necessidade da adição de fibras. Optou-se pela realização do ensaio de escorrimento na mistura 01, pois a mesma é produzida com um ligante menos viscoso do que o asfalto borracha, ou seja, mais propício ao escorrimento, entre os dois utilizados.

O comportamento mecânico da mistura foi avaliado pelos ensaios seguintes: Módulo de Resiliência (MR), de Resistência à Tração estática por compressão diametral (RT), ensaio de adesividade entre o ligante e a escória, também conhecido por Dano por Umidade Induzida (Lottman / TSR), Fadiga, *Flow Number*, deformação permanente no equipamento APA e deformação permanente no simulador de tráfego. São apresentados a seguir cada um deles, de forma resumida e no próximo capítulo os respectivos resultados. Estes resultados são interpretados de forma a conduzir à conclusão sobre a aplicabilidade do agregado siderúrgico deste estudo em mistura do tipo SMA, com os ligantes escolhidos.

#### **4.1 - Ensaio de Escorrimento de Misturas Não Compactadas**

O ensaio de Determinação das Características de Escorrimento de Misturas Asfálticas não Compactadas, normatizado pela AASHTO T 305-09, avalia o quanto de material foi gotejado ou escorrido de uma amostra de mistura a quente, quando esta é mantida a temperaturas elevadas, comparável a de produção, de estocagem, de transporte e de espalhamento. De posse dos resultados do ensaio é necessário comparar estes aos limites aceitáveis de escorrimento para a mistura do tipo SMA que a norma AASHTO M325-08 estipula para não precisar de adição de fibra, limite de escorrimento de 0,3% no máximo.

O escorrimento ou gotejamento é considerado pela norma AASHTO T305-09 como sendo a porção de material que se separa da amostra disposta numa cesta vazada, e é depositada fora da cesta de arame durante o ensaio. Este material drenado pode ser ligante ou uma combinação de ligante, aditivos e/ou agregado miúdo.

Resumidamente, o ensaio consiste em preparar uma massa asfáltica, separar uma amostra de  $1200\text{g} \pm 200\text{g}$  e colocar em uma cesta de arame posicionada sobre um recipiente (Figura 48). O conjunto, cesta e recipiente são colocados na estufa (Figura 49) por período de  $60 \pm 5$  minutos. Ao fim do período, a cesta, com a amostra, junto com o recipiente de apoio, é retirada da estufa, sendo sua massa determinada. Se a temperatura da mistura baixar mais do que  $25^{\circ}\text{C}$  da temperatura de ensaio, o tempo de permanência na estufa aumenta para  $70 \pm 5$  minutos. Para cada mistura testada, as características de escorrimento devem ser determinadas para as duas diferentes temperaturas. As duas temperaturas devem ser: a temperatura de produção (mistura), e  $15^{\circ}\text{C}$  acima dessa temperatura.

Para que o tempo de permanência na estufa não interferisse no resultado do ensaio foi adotado, nas duas temperaturas, o tempo de 70 minutos. Ressalta-se também que, o cesto utilizado tem diâmetro de 130 mm, sendo a favor da segurança, pois deixa maior superfície propícia ao gotejamento.



Figura 48: Cesta de arame sobre o recipiente para o ensaio de escorrimento.



Figura 49: Conjunto do ensaio de escorrimento na estufa.

Como explicado, só foi realizado o ensaio na Mistura 01, visto que o ligante utilizado nesta é menos viscoso do que aquele utilizado na Mistura 02. Embora o teor de ligante da mistura 02 seja maior do que o da 01, não se percebia na massa solta nenhum excesso aparente de ligante que indicasse tendência ao escorrimento. Os corpos de prova moldados da mistura 02 também não apresentaram um aparente excesso de ligante.

O resultado do ensaio de escorrimento da M01 está mostrado na Tabela 32 e na Figura 50 está demonstrado que a quantidade gotejada foi muito pequena, não sendo considerável, apenas sujou o papel. Com o resultado do ensaio, é visto que não há necessidade de adição de fibras na mistura, visto que a norma AASHTO M325-08 preconiza a adição de fibras somente se o gotejamento ultrapassar 0,3%.

Tabela 32: Resultado do ensaio de escorrimento Mistura 01.

Teor de Ligante	CAP 30/45	
	Escorrimento médio (%)	
	T1 = 163°C	T2 = 178°C
6,50%	0,0	0,0



Figura 50: Resultado do ensaio de escorrimento da M01 deste estudo.

#### 4.2 - Módulo de Resiliência

Para analisar as características de deformabilidade de misturas asfálticas em circunstâncias dinâmicas e no regime viscoelástico é utilizado o ensaio de módulo de resiliência. O Módulo de Resiliência (MR) é definido como a relação entre a tensão de tração

( $\sigma_t$ ) gerada, pela tensão aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura asfáltica, e a correspondente deformação específica horizontal resiliente ou recuperável ( $\epsilon_r$ ).

Atualmente, o dimensionamento dos pavimentos flexíveis é realizado em muitos países e por algumas empresas brasileiras através de métodos mecanísticos que necessitam do módulo de resiliência das misturas asfálticas para a análise da estrutura, entre outros parâmetros.

O ensaio de MR é normatizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre através da norma DNIT 135/2010 - ME. Consiste em aplicar uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico regular. Esta carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga. Mede-se então o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, numa dada temperatura (T) expressa pela equação 11:

$$MR = \left( \frac{\sigma_t}{\epsilon_r} \right)_T \quad (11)$$

Os corpos de prova cilíndricos são de aproximadamente 100,0 mm de diâmetro e 60,0 mm de altura (Figura 51), no teor de projeto, moldados no compactador giratório. Durante a dosagem foram usados corpos - de prova de dimensões 150,0 mm de diâmetro e altura de 110,0 mm, em vários teores de ligante. Estes também foram aproveitados para serem submetidos ao ensaio de MR.



Figura 51: Exemplo de corpo de prova,  $\phi$  100 mm, usado nos ensaios de MR.

Os ensaios foram realizados em uma câmara climática (Figura 52) a uma temperatura de 25°C seguindo a metodologia adotada pelo Laboratório de Pavimentos da COPPE/UFRJ e atendendo as especificações da norma DNIT135/2010 - ME. Os CPs foram submetidos à compressão diametral distribuída ao longo de duas geratrizes opostas por meio de frisos curvos de carga, com aplicação de carga dinâmica durante 0,1 s e repouso de 0,9 s (frequência de 1 Hz para aplicação das cargas). O carregamento pulsante tem como objetivo simular a passagem da roda dos veículos no revestimento asfáltico.



Figura 52: Visão geral e detalhe do equipamento e amostra do ensaio de MR.

O MR pode ser calculado pela expressão (12) a seguir:

$$MR = \frac{F}{\Delta * H} * (0,9976\mu + 0,2692) \quad (12)$$

onde:

F = Carga vertical repetida aplicada diametralmente no CP;

$\Delta$  = Deformação elástica ou resiliente;

H = Altura do CP;

$\mu$  = Coeficiente de Poisson.

O ensaio de MR consiste em se aplicar vários níveis de carga, todos bem abaixo da resistência à tração do material. Considera-se como sendo o MR da mistura a média destes valores obtidos para um conjunto de no mínimo três corpos de prova.

### **4.3 - Resistência à Tração Indireta**

A Resistência à Tração (RT) de misturas asfálticas é obtida de forma indireta através do ensaio de compressão diametral, também conhecido como ensaio Brasileiro. O ensaio foi criado pelo professor Lobo Carneiro em 1943 inicialmente para avaliação da resistência à tração de concreto de cimento Portland e em 1972 passou a ser utilizado também para avaliação de misturas asfálticas.

Os ensaios de RT (Figura 53) foram realizados seguindo os procedimentos descritos na norma DNIT 136/2010 - ME, no Laboratório de Pavimentos da COPPE/UFRJ, a temperatura controlada de 25°C. O ensaio consiste em submeter ao corpo de prova a uma compressão diametral progressiva ao longo de duas geratrizes opostas, através de uma prensa mecânica, com uma velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s até a ruptura.



Figura 53: Vista geral e detalhe do equipamento do ensaio de RT.

A resistência à tração indireta é calculada através da equação 13.

$$RT = \frac{2F}{\pi * D * H} \quad (13)$$

onde:

RT = Resistência à Tração;

F = Carga de ruptura;

D = Diâmetro do corpo de prova;

H = altura do corpo de prova.

#### 4.4 - Dano por Umidade Induzida

A avaliação do dano por umidade é muito importante, visto que este está ligado ao desempenho e à durabilidade do pavimento. A adesividade entre o ligante e o agregado deve ser no mínimo satisfatória, pois problemas com adesividade podem ocasionar descolamento entre a película do ligante e o agregado acarretando desagregação no campo. Os problemas de adesividade podem ser corrigidos com o uso da cal, que é adicionada ao agregado, ou de aditivo melhorador de adesividade, também conhecido por DOPE, que é adicionado ao ligante.

O ensaio realizado, conhecido também por ensaio Lottman, é normalizado pela AASHTO T 283/07. Este consiste na avaliação da resistência à tração diametral (RT) de corpos de prova (CPs) em duas situações: submetidos ao condicionamento (saturação e aceleração ao condicionamento de água) e sem condicionamento. A relação entre as duas resistências (média de três CPs) é chamada de Relação de Resistência à Tração (RRT ou TSR).

O ensaio pode ser resumido em etapas descritas a seguir, ilustradas na Figura 54:

- ✓ Moldar seis CPs com Volume de vazios de  $7 \pm 0,5\%$ ;
- ✓ Separar três CPs para serem condicionados e três cps para não serem condicionados;
- ✓ Saturar os CPs condicionados entre 70 a 80% com auxílio de vácuo de 26mm Hg de 5 a 10 minutos;
- ✓ Cobrir cada amostra condicionada com um filme plástico;
- ✓ Colocar cada corpo de prova condicionado, em um saco plástico, contendo 10 ml de água e selar os sacos;
- ✓ Colocar as amostras em freezer a  $-18 \pm 3^{\circ}\text{C}$  por um período mínimo de 16 horas;
- ✓ Colocar as amostras em um banho a  $60 \pm 1^{\circ}\text{C}$  por 24 horas;
- ✓ Remover as amostras e colocar em banho de água a  $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  por 2 horas e
- ✓ Remover as amostras e submeter os corpos de prova com e sem condicionamento ao ensaio de RT.



Figura 54: Etapas do ensaio de dano por umidade induzida.

#### 4.5 - Fadiga

O pavimento está sujeito a cargas que atuam em curto intervalo de tempo quando os veículos trafegam sobre o mesmo e, em consequência, há perda progressiva da rigidez do material levando a pequenas degradações e a fadiga do mesmo. A fadiga pode ser definida como o fenômeno que ocorre quando cargas cíclicas produzem a ruptura nos materiais com carga menores que dos ensaios com cargas estáticas.

A vida de fadiga de uma mistura asfáltica é definida em termos de vida de fratura ou vida de serviço. A primeira se refere ao número total de aplicações de certa carga necessária para ocorrer à fratura completa da amostra. A vida de serviço se refere ao número total de aplicações dessa mesma carga que reduza o desempenho ou a rigidez da amostra a um nível preestabelecido (BERNUCCI *et al.*, 2008). Existem diversos ensaios para analisar a fadiga de um determinado material, tendo sido utilizado nesta pesquisa o ensaio de fadiga por compressão diametral de cargas repetidas, a tensão controlada.

O ensaio de fadiga à compressão diametral em corpos de prova cilíndricos foi feito com uma condição de carga dinâmica à Tensão Controlada (TC) por tração indireta, à frequência de 1Hz e tempo de carregamento de 0,1s, onde as cargas verticais devem induzir

tensões de tração horizontais no centro da amostra entre 10% e 40% da resistência à tração estática, a uma temperatura de  $25\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Pelo menos três corpos de prova cilíndricos foram submetidos a cada nível de tensão, e foram moldados no compactador giratório, no Laboratório de Pavimentação da COPPE/UFRJ, com 65mm de altura e 100mm de diâmetro.

A vida de fadiga pode ser expressa por diversas expressões que indicam o N, número de solicitação de carga; em termos das tensões ou das deformações iniciais, sendo k e n os parâmetros de fadiga determinados nos ensaios. Dentre as formas de representação usuais destacam-se as expressões seguintes:

$$N = k1\left(\frac{1}{\sigma_t}\right)^{n1} \quad \text{ou} \quad N = k2\left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{n2}$$

(14)

onde:

$\sigma_t$  = resistência á tração;

$\Delta\sigma$  = diferença de tensões (compressão - tração).

#### 4.6 - Deformação Permanente

Deformação permanente é um dos defeitos mais comuns da pavimentação asfáltica, podendo ser atribuída ao revestimento ou às subcamadas, ou ainda a uma combinação de defeitos, podendo ser localizada ou generalizada (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Na forma mais crítica, corresponde ao aparecimento de afundamento na trilha de roda, como ilustra a Figura 55, correspondente à contribuição tipicamente do revestimento asfáltico pelo tipo de formação com solevamento da massa (NASCIMENTO, 2008). Este é, em geral, um problema associado à dosagem da mistura asfáltica.

Para analisar o comportamento das misturas deste estudo à deformação permanente foram realizados três tipos de ensaios: *Flow Number*, Simulador de Tráfego LCPC e Simulador APA, que passam a ser descritos a seguir.



Figura 55: Afundamento de Trilha de Roda (NASCIMENTO, 2008).

#### 4.6.1 - *Flow Number*

O *Flow Number* é o parâmetro obtido através do ensaio uniaxial de cargas repetidas e que representa a eficiência do esqueleto pétreo no desempenho do mesmo quanto à deformação permanente. Este ensaio tem boa correlação com a previsão de deformação permanente medida com simuladores de tráfego, segundo Nascimento (2008). O ensaio representa o número de ciclos aplicados ao corpo de prova, onde começa a se verificar o cisalhamento a volume constante.

O resultado é apresentado num gráfico (Figura 56) de deformação permanente acumulada *versus* o número de ciclos aplicados. Neste, percebe-se a formação de uma curva dividida em três zonas: primária (côncava para baixo); secundária (reta) e terciária (côncava para cima). O número de ciclos onde ocorre a transição entre as zonas secundária e terciária é definido como *Flow Number* (FN) segundo Witczak *et al.* (2002).

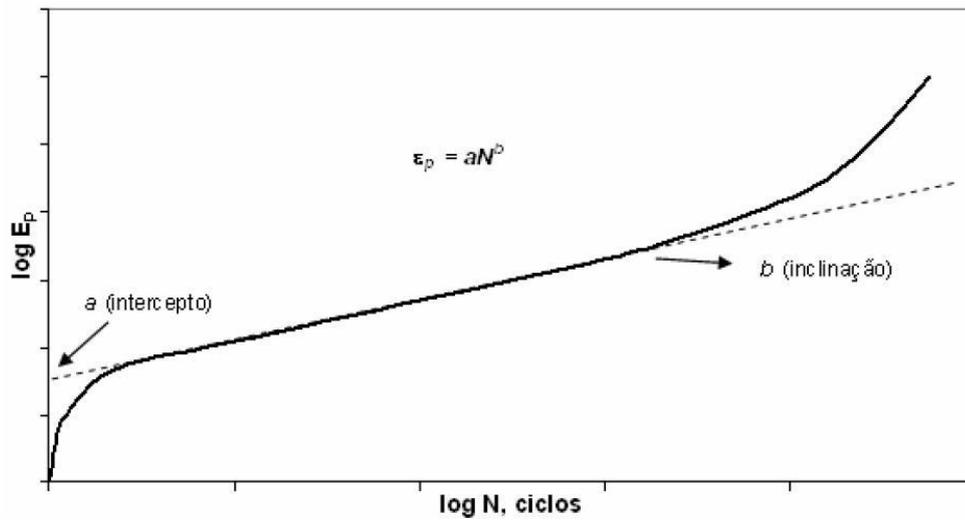


Figura 56: Gráfico *Flow Number* (WITCZAK *et al.*, 2002).

Os corpos de prova (Figura 57) para a realização do ensaio devem ser moldados com altura de 150 mm, diâmetro de 100 mm, e volume de vazios de  $7 \pm 0,5\%$ . O ensaio consiste na aplicação de cargas repetidas de 204 KPa em corpos de prova condicionados a uma temperatura de  $60^\circ\text{C}$ . Geralmente são ensaiados três corpos de prova por condição testada.



Figura 57: Corpos de prova para ensaio FN.

Nascimento (2008) comparou resultados deste ensaio com aqueles obtidos por simulador de tráfego LCPC e, sugeriu limites mínimos do número de ciclos FN para certos

volumes de tráfego para garantir bom desempenho quanto à deformação permanente no campo. Para tráfego médio o limite proposto é de 300 e para tráfego pesado o limite é de 750.

#### 4.6.2 - Simulador de Tráfego LCPC

Os ensaios de deformação permanente (Figura 58) no simulador francês foram realizados no Laboratório do CENPES / Petrobras. Para a moldagem das placas foi utilizada a metodologia preconizada pelo CENPES seguindo a especificação francesa AFNOR NF P 98-250-2 - *Préparation des Mélanges Hydrocarbonés*, enquanto que o ensaio propriamente dito seguiu a especificação AFNOR NF P 98-253-1 - *Déformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés*. Previamente à compactação das placas de ensaio, as misturas asfálticas foram condicionadas ao envelhecimento por um período de 2 horas na temperatura de compactação.



Figura 58: Equipamento para ensaio de deformação permanente - simulador de tráfego LCPC.

São moldadas placas (Figura 59) de mistura asfáltica produzidas com o teor asfáltico de projeto, mediante amassamento em uma mesa compactadora do tipo LCPC (Figura 60). As placas têm 180 mm de largura, 500 mm de comprimento, 50 mm de altura e pesam entre 11 e 12 kg de massa para agregados convencionais (AFNOR, 1991).



Figura 59: Placas de SMA com agregado siderúrgico deste estudo.



Figura 60: Mesa compactadora usada na fabricação das placas para o ensaio no simulador LCPC.

O procedimento para a realização do ensaio seguido pelo CENPES foi conduzido a 60°C, a deformação permanente medida foi em 15 pontos após 1.000, 3.000, 10.000 ciclos e ao final do ensaio.

No Brasil se tem procurado estabelecer valores máximos em torno de 5% após 30.000 ciclos devido às condições prevalentes no país, já que o clima é desfavorável quanto à deformação permanente, sendo este equipamento utilizado desde 1994 no laboratório da USP (MOTTA, 2011).

Para este estudo foram moldadas várias placas até que fosse conseguida a densidade aparente de projeto, para cada tipo de mistura. Como já comentado, o uso do agregado siderúrgico com densidades mais elevadas do que os agregados usuais interferiu muito na determinação do peso da massa a ser colocada na forma para a compactação, além das dificuldades oriundas da obtenção da Gmm. Assim, muitos ensaios com placas inicialmente moldadas com 11,8 kg ficaram com deformações muito maiores do que as admissíveis, inclusive com expulsão de parte da massa para fora do molde. Foram necessárias várias tentativas para chegar a uma condição de moldagem considerada próxima da ideal. Para cada uma das misturas M01 e M02 foram ensaiadas 02 placas cujos resultados estão apresentados no próximo capítulo.

Onofre *et al* (2011) também relatam dificuldade de reproduzir os vazios obtidos no compactador giratório na mesa compactadora de preparação das placas para ensaio no simulador, para misturas asfálticas com escória e com resíduo da construção e demolição (RCD). Comparando um concreto asfáltico com agregados convencionais com concretos asfálticos com 50% deste mesmo agregado e 50% de escória, e outro com 50% deste mesmo agregado e 50% de RCD, obtiveram melhor desempenho da mistura convencional (4%), seguida da mistura com escória (6%) e em terceiro a mistura com RCD (9%).

#### **4.6.3 - Simulador de Tráfego APA**

O simulador de tráfego APA ou Analisador de Pavimento Asfáltico (*Asphalt Pavement Analyzer*), foi criado em meados da década de 1980 pelo Departamento de Transporte da Geórgia (EUA) com a finalidade de analisar por um método simplificado as características de deformação plástica de misturas asfálticas. O equipamento APA também pode ser utilizado para analisar o trincamento por fadiga e a suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas.

O equipamento permite analisar a deformação permanente em dois tipos de corpos-de-prova: em placa compactada em mesa vibratória ou em corpos de prova cilíndricos moldados no compactador giratório. O corpo de prova cilíndrico (Figura 61) tem dimensões de 150 mm de diâmetro por 75 mm de altura. O corpo de prova cilíndrico foi o escolhido para ser fabricado e testado no presente estudo. O Volume de vazios ( $V_v$ ) em ambos os tipos de corpos de prova é de  $7\pm 1\%$  (SKOK *et al.*, 2002).



Figura 61: Corpos de prova após o ensaio de APA (A) M02 (B) M01.

No ensaio com o APA, a simulação do tráfego é feita pela passagem das rodas metálicas sobre mangueiras, com pressão interna ajustada para 100 psi (690 kPa), sob carga vertical aplicada de 445 N. As temperaturas para o ensaio APA pode variar de 35 a 70°C. O tempo de teste é de aproximadamente 135 minutos para 8.000 ciclos. A deformação permanente média aceitável é de 7 mm após 8000 ciclos (SKOK *et al.*, 2002).

O equipamento APA (Figura 62) usado no presente estudo pertence ao Laboratório da PETROBRAS Distribuidora, localizado na Cidade Universitária da UFRJ. O equipamento conta com um sistema de aquisição de dados automatizado, composto por um computador, um monitor e um *software* para medir o afundamento de trilha de roda.



Figura 62: Equipamento APA da Petrobras Distribuidora usado no presente estudo.

Os corpos de prova utilizados foram os cilíndricos, condicionados a uma temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$  e submetidos a 8.000 ciclos (Figura 63) com a pressão interna da mangueira de 100 psi e carga nas rodas metálicas de 445 N.



Figura 63: Detalhe de dois corpos de prova deste estudo sendo ensaiado no APA.

## **5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Os resultados aqui apresentados são referentes às misturas 01 e 02, preparadas nos respectivos teores de ligante de projeto: M01 de 6,5% e M02 de 7,5%. O resultado do ensaio de escorrimento foi apresentado no item 4.1 e os demais resultados estão nos itens a seguir.

### **5.1 - Módulo de Resiliência**

Os ensaios de módulo de resiliência foram realizados conforme descrito no item 4.2, a temperatura de 25°C. Os resultados apresentados referem-se ao teor de projeto de cada mistura. Cada um dos 3 corpos de prova de cada mistura foi submetido a três níveis de cargas, e os valores de MR admitidos de cada corpo de prova é sempre a média dos MRs obtidos nesses três ciclos. O valor de MR adotado para a mistura é a média dos valores de MR admitidos de cada corpo de prova, após análise de dispersão. Este procedimento estatístico é o adotado pelo laboratório de pavimentação da COPPE para determinação do MR, para um nível de confiança de 95%.

Os resultados referentes aos corpos de prova de 100 mm de diâmetro das misturas no teor de projeto da Mistura 01 e 02 estão na Tabela 33 e Figura 64. Os resultados da mistura com CAP 30/45 podem parecer muito elevados a primeira vista, mas tem sido relativamente comum encontrar esta ordem de grandeza para concretos asfálticos com ligantes deste tipo originários da REDUC, como pode ser visto, por exemplo, em Ramos (2003), que mostra um valor de 8370 MPa, Cavalcanti (2010) que apresenta MR de 9385 MPa, entre outros nesta ordem, ou em Freitas (2007), também com escória, mostrado na revisão bibliográfica. No entanto, não parece ser um valor adequado para misturas do tipo SMA que em geral são usadas em espessuras pequenas.

Tabela 33: Resultados do MR deste estudo.

Mistura	MR (MPa)	MR médio (MPa)	Desvio Padrão
01	8755	9031,3	404,01
	8844		
	9495		
02	2951	3140,0	215,71
	3094		
	3375		

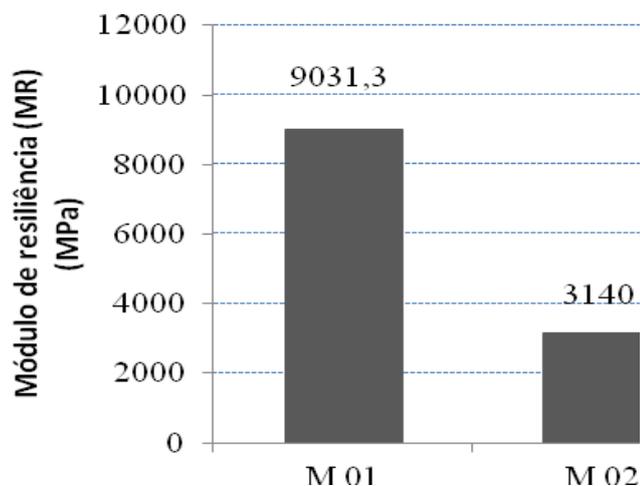


Figura 64: Resultado do MR médio (três amostras) das Misturas 01 e 02 deste estudo.

A título de comparação citam-se na Tabela 34 valores de MR de SMA com agregados minerais e com escória obtidos por alguns dos trabalhos consultados nesta pesquisa. Pode-se notar que a ordem de grandeza dos MR para misturas com agregados convencionais ou com escória estão na mesma ordem de grandeza dos obtidos neste trabalho com o asfalto borracha.

Tabela 34: Valores de MR de SMA com agregados minerais britados e com escória de aciaria.

Referência	Tipo Agregado	Tipo Ligante	Teor Ligante (%)	MR (25°C) MPa
Babadopulos <i>et al</i> (2008)	Brita	50/70	5,9	3.121
Yi (2008)	Escória	80/100	5,5	3.993
	50% Escória + 50% brita			3.579
Mourão (2003)	Brita + filer pó de pedra	50/70	6,5	2.220
		AMP (6,5% SBS)	6,5	2.034
Vasconcelos (2004)	Brita	50/60	6,7	4.747
			6,9	3.367
Silva (2005)	Brita	50/60	6,5	6.616
Vale <i>et al</i> (2007)	Brita	50/70	5,9	3.429

O alto valor do MR da Mistura 01 está ligado ao tipo de ligante utilizado (CAP 30/45) e ao fato das misturas terem sofrido envelhecimento por duas horas na estufa conforme procedimento de simulação da usinagem e transporte previsto pela norma ABNT NBR 15897/2010 de preparação de amostras para ensaios mecânicos.

Os valores de módulos da M02 foram muito menores do que os obtidos para a Mistura 01 devido ao tipo de ligante utilizado na Mistura 02 (CAPFLEX-B) que, embora seja um asfalto de viscosidade elevada, resulta em alta flexibilidade da mistura tendo em vista a presença da borracha.

## 5.2 - Resistência à Tração Indireta

Os ensaios de resistência à tração indireta foram realizados conforme descrito no item 4.3, a temperatura de 25°C. Para cada mistura foram realizados ensaios de resistência à tração, em dois conjuntos de três corpos de prova: um conjunto virgem e outro após o ensaio de módulo de resiliência. Os resultados referentes aos corpos de prova de 100 mm de diâmetro das misturas no teor de projeto da Mistura 01 e 02 estão na Tabela 35. Na Tabela 36 estão apresentados valores de RT de literatura para comparação. Percebe-se que os valores obtidos neste estudo com o ligante asfalto borracha é da mesma ordem de grandeza dos levantados nas referências citadas. A discrepância, de novo, é a mistura com o CAP 30/45 deste estudo.

Tabela 35: Resultados de resistência à tração das misturas M01 e M02 deste estudo.

Mistura	AMOSTRA VIRGEM		APÓS ENSAIO DE MÓDULO	
	RT (MPa)	RT médio (MPa)	RT (MPa)	RT médio (MPa)
01	2,02	2,00	1,42	1,60
	2,04		1,73	
	1,94		1,64	
02	0,99	0,98	0,89	0,87
	0,99		0,87	
	0,97		0,86	

Tabela 36: Resultados de resistência à tração deste estudo e de outros autores.

Referência	Tipo Agregado	Tipo Ligante	Teor Ligante (%)	RT (25°C) MPa
Babadopulos <i>et al.</i> (2008)	Brita	50/70	5,9	0,76
Yi (2008)	Escória	80/100	5,5	0,90
	50% Escória + 50% brita			0,80
Mourão (2003)	Brita + filer pó de pedra	50/70	6,5	0,79
		AMP (6,5% SBS)	6,5	0,90
Vasconcelos (2004)	Brita	50/60	6,7	0,98
			6,9	0,82
Silva (2005)	Brita	50/60	6,5	1,06
Vale <i>et al.</i> (2002)	Brita	50/70	5,9	0,91
Este estudo	Escória	Asfalto borraça	7,5	0,92

Embora a diferença entre os resultados encontrados na condição virgem e após o ensaio de módulo de resiliência tenha sido muito maior do que a habitualmente encontrada nas misturas asfálticas convencionais foi feita também a média dos resultados com os seis corpos de prova, mostradas na Figura 65.

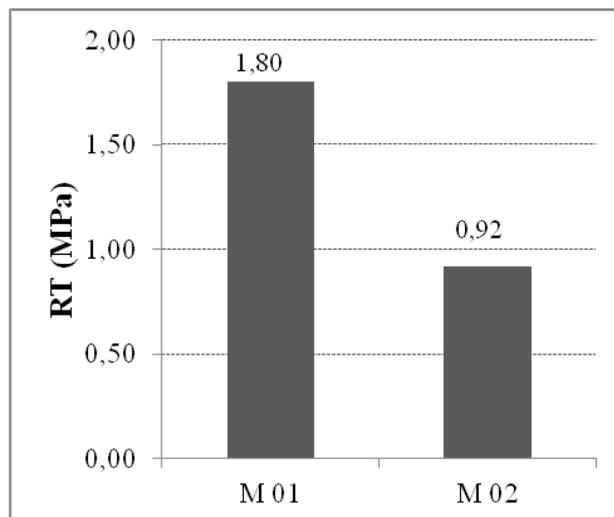


Figura 65: Resultados médios de RT das Misturas 01 e 02 deste estudo.

A diferença encontrada nos valores de resistência à tração das misturas se dá pelo ligante utilizado na M01 ser um ligante mais duro e menos viscoso do que o asfalto borracha. Foi percebida a penetração do ligante CAP 30/45 nos poros superficiais dos agregados siderúrgicos (Figura 66), o que deve ter aumentado a resistência à tração da M01. Esta penetração não foi percebida no caso da M02 com asfalto-borracha.

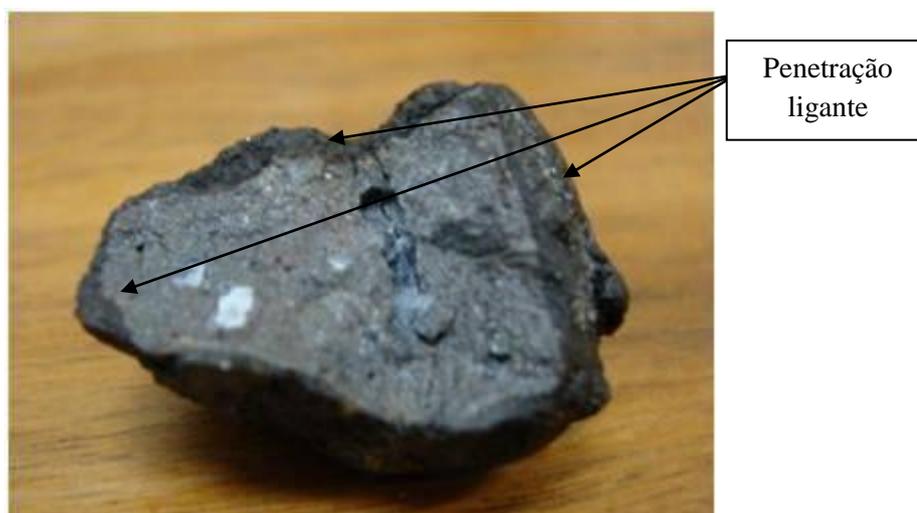


Figura 66: Detalhe da penetração do ligante CAP 30/45 num agregado siderúrgico deste estudo.

### 5.3 - Dano por Umidade Induzida

Os ensaios de dano por umidade induzida foram realizados conforme descrição no item 4.4. O ensaio só foi realizado na mistura 01, considerando que é mais propícia ao dano pelo menor teor de ligante e por alguns agregados apresentarem uma aparência de falta de ligante ao fim do condicionamento do método: o ligante CAP 30/45, devido a sua viscosidade e a alta absorção do agregado penetra no mesmo, como visto na Figura 67.

Os resultados obtidos da resistência à tração indireta e da relação de Resistência à Tração Retida (RRT) estão na Tabela 37.

Tabela 37: Resultado de RT - ensaio de dano por umidade induzida.

Resistência Média (Condicionado) (MPa)	1,06
Resistência Média (Seco) (MPa)	1,33
% RRT (Resistência à tração retida)	79,8

O valor de RRT bem próximo dos limites especificados pela norma de misturas SMA AASHTO M 325-08 de 80%. A pequena diferença no valor de 79,8 se justifica pelo resultado de RRT ser calculado levando em conta a média entre os três corpos de prova com e sem condicionamento. Portanto, o agregado apresenta boa adesividade ao ligante e pode ser utilizado em mistura do tipo SMA sem uso de melhorador de adesividade.

### 5.4 - Fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados conforme descrito no item 4.5. As duas misturas foram ensaiadas (M01 e M02) a tensão controlada, a 25°C. Nas Figuras 67 e 68 estão mostradas as curvas de fadiga das misturas M01 e M02, respectivamente, em função da diferença de tensões e da deformação inicial. As fichas dos ensaios estão apresentadas no Anexo I.

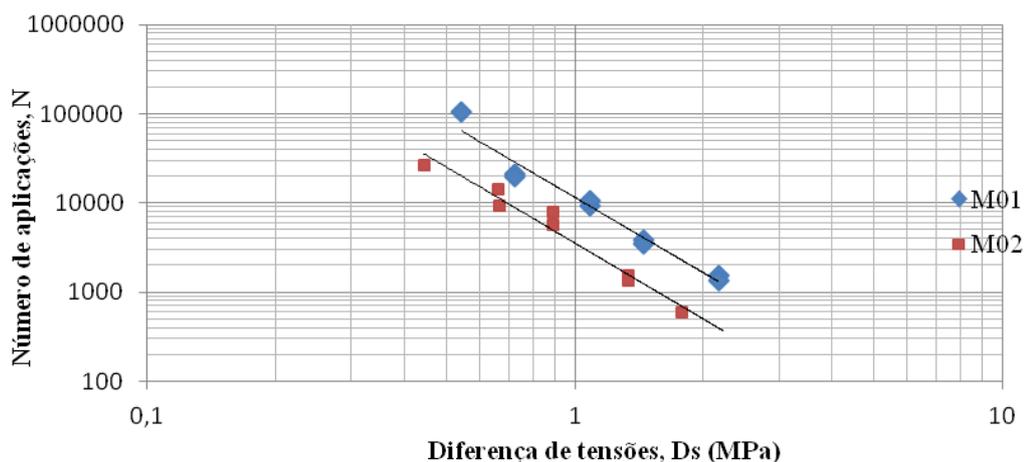


Figura 67: Vida de fadiga *versus* diferença de tensões das misturas M01 e M02 deste estudo.

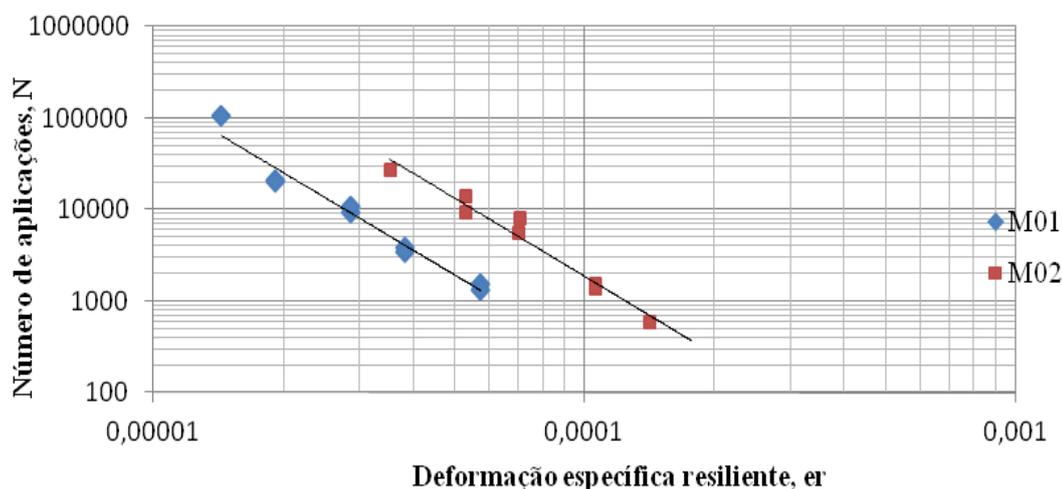


Figura 68: Vida de fadiga *versus* deformação específica resiliente das misturas M01 e M02 deste estudo.

Na Tabela 38 mostram-se os valores dos parâmetros da equação da vida de fadiga em função da diferença de tensões e em função da deformação específica resiliente das misturas ensaiadas neste estudo. Não é possível uma comparação direta entre estas duas curvas tendo em vista que os módulos de resiliência das misturas são muito diferentes. Portanto, para testar a influência destas misturas na vida de fadiga é preciso usar um estudo paramétrico, testando em uma ou mais estruturas de pavimento. Assim, foi feita uma simulação de tempo de vida de cada uma das misturas num pavimento arbitrário como mostrado a seguir.

Para comparação também estão apresentados na Tabela 38, alguns resultados de vida de fadiga obtida para misturas SMA com agregados convencionais, pelo mesmo tipo de ensaio, obtidos por Mourão (2003) e Vasconcelos (2004).

Tabela 38: Parâmetros obtidos das curvas de fadiga deste estudo.

Mistura	Ligante	$N = K1 * \Delta\sigma^{n1}$ ou $N = K2 * \varepsilon_r^{n2}$			$R^2$
		K1	K2	n1, n2	
M-01	CAP 30/45	11.527	$2^{-09}$	-2,811	0,96
M-02	CAPFLEX-B	3.342	$2^{-09}$	-3.017	0,97
Mourão (2003)	AMP	6.324	$2^{-13}$	-4,22	0,96
Vasconcelos (2004)	50/60	170.888	-	-6,02	0,97
		12.854	-	-5,55	0,99

De posse dos dados do ensaio, foram realizadas simulações com o programa SisPav, elaborado por FRANCO (2007). O modelo de comportamento de fadiga existente no programa é em função da deformação específica e do MR, como mostrado na equação 15, como um modelo genérico. Para a simulação deste estudo, adotou-se o fator de regressão K3 igual a zero e assim foi possível a análise com as equações obtidas pelos ensaios de fadiga das misturas desta pesquisa (Tabela 38).

$$N = fcl * K1 * \varepsilon_t^{K2} * MR^{K3} \quad (15)$$

onde:

$N$  = Vida de fadiga;

$fcl$  = Fator campo laboratório;

$K1$  = Coeficiente de regressão;

$K2$  = Coeficiente de regressão;

$K3$  = Coeficiente de regressão;

$MR$  = Módulo de resiliência da mistura asfáltica (MPa);

$\varepsilon_t$  = Deformação específica de tração.

Para a simulação deste estudo, adotou-se o fator de regressão K3 igual a zero e assim foi possível a análise com as equações obtidas pelos ensaios de fadiga das misturas desta pesquisa (Tabela 38). Para o fator campo laboratório, foi adotado o valor de  $10^4$  que foi proposto por Pinto (1991), com base em avaliação de campo para concreto asfáltico, por falta de outro valor típico para SMA.

Os dados de tráfego, carregamento e de todas as camadas do pavimento simulado considerado para verificação do dimensionamento da camada de revestimento de mistura asfáltica, tanto para a M01 quanto para a M02, foram os seguintes:

- Revestimento M01 com espessura de 8 cm; MR = 9.031 MPa;
- Revestimento M02 com espessura de 8 cm; MR = 3.139 MPa;
- Base de brita graduada tratada com cimento com espessura de 15 cm; MR = 2.000 MPa;
- Sub-base de solo granular laterítico, com espessura de cm; MR =  $540 \sigma_3^{0,4} \sigma_d^{-0,2}$ ;
- Subleito de solo medianamente deformável, MR = 150 MPa;
- Número N para 10 anos:  $N = 5 \times 10^7$
- Carga do eixo = 8,2 tf;
- Pressão dos pneus = 0,56 MPa;
- Mês de abertura de tráfego = Janeiro;
- Região = Rio de Janeiro;
- Nível de confiabilidade: 95%.

A espessura de 7 cm não é usual no Brasil para SMA. No entanto, como o TNM dos agregados siderúrgicos usados no presente estudo foi de 19 mm, adotou-se esta espessura maior do que a praxe atual. No entanto, para minimizar esta adoção, esta foi considerada a única camada de revestimento. Nas Figuras 69 e 70 são mostrados as telas da verificação da vida de fadiga feita com o SisPav, para a M01 e nas Figuras 71 e 72 para a M02.

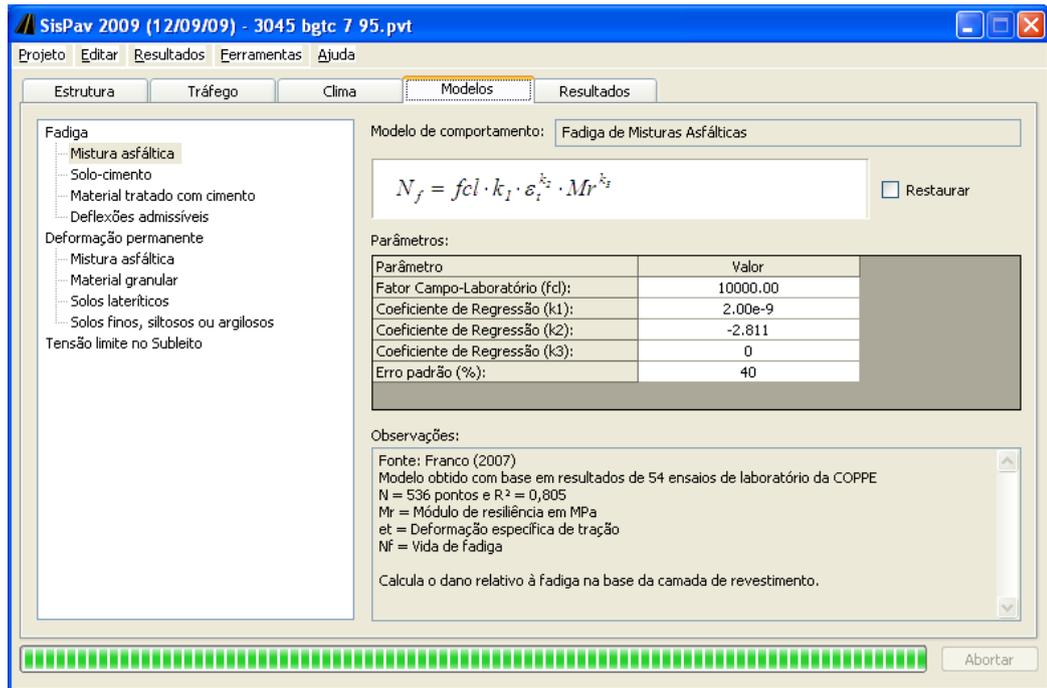


Figura 69: Tela do programa SISPAV - Critério de fadiga para dimensionamento de pavimento para a mistura M01.

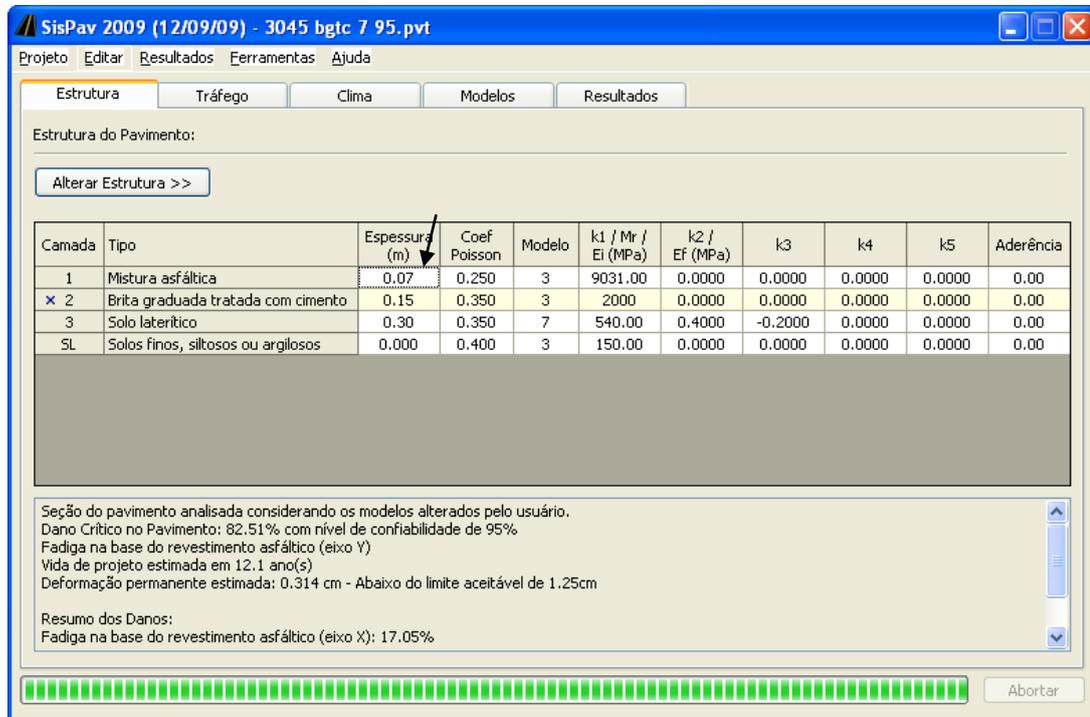


Figura 70: Tela do programa SISPAV - Estrutura analisada no dimensionamento de pavimento para a mistura M01.

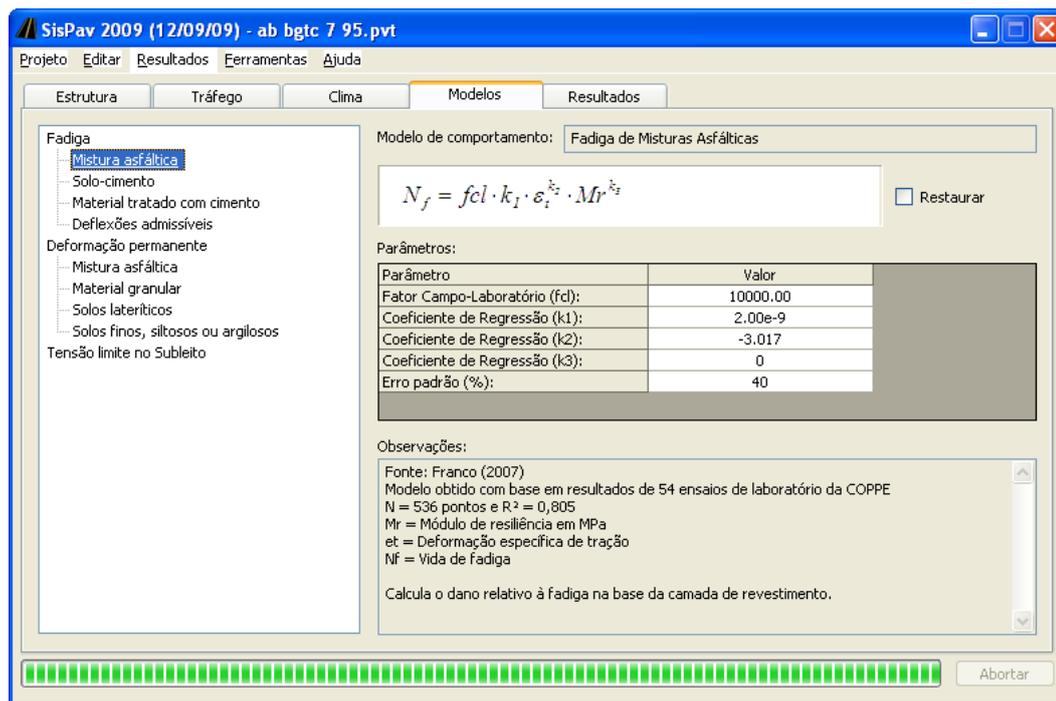


Figura 71: Tela do programa SISPAV - Critério de fadiga para dimensionamento de pavimento para a mistura M02.

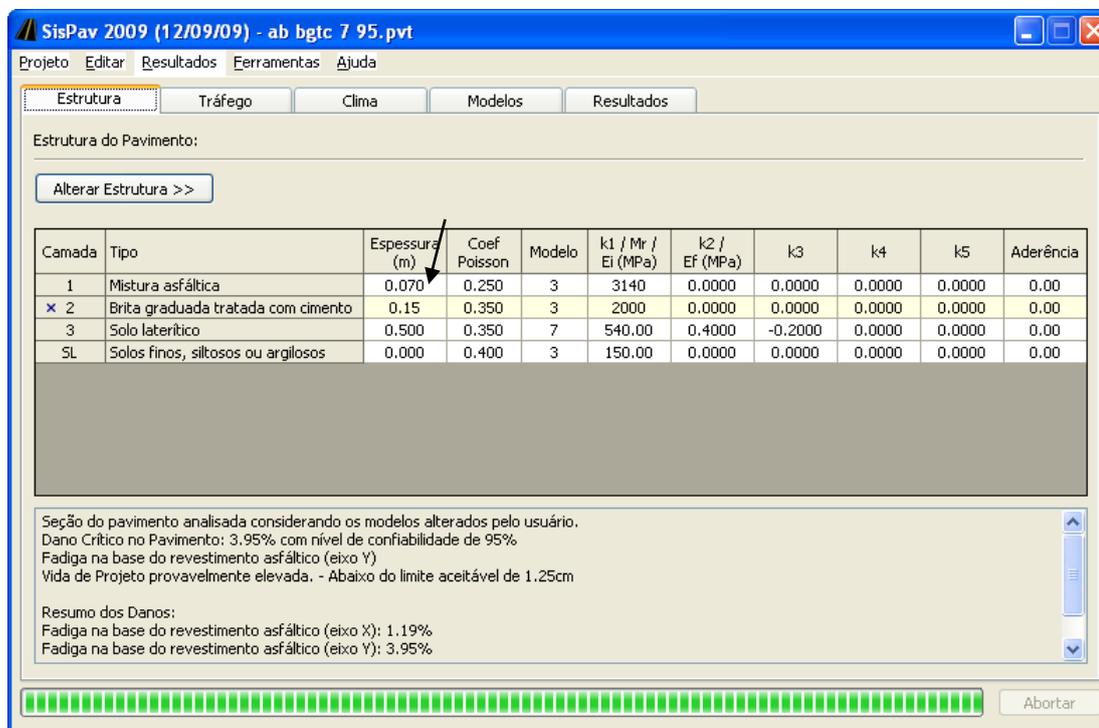


Figura 72: Tela do programa SISPAV - Estrutura analisada no dimensionamento de pavimento para a mistura M02.

Observa-se que as duas misturas satisfariam o período de projeto de 10 anos, para o tráfego expresso pelo N de projeto, para uma confiabilidade de 95%. No caso do SMA com asfalto borracha, o consumo de fadiga ficou muito baixo e eventualmente a espessura poderia ser diminuída. No entanto, como o valor do MR da mistura é muito próximo do MR da brita graduada tratada com cimento, adotada para a base, é necessário se verificar se esta camada também passaria no teste de fadiga antes de diminuir a espessura. Como não é objeto desta dissertação esta verificação, esta não foi feita.

Observa-se que a Mistura 02 (CAPFLEX-B) apresenta melhor comportamento à fadiga nesta situação testada. É sabido que a recuperação elástica do ligante por conter borracha tende ser mais “flexível” suportando assim as solicitações do tráfego em termos de fadiga por um período bem maior se comparada à mistura com CAP convencional. Na prática internacional, o uso de asfalto modificado é recomendado para misturas tipo SMA.

No caso da previsão do afundamento de trilha de roda, a previsão foi feita com os modelos internos do programa, como contribuição de todas as camadas, não sendo possível adaptá-los para as duas misturas estudadas. Portanto não é possível avaliar adequadamente a adequação desta previsão pelo programa SisPav, nesta versão utilizada. No caso das misturas asfálticas, a melhor forma de evitar problemas de deformação permanente é fazendo as verificações de critérios estabelecidos para a fase de projeto e dosagem da mistura, como se verá em seguida.

## **5.5 - Deformação Permanente**

### **5.5.1 - *Flow Number***

Os ensaios de *Flow Number* (FN) foram realizados conforme descrito no item 4.6.1. Os ensaios foram realizados no laboratório CENPES/Petrobras numa prensa MTS. O FN foi obtido para as duas misturas com o agregado siderúrgico, e os resultados são apresentados na Tabela 39 para a M01 e M02, resultado de três corpos de prova para a M01, e dois para a M02, visto que um corpo de prova não foi ensaiado devido a irregularidades presentes em

uma das extremidades. Com o objetivo de melhor visualização dos valores médios foram plotados num gráfico mostrado na Figura 73.

Tabela 39: Ciclos de FN.

Mistura	Ligante	Teor de ligante (%)	FN - Ciclos
M01	CAP 30/45	6,5	315
			369
			426
M02	CAPFLEX-B	7,5	1230
			890
			-

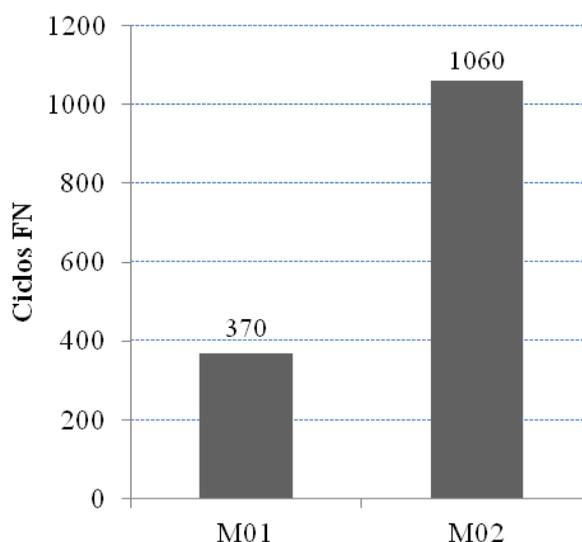


Figura 73: Ciclos médios de FN para as misturas deste estudo.

Portanto, os corpos de prova analisados atendem com folga os limites propostos por Nascimento (2008) para tráfego médio que é de 300. Para tráfego pesado, o valor de FN proposto é de 750, portanto por este critério somente a M02 é indicada para tráfego pesado. De acordo com os resultados de *Flow Number*, pode-se concluir que o esqueleto pétreo está com bom intertravamento e provavelmente terá bom desempenho quanto à deformação permanente e afundamentos. Não é fácil justificar as diferenças obtidas entre as duas misturas tendo em vista que o esqueleto pétreo é semelhante, e este determina a maior parte da resistência à deformação permanente. No caso do teor de ligante, a M02 tem maior do que a M01, o que teoricamente poderia ser até mais desfavorável.

### 5.5.2 - Simulador de Tráfego LCPC

Os ensaios de deformação permanente com o uso do Simulador LCPC foram realizados conforme descrito no item 4.6.2, no laboratório do CENPES. As massas foram misturadas na COPPE no Misturador BBMAX e logo após foram levadas para o CENPES para serem condicionadas ao envelhecimento por duas horas. Foi também realizado o ensaio de densidade das placas com o objetivo de verificar o volume de vazios para determinada massa. Para a M01 o Volume de vazios foi de 5,9% e para a M02 foi de 7,4%. Para o ensaio de densidade as placas foram retiradas do molde e depois reintroduzidas. Esta prática pode ter interferido nos resultados.

Os ensaios não foram levados até ao final dos 30.000 ciclos da norma, visto que as M01 e M02 deformaram excessivamente como mostram as Figuras 74 e 75. Assim, o ensaio só chegou a 7.000 ciclos com deformações de 10% para a M01 e 13% para a M02. Este resultado foi oposto ao obtido no FN, embora aparentemente mais coerente com o teor de ligante maior presente na M02 do que na M01.



Figura 74: Deformação final da placa da M01 deste estudo no simulador LCPC.



Figura 75: Deformação final da placa da M02 deste estudo no simulador LCPC.

As placas foram analisadas para verificar o motivo da alta deformação, fato não esperado pelos altos valores de FN obtidos e todos os outros ensaios mecânicos realizados. No entanto, o problema não foi solucionado após várias tentativas de moldagens. Sugere-se novas tentativas de preparação de placas com as misturas com agregado siderúrgico para melhor avaliar este parâmetro. No entanto, o tempo deste estudo se esgotou sem que fosse possível resolver esta questão já que para a realização dos ensaios também se dependia de outro laboratório.

Onofre *et al.* (2011) também relatam problemas relativos a este ensaio com misturas com agregados alternativos. Os autores concluem que: “Ao se levar as misturas compactadas no CGS (giratório) para a mesa compactadora, a volumetria das mesmas e a resistência à deformação permanente mudaram consideravelmente, principalmente para as misturas com resíduos, não apresentando boas correlações com as variáveis de densificação.”

No presente estudo, também não há concordância entre o bom desempenho das misturas tipo SMA com agregado siderúrgico nos ensaios de FN e APA (como será visto adiante), e este resultado não conforme do simulador. O tipo de compactação influenciou muito, devendo ser feito um estudo mais detalhado para se obter a correspondência entre energias da mesa e do giratório em termos de vazios resultantes.

Para verificar se o problema estava na massa ou na forma de compactação foram preparados quatro corpos de prova de 150 mm de diâmetro por 75 mm de altura para serem ensaiados no APA, sendo dois corpos de prova para cada mistura, como será apresentado a seguir.

### 5.5.3 - Simulador de Tráfego APA

Os ensaios de deformação permanente com o uso do APA foram realizados conforme descrito no item 4.6.3, no laboratório da PETROBRAS Distribuidora.

Nas Tabelas 40 e 41 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio APA para a M01 e M02, respectivamente, da forma como é gerado o resultado no computador do equipamento.

Para melhor visualização dos resultados, o próprio programa do APA gera um gráfico ao longo do ensaio, apresentado na Figura 76, para as duas misturas: Mistura 01 e Mistura 02, sendo dois corpos de prova de cada mistura. O gráfico apresenta como LEFT (em vermelho) as deformações médias da Mistura 01 (CAP 30/45) e como RIGHT (em azul) as deformações médias da Mistura 02 (CAPFLEX-B) ao longo do ensaio.

Tabela 40: Resultado do APA para a M01.

Left Sample ID	30/45		Bulk S Gravity				
	Temperature		Depth Gauge Reading				
STROKE COUNT	F	C	1	2	3	4	5
0	32	0					
25	140	60	0,119	0,239	0,000	0,134	0,522
4000	140	60	4,417	4,745	0,000	4,924	5,417
8000	140	60	6,028	6,819	0,000	6,207	6,491
8000	32	0					

Tabela 41: Resultado do APA para a M02.

Right Sample ID	flex-b		Bulk S Gravity				
	Temperature		Depth Gauge Reading				
STROKE COUNT	F	C	1	2	3	4	5
0	32						
25	140	60	0,104	0,209	0,000	0,179	0,358
4000	140	60	3,085	3,025	0,000	2,727	3,293
8000	140	60	4,411	4,488	0,000	4,322	5,141
8000	32						

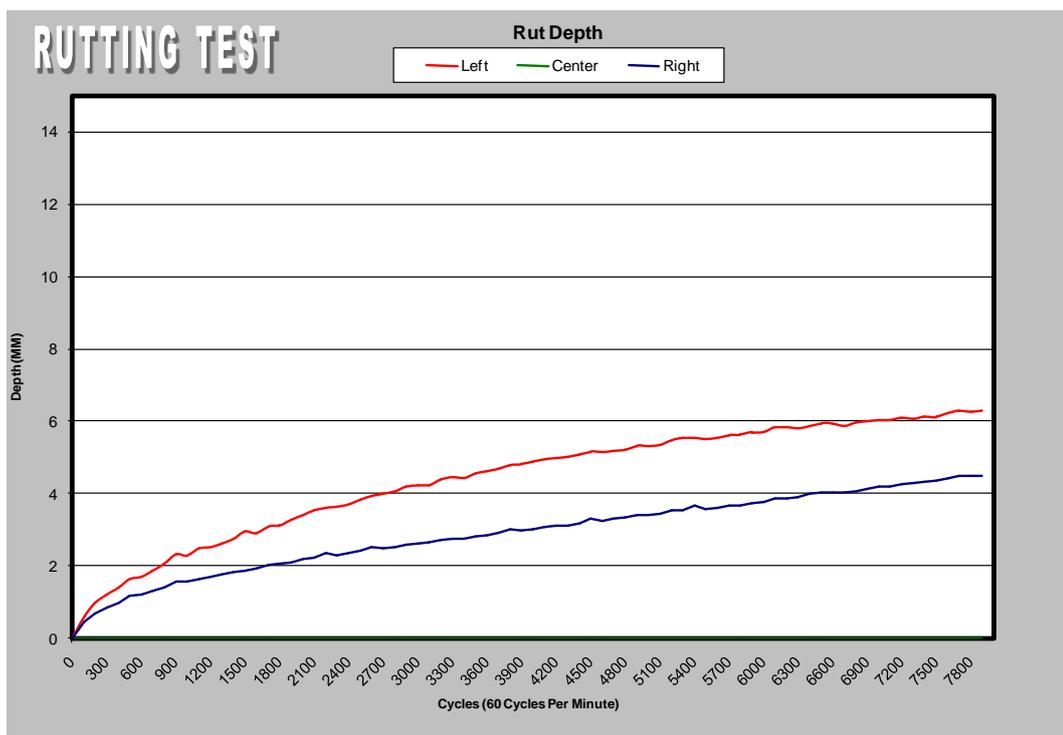


Figura 76: Gráfico de deformação do APA para as amostras de M01 e M02 deste estudo.

Analisando o gráfico e as tabelas obtêm-se os resultados de 6,49cm de afundamento para a M01 e de 5,14 para a M02. Conclui-se que os resultados estão dentro do limite estabelecido (7,0 mm de afundamento) pelo relatório de ensaio elaborado por SKOK *et al.* (2002) e coerentes com os resultados obtidos no *Flow Number*.

Assim, pode-se supor que as misturas preparadas com o agregado siderúrgico do presente estudo devem apresentar bom comportamento quanto à deformação permanente já que por dois critérios apresentaram desempenho satisfatório.

O ensaio do LCPC pode ser mais severo tendo em vista o tipo de esforço que provoca pelo deslocamento da roda diretamente sobre a placa. Mas, principalmente, há questionamentos sobre os resultados obtidos: embora tenham sido moldadas inúmeras placas para este ensaio, ainda se tem dúvidas se estas que foram ensaiadas estavam na condição ideal tendo em vista que foram desmoldadas para serem submetidas ao ensaio de densidade aparente e depois reinseridas no molde, o que pode ter abalado seu esqueleto pétreo.

## 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

### 6.1 - Conclusões

O presente estudo teve como objetivo principal avaliar o uso do agregado siderúrgico em misturas asfálticas do tipo SMA. Foi realizada a caracterização dos agregados e dos ligantes, dosadas e ensaiadas duas misturas sob vários tipos de solicitações: ensaios físicos e mecânicos. Os ensaios mecânicos foram: Dano por Umidade Induzida, Módulo de Resiliência, Resistência à Tração, *Flow Number*, Simulador LCPC e APA.

Analisando os ensaios realizados foi possível chegar às seguintes conclusões:

1. O agregado siderúrgico graúdo testado atende as características principais para o uso em mistura asfáltica do tipo SMA. A mistura do tipo SMA com asfalto - borracha apresentou, no geral, melhor desempenho do que a mistura com o CAP 30/45.
2. O agregado siderúrgico na sua composição original entregue pela empresa tem que ser adaptado para ser utilizado como agregado em misturas asfálticas do tipo SMA na faixa 19 mm. É necessário britar mais material passante na peneira 9,5 mm, para atender o método Bailey.
3. Os finos do agregado siderúrgico na sua composição original entregue pela empresa não pode ser usado sob nenhuma condição em misturas asfálticas de qualquer tipo por apresentarem alta absorção. Isto se deve ao fato desses serem gerados no processo industrial e não por britagem dos agregados maiores.
4. O agregado siderúrgico na sua composição original entregue pela empresa tem uma presença excessiva de pó na superfície dos grãos o que dificulta a boa formação da película asfáltica.
5. A expansão do agregado siderúrgico ensaiado foi abaixo de 0,5% em 14 dias de ensaio o que garante a estabilidade do agregado em misturas do tipo SMA e atende aos critérios das normas brasileiras e americanas.
6. É necessário o fornecedor de agregado siderúrgico enviá-lo com menos pó envolvendo os agregados graúdos, pois, como visto, a alta absorção do pó de escória pode onerar a mistura, ou seja, quanto maior a absorção do agregado, maior deve ser o consumo de

ligante. O agregado analisado apresenta absorção elevada para o agregado graúdo 4%, sendo que o máximo previsto na Norma DNER 262/94 é de 2%.

7. O agregado siderúrgico apresenta valores satisfatórios de abrasão Los Angeles, fator fundamental em misturas do tipo SMA, tendo em vista que é necessária a alta interação grão-grão e a boa resistência para os grãos não quebrarem.
8. O Módulo Resiliência (MR) e a Resistência à Tração (RT) da mistura com utilização de agregado siderúrgico e asfalto borracha foram comparáveis com misturas SMA com agregados naturais. A mistura que utilizou o CAP 30/45 da REDUC apresentou resultado de MR e RT superiores devido ao fato do ligante ser mais duro do que o CAPFLEX-B (Asfalto Borracha).
9. O ligante CAPFLEX-B se comportou melhor do que CAP30/45 para o uso nas misturas em estudo, visto que este apresentou maior viscosidade, menor penetração nos agregados e melhor envolvimento dos mesmos. Sabe-se ainda que a maioria das misturas do tipo SMA é feita com ligantes modificados.
10. O ensaio de escorrimento mostrou que não é necessário o uso de fibras na mistura do tipo SMA estuda.
11. As misturas do tipo SMA com agregado siderúrgico quando avaliadas com relação ao Dano por Umidade Induzida, apresentou bons resultados e atendeu aos limites previstos na norma americana AASHTO M325-08.
12. Os resultados do ensaio do *Flow Number* para as duas misturas testadas atendem bem ao critério proposto por NASCIMENTO (2008), sendo indicado para tráfego de médio a pesado.
13. Os resultados encontrados no simulador de tráfego LCPC apresentaram insucesso, devido às altas deformações, sendo necessária a avaliação futura dos resultados gerados por este tipo de simulador.
14. Os resultados encontrados no simulador de tráfego APA estão dentro dos limites previstos em relatórios de universidades e confirmam que os resultados encontrados no simulador LCPC estão incoerentes.

A conclusão final é que o agregado siderúrgico utilizado neste estudo pode ser utilizado em misturas do tipo SMA, atendendo aos requisitos previstos nas normas e

apresentando bom comportamento mecânico desde que composto com agregados naturais nas granulometrias miúdas e filer.

## **6.2 - Sugestões**

1. Estudar as divergências encontradas nos ensaios de deformação permanente, bem como avaliar os métodos e suas comparações.
2. Realizar estudos sobre a britagem do agregado siderúrgico, pois sendo assim, o mesmo teria menos pó em sua superfície.
3. Realizar estudo com misturas do tipo SMA em uma faixa de TMN menor, tendo em vista que a faixa menor é mais usual em campo.
4. Analisar o desempenho da mistura quando aplicado em campo.
5. Analisar o uso do agregado siderúrgico em misturas do tipo densas que são mais usuais no nosso país, bem como o comportamento mecânico destas misturas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO M 323,. *Superpave Volumetric Mix Design*. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO M 323, Washington, D.C., 2007.
- AASHTO M 325. *Stone Matrix Asphalt Design*. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO M 325, Washington, D.C., 2008.
- AASHTO R 30-06. *Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO R 30, Washington, D.C., 2006.
- AASHTO R 35. *Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Hot-Mix Asphalt (HMA)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO R 35, Washington, D.C., 2009.
- AASHTO T 19. *Standard Method of Test for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 19, Washington, D.C., 2009.
- AASHTO T 85. *Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate*. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 85, Washington, D.C., 2008.
- AASHTO T 283. *Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt to Moisture-Induced Damage*. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO M 323, Washington, D.C., 2007.
- AASHTO T 305. *Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 305, Washington, D.C., 2009.
- ABNT NBR 9251: **Água - Determinação do pH - Método eletrométrico**. Norma Brasileira. Associação brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1996.
- ABNT NBR 15573: **Misturas Asfálticas - Determinação da massa específica aparente de corpos de prova**. Norma Brasileira. Associação brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2008.

- ABNT NBR 15619: **Misturas Asfálticas - Determinação da massa específica máxima medida em amostras não compactadas**. Norma Brasileira. Associação brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2008.
- ABNT NBR 15897: **Misturas Asfálticas a quente - Preparação de corpos de prova com compactador giratório Superpave**. Norma Brasileira. Associação brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2010.
- ABNT NBR 7251: **Agregado em Estado Solto - Determinação da Massa Unitária**. Norma Brasileira. Associação brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1982.
- ABNT NBR 10004: **Resíduos sólidos – Classificação**. Associação brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 71p, 2004.
- ABNT NBR 10005: **Procedimento para obtenção de extrato de lixiviado de resíduos sólidos**. Associação brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 16p, 2004.
- ABNT NBR 10006: **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Associação brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 3p, 2004.
- ABNT NBR NM 27/2001: **Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. Norma Brasileira. Associação brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2001.
- AFNOR-NF-P-98-216-1: *Essais Relatifs aux Chaussées - Détermination de la Macrotecture*, Partie 1: Essai de Hauteur au Sable Vraie (HSv), Association Française de Normalisation, Afnor, França, 1991.
- AFNOR-NF-P-98-250-2: *Essais Relatifs aux Chaussées - Préparation des Mélanges Hydrocarbonés*, Partie 2: Compactage des Plaques, Association Française de Normalisation, Afnor, França, 1997.
- AFNOR-NF-P-98-253-1: *Essais Relatifs aux Chaussées - Déformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés*, Partie 1: Essai d'Orniérage, Association Française de Normalisation, Afnor, França, 1993.
- AHMEDZADE, P., SENGOZ, B., *Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete*. Journal of Hazardous Materials 165/2009 300–305, 2009.
- AGGREGAIN., *Material Information*. The Sustainable aggregates information service from Wrap. <http://aggregain.wrap.org.uk/>, consultado em 14 março de 2012, 2011.

- ASI, I. M., *Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes*. Building and Environment 42/2007 325–329, 2007
- ASPHALT INSTITUTE, *The Bailey Method. Achieving Volumetrics and HMA Compactability*. Asphalt Institute. Instructor Bill Pine, Heritage Research Group. Lexington, KY, January, 2011.
- ASTM C 127: *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*. American Society for Testing and Materials. ASTM C 127, 2007.
- ASTM C 128: *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*. American Society for Testing and Materials. ASTM C 128, 2007.
- ASTM C 131. *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. American Society for Testing and Materials. ASTM C 131, 2006.
- ASTM. C 136-06: *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. American Society for Testing and Materials. ASTM C 136, 2006.
- ASTM. D 2041-03: *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*. American Society for Testing and Materials. ASTM D 2041, 2003
- ASTM. D 4123-82: *Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*. American Society for Testing and Materials. ASTM D 4123, 1982.
- AZARI, H, LUTZ, R., SPELLERBERG, P., *Precision Estimates of Selected Volumetric Properties of HMA Using Absorptive Aggregate*. NCHRP, Web - Only Document 109, 2006.
- BABADOPULOS, L.F.de A.L.; VALE, A.; SOARES J.B ; CASAGRANDE, M.D.T., **Estudo Laboratorial da Viabilidade do Uso de Fibras Sintéticas em Misturas do Tipo SMA**. 15ª Reunião de Pavimentação Urbana. Salvador, Bahia, Brasil, 2008.

- BALTAZAR, R. P., **Caracterização do Fator de Expansão de Uma Escória de Aciaria em Diferentes Processos de Cura para Uso em Pavimentação**. Dissertação de M.Sc., UFV, Viçosa, MG, Brasil, 2001.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G., SOARES, J. B., CERATTI, J. A. P., **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 1ed. Petrobras. Rio de Janeiro, RJ Brasil, 2008.
- CASTELO BRANCO, V. T. F., **Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- CAVALCANTI, L. S., **Efeito de Alguns Modificadores de Ligantes na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
- CERJAN-STEFANOVIC, S., RASTOVCAN-MIOC, A., NOVOSEL-RADOVIC, V. J., **Mechanical Properties of Cement with Addition of Electric Furnace Slag**. Metalurgija, N.36, p. 93-98, 1997.
- CESAR, A. C. G., **Desenvolvimento de Blocos Confeccionados com Escória Proveniente da Reciclagem do Aço**. Dissertação de M.Sc., EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil, 2008.
- CHAVARINI, V., **Aços e Ferros Fundidos**. 4ª ed. Associação Brasileira de Metais. São Paulo, SP, Brasil, 1977.
- CHAVES, J. M., MOURA, E., BERNUCCI, L. B. e ALBA, W., **Misturas Asfálticas Tipo SMA Delgado em um Trecho Experimental de uma Rodovia com Elevado Volume de Tráfego**. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 16º, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. CD-ROM, 2002.
- CST- Companhia Siderúrgica Tubarão, Disponível em: <http://www.arcelormittal.com/br/tubarao/> - 21/12/2010, Brasil, 2010.
- CUNHA, M. B., **Avaliação do Método de Bailey de Seleção Granulométrica de Agregados para Misturas Asfálticas**. Dissertação de M.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, EESC-USP, São Carlos, SP, Brasil, 2004.

- DER/PR - DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO PARANÁ, Disponível em: <http://www.der.pr.gov.br/arquivos> - 23/2/2011. Brasil, 2011.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **EM 262: Escórias de Aciaria para Pavimentos Rodoviários**. Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 049: Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras**. Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **PRO 007: Avaliação Subjetiva da Superfície de Pavimentos**. Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **PRO 008: Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos**. Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **PRO 263: Emprego de Escórias de Aciaria em Pavimentos Rodoviários**. Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. 113/2009-ES. **Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria**. Rio de Janeiro, 2009.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. 115/2009-ES. **Base Estabilizada Granulometricamente com Escória de Aciaria - Acerita**. Rio de Janeiro, 2009.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. 135/2010-ME. **Determinação do Módulo de Resiliência - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. 136/2010-ME. **Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.
- DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO**, Disponível em: [www.dnpm.gov.br](http://www.dnpm.gov.br), 2006.

- EMERY, J., *Steel slag utilization in asphalt mixes*. National Slag Association. NSA MF 186-1, 2003.
- FARIA, R. A. F., **Contribuição ao Estudo das Propriedades Mecânicas e da Durabilidade de Concretos com Escória de Aciaria Elétrica (EAF) como Agregado Graúdo**. Dissertação de M.Sc., UFG, Goiânia, GO, Brasil, 2007.
- FRANCO, F. A. C. P., **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos - SisPav**. Tese de D.Sc., Programa de Engenharia Civil, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- FREITAS, H. B., - **Misturas Asfálticas de Módulo Elevado com Uso de Escória de Aciaria como Agregado**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- GEYER, R. M. T., **Estudo Sobre a Potencialidade de Uso das Escórias de Aciaria como Adição ao Concreto**. Tese de D.Sc., UFRS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2001.
- GEISELER, J. , *Use of steelworks slag in Europe. Waste Management*. Vol. 16, Nos 1-3, pp. 59-63, 1996.
- GRIFFITHS, C.T. E KRSTULOVICH, JR., J. M., *Utilization of recycled materials in Illinois highway construction*. Physical Research Report NO. 142. MAY, Illinois Department of Transportation, 2002.
- HUANG, Y, BIRD, R. I, HEIDRICH, O., *A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements*. Resources, Conservation and Recycling 52/2007 58–73, 2007.
- IABR - Instituto Aço Brasil, **Número de Mercado - Estatísticas**. Disponível em <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas.asp?par=201112>. Acesso em: março de 2012, 2012.
- IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia. Disponível em: [www.ibs.org.br](http://www.ibs.org.br). Acesso em: 18/03/2011, Brasil, 2011.
- IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia, **Anuário Estatístico**, 2010.
- IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia, **Anuário Estatístico**, 2004.

- IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia, **Escórias Siderúrgicas - Novas Tendências**, 9ª Reunião de Pavimentação Urbana, 1998.
- JONES, N., *Global Slag Utilisation*. Workshop Sustentabilidade do Setor Siderúrgico do Brasil, São Paulo, SP, Brasil, 2006.
- JORNAL VALE DO AÇO. Disponível em: [http:// www.jornalvaledoaco.com.br](http://www.jornalvaledoaco.com.br). Acesso em: 8/2/2011. Brasil, 2011.
- KAEME - KAEME ENGENHARIA E CONSULTORIA. Disponível em: <http://www.kaeme.pr.gov.br/arquivos>. Acesso em: 8/2/2011. Brasil, 2011.
- KANDHAL, P. S.; HOFFMAN, G. L., *Evaluation of steel slag fine aggregate in hot-mix asphalt mixtures*. Transportation Research Record, Washington, D.C., TRR 1583, p. 28-36, 1998.
- KEHAGIA, F., *Skid resistance performance of asphalt wearing courses with electric arc furnace slag aggregates*. Waste Management & Research 2009: 00: 1–7. DOI: 10.1177/0734242X08092025, 2009.
- KÖK, Baha Vural e KULOĞLU, Necati., *Effects of Steel Slag Usage as Aggregate on Indirect Tensile and Creep Modulus of Hot Mix Asphalt*. G.U. Journal of Science 21(3): 97-103, 2008
- LIMA, N. P.; NASCIMENTO; J. F.; VAL FILHO, P. C.; ALBERNAZ, C. A. V., **Pavimentos de Alto Desempenho Estrutural Executados com Escória de Aciaria**. 10ª Reunião Anual de Pavimentação, Uberlândia, MG, 2000.
- MACHADO, A. T., **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. Dissertação de M.Sc., POLI, USP, São Paulo, SP, Brasil, 2000.
- MCDANIEL, R.S.; THORNTON, W.D., DOMINGUEZ, J.G., *Field Evaluation Of Porous Asphalt Pavement*. In: Report SQDH 2004, University Transportation Program, U.S. Department of Transportation, USA, 2004.
- MOTTA, R. S., **Estudo de Misturas Asfálticas Mornas em Revestimentos de Pavimentos para Redução de Emissão de Poluentes e de Consumo Energético**. Tese de D.Sc. POLI, USP, São Paulo, SP, Brasil, 2011.

- MOTZ, H e GEISELER, J., *Products of steel slags an opportunity to save natural resources*. Waste Manage; 21: 285- 93, 2001.
- MOURÃO, F. A. L., **Misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA**. Dissertação de M.Sc.- COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro,RJ, Brasil, 2003.
- NASCIMENTO, J. F.; LANGE, L. C., **Escória de Aciaria - Alternativa Econômica e Ambientalmente Adequada para Obras de Pavimentação e Conservação Rodoviária**. Disponível em: <http://www.assender.com.br/trabalhos/viasgerais5/escoria-de-aciaria.pdf>. Acesso em: 28 de fevereiro de 2011, 2005.
- NASCIMENTO, L. A. H., **Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- NBR 15897: **Misturas Asfálticas a quente - Preparação de corpos de prova com compactador giratório Superpave**. Norma Brasileira. ABNT, 2010.
- NEVES FILHO, C. L. D., **Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas SMA Produzidas com Ligante Asfalto-Borracha**. Dissertação de M.Sc., USP, São Carlos, SP, Brasil, 2004.
- NÓBREGA, L. M., **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Utilizando Escória de Ferroliga Manganês como Agregado**. Dissertação M.Sc., UFBA, Salvador, BA, Brasil, 2007.
- NSA, *Slag Success Largest Stone Matrix Asphalt project in USA spans 6 lanes for 8 miles*. Boletim 200-9. *National Slag Association*. Consultado em [www.nationaslagassoc.org](http://www.nationaslagassoc.org), em dezembro 2011, 2006a.
- NSA, *Steel Furnace Slag SMA Mix Proves to be "The World's Strongest Intersection"*. Boletim NSA 203-1. Consultado em [www.nationaslagassoc.org](http://www.nationaslagassoc.org), em dezembro 2011, 2006b.
- NSA, 1-70 Glenwood canyon *"begs for the ultimate asphalt mix design"* - Executive summary. Boletim NSA 202-2. Consultado em [www.nationaslagassoc.org](http://www.nationaslagassoc.org), em dezembro 2011, 2006c.

- ONOFRE, F.C, BESSA, Y. S, CASTELO BRANCO, V.T.F e SOARES, J. B. **Correlação entre variáveis de densificação do compactador giratório e resistência à deformação permanente de misturas asfálticas convencionais e com resíduos.** Revista Transportes. v.19 n.1 p. 13–22. 2011
- PennDOT, Form 408, **Coarse Aggregate**, 703.2 (a) 4. Steel Slag, Pennsylvania Department of Transportation, 2006.
- PINTO, S., **Materiais Pétreos e Concreto Asfáltico: Conceituação e Dosagem.** Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 1996.
- PROCEDIMENTO REDE 05. **Análise do Intertravamento da Estrutura Pétreo - Método Bailey.** Manual de Execução de Trechos Monitorados. Petróleo Brasileiro S.A. - Petrobras. Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- PTM 130, *Pennsylvania Testing Method*- Método de Ensaio para Avaliação do Potencial de Expansão da Escória de Aciaria, adaptado pelo DER/MG - RT-01.70/2009.
- RAMOS, C.R.; FILHO, C.R.R.; VALE, D.F.; PREUSSLER, E., **Programa Asfalto Liso.** XV CILA. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.
- RAPOSO, C. O. L., **Estudo Experimental de Compactação e Expansão de Uma Escória de Aciaria LD Para Uso em Pavimentação.** Dissertação de M.Sc., UFES, Vitória, ES, Brasil, 2005.
- REIS, R. M. M.; BERNUCCI, L. B.; ZANON, A. L., Capítulo 9, **Revestimento Asfáltico tipo SMA para alto desempenho em vias de tráfego pesado.** In: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes; Confederação Nacional do Transporte. (Org.) Transporte em transformação VI. 1 ed. Brasília: Universidade de Brasília, 2002.
- REIS, R. M. M., **Melhoria das Condições de Superfície do Pavimento pode Reduzir até 50% dos Níveis de Acidentes.** In: Asfalto em Revista, IBP, Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- RMRC, **User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction:** Disponível em: <http://www.recycledmaterials.org/tools/uguidelines/index.asp>. 2008, 2008
- ROCHA, F. L. L., **Utilização do agregado siderúrgico (escória de aciaria) em revestimento asfáltico tipo tratamento superficial.** Dissertação MSc. UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil, 2011.

- RODRIGUES, G. L. C., **Caracterização e Avaliação da Expansibilidade de Escória de Aciaria LD Não Tratadas e Tratadas**. Dissertação de M.Sc., UFES, Vitória, ES, Brasil, 2007.
- RODRÍGUEZ, G.; PAREJO, R., “*Utilización de Materiales Residuales de la Industria Del Hierro, Níquel y Petróleo en la Construcción de Carreteras: Ventajas Ambientales y Económicas*”. 5to Congreso Venezolano Del Asfalto, Isla de Margarita, Estado Nueva Esparta, Venezuela, 2010.
- ROHDE, L., **Escória de Aciaria Elétrica em Camadas Granulares de Pavimentos - Estudo Laboratorial**. Dissertação de M.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2002.
- SENÇO, W., **Manual de Técnicas de Pavimentação**. Ed. Pini. São Paulo, SP, Brasil, 1997.
- SILVA, E. A., MENDONÇA, R. L., **Utilização da Escória em Todas as Camadas do Pavimento**. Revista Engenharia, Ciência e Tecnologia, Vol.4 , N.2 ,Pg. 7-20, Brasil, 2001.
- SILVA, P. B., **Estudo em Laboratório e em Campo de Misturas Asfálticas SMA 0/8S**. Dissertação de M.Sc., POLI, USP, São Paulo, SP, Brasil, 2005.
- SKOK, E., JOHSON, E., TURK., **ASPHALT PAVEMENT ANALYZER (APA) EVALUATION**. In: Report, Department of Civil Engineering, University Minnesota, USA, 2002.
- SOUSA, G. M., **Estudo Experimental de Escórias de Aciaria para Fins de Caracterização Tecnológica como Material de Lastro Ferroviário em Vias Sinalizadas**. Dissertação de M.Sc., UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil, 2007.
- TAKAHASHI, F., SHIMAOKA, T., GARDNER, K, KIDA, A., *Size-dependent enrichment of waste slag aggregate fragments abraded from asphalt concrete*. Journal of Hazardous Materials 194 209–215, 2011
- TAVARES, D. S., MOTTA, L. M. G, ODA, S., RAMOS, F. M., **Utilização de agregado siderúrgico em SMA para pavimentação asfáltica**. XVI CILA. IBP. Rio de Janeiro, 2011.

- VALVERDE, F. M., **Agregados para a construção civil**. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/agregados.pdf>. Acesso em: 7 de fevereiro de 2011, 2001.
- VALE, A. C.; SOARES J.B.; CASAGRANDE, M.D.T., **Aplicabilidade de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas Tipo SMA**. 4º PDPETRO. Campinas, SP, Brasil, 21-24, 2007.
- VASCONCELOS, K. L., **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias**. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, 2004.
- VAVRIK, W. R.; HUBER, G.; PINE, W.; CARPENTER, S. H.; BAILEY, R., **Bailey Method for Gradation Selection in HMA Mixture Design**. Transportation Research Board of the National Academies. Transportation Research E-Circular. Number E-C044, Washington, D.C., USA, 2002.
- WANG, G., Wang, Y., Gao, Z., **Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria**. Journal of Hazardous Materials 184/2010 555–560, 2010
- WITCZAK, M. W.; KALOUSH, K.; PELLINEN, T. et al., **Simple performance test for Superpave mix design**, National Cooperative Highway Research Program - NCHRP Report 465, Washington, D. C., EUA, 2002.
- WU, Shaopeng , XUE, Yongjie, YE, Qunshan e CHEN, Yongchun, **Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures**. Building and Environment 42/2007 2580–2585, 2007
- YI, T. C., **Performance evaluation of steel slag as natural aggregates replacement in asphaltic concrete**. Dissertação de mestrado. Malásia, 2008.
- ZHEN-HUA, L.; YONG-JIE, X.; SHAO-PENG, W., **Design and Preparation of Steel Slag SMA**. In: Journal of Wuhan University, China, 2003.
- ZIARI, H. e KHABIRI, M. M., **Preventive maintenance of flexible pavement and mechanical properties of steel slag asphalt**. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL

ENGINEERING AND LANDSCAPE MANAGEMENT <http://www.jeelm.vgtu.lt/en>  
2007, Vol XV, No 3, 188b–192b, 2007.

## **ANEXO I**

Curvas de fadiga das misturas deste estudo

## ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra: Tese de mestrado Cap 30/45 Protocolo: **71-11**

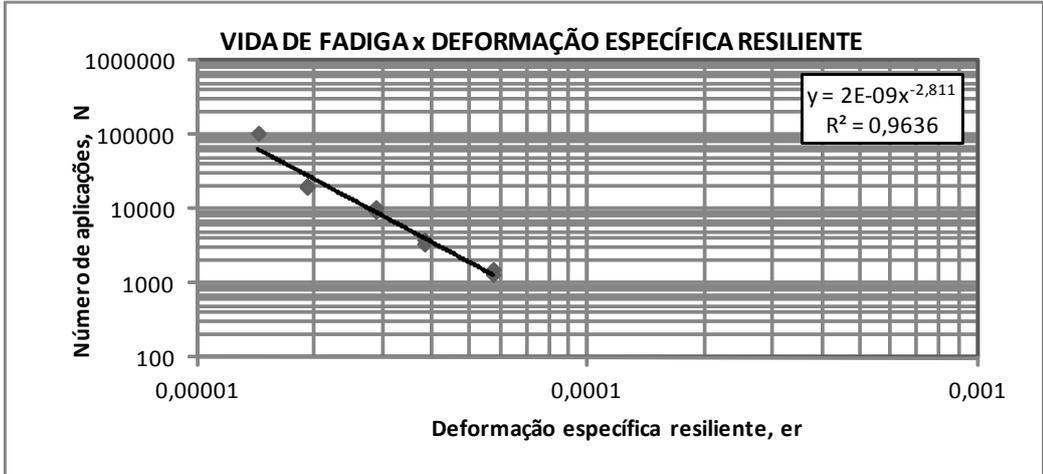
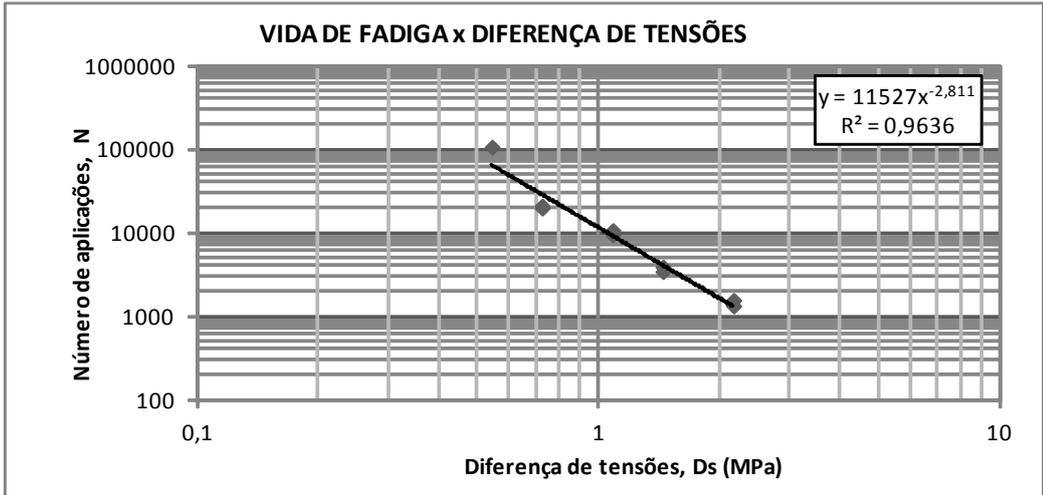
Temperatura de ensaio: 25 °C Operador(es): ROBERTO VIANNA

Módulo resiliente médio da amostra: 9458 MPa Interessado: Diogo

Resistência máxima à tração estática,  $\sigma_{Tmax}$ : 1,81 MPa Data: setembro/2011

**PAINEL PM-1** Equação do cil. de carga (125mm): Pm<sub>(0-10)</sub> = 0,0088 F + 0,0822  
F<sub>(0-10)</sub> = 114,07 Pm + 9,2705

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm <sup>2</sup> )	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
16907	6,37	9,98	7,5	138,3	1,30	0,0000144	0,54	106288
16908	6,45	9,98	10	186,7	1,72	0,0000191	0,72	20939
16909	6,42	9,97	10	185,6	1,72	0,0000191	0,72	19864
16911	6,45	9,99	15	280,3	2,55	0,0000287	1,09	9434
16912	6,39	9,90	20	366,9	3,31	0,0000383	1,45	3900
16913	6,62	9,98	20	383,2	3,45	0,0000383	1,45	3434
16914	6,37	9,99	30	553,6	4,95	0,0000574	2,17	1554
16915	6,49	9,99	30	564,1	5,05	0,0000574	2,17	1333
16916	6,58	9,98	15	285,7	2,60	0,0000287	1,09	10642



## ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra:  Protocolo:

Temperatura de ensaio:  °C Operador(es):

Módulo resiliente médio da amostra:  MPa Interessado:

Resistência máxima à tração estática,  $\sigma_{Tmax}$ :  MPa Data:

**PAINEL PM-1** Equação do cil. de carga (125mm):  
 $P_{m(0-10)} = 0,0088 F + 0,0822$   
 $F_{(0-10)} = 114,07 P_m + 9,2705$

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm <sup>2</sup> )	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
17094	6,53	10,00	10	116,1	1,10	0,0000354	0,44	26581
17095	6,57	10,00	10	116,8	1,11	0,0000354	0,44	
17096	6,59	10,00	15	176,2	1,63	0,0000531	0,67	
17097	6,53	10,02	15	174,0	1,61	0,0000529	0,66	
17098	6,68	9,99	20	236,9	2,17	0,0000706	0,89	
17099	6,54	9,97	20	232,4	2,13	0,0000709	0,89	
17100	6,45	9,99	30	344,1	3,11	0,0001062	1,33	
17101	6,49	10,00	30	346,3	3,13	0,0001061	1,33	
17102	6,54	10,00	40	464,8	4,17	0,0001413	1,77	
17103	6,47	9,99	40	459,8	4,13	0,0001414	1,78	
17104	6,53	10,02	50	581,8	5,20	0,0001768	2,22	269
17105	6,62	10,10	50	594,6	5,31	0,0001768	2,22	

