

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS  
COM AGREGADOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA**

**JULIANA FRUTUOSO GOMES**

**ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD**

**COORIENTADOR: HUGO ALEXANDER RONDÓN QUINTANA, DSc**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM-304/2018**

**BRASÍLIA/DF: ABRIL/2018**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS  
COM AGREGADOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA**

**JULIANA FRUTUOSO GOMES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADOSUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD (UnB)**

**(ORIENTADOR)**

---

**HUGO ALEXANDER RONDÓN QUINTANA, DSc (UD, COLÔMBIA)**

**(COORIENTADOR)**

---

**MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, DSc (UnB)**

**(EXAMINADORA INTERNA)**

---

**LENI FIGUEIREDO MATHIAS LEITE, DSc (UFRJ)**

**(EXAMINADORA EXTERNA)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 20 DE ABRIL DE 2018.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

GOMES, JULIANA FRUTUOSO

Estudo Laboratorial de Misturas Asfálticas Mornas com Agregados de Escória de Aciaria  
[Distrito Federal] 2018

xv, 99 p., 201x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2018)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil.

1. Misturas asfálticas mornas

2. Escória de aciaria

3. Estudo laboratorial

4. Comportamento mecânico

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Gomes, J. F. (2018). Estudo Laboratorial de Misturas Asfálticas Mornas com Agregados de Escória de Aciaria. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-304/2018, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 99 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Juliana Frutuoso Gomes

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estudo Laboratorial de Misturas Asfálticas Mornas com Agregados de Escória de Aciaria

GRAU/ANO: Mestre/ 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Juliana Frutuoso Gomes  
QSD 12 casa 38, Taguatinga  
72020-120 – Brasília/DF – Brasil

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por ter me dado a saúde, a força e a perseverança necessárias para correr atrás de meus objetivos e concluir mais esta etapa. Agradeço também às pessoas que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui.

Assim, sou grata à minha família pelo apoio, incentivo e amor incondicional, em especial, a meus pais, que desde sempre me ensinaram o valor e a importância da educação. E também a todos meus amigos, que não me deixaram desanimar e tornaram essa jornada mais leve.

Agradeço ainda aos meus orientadores pela paciência que sempre demonstraram ao me auxiliar e instruir nessa caminhada, e aos colegas, professores e funcionários do Infralab pelo apoio durante os longos dias de trabalho no laboratório.

Também sou muito agradecida ao meu companheiro de todas as horas, Rodrigo, por todo o amor e por estar sempre disposto a me ajudar no que for preciso, inclusive, tendo colocado a mão na massa quando eu necessitava de um auxílio mais braçal.

Por fim, não poderia deixar de expressar minha gratidão à Simone e ao Igor Rodrigues, que estiveram ao meu lado em todas as etapas desta pesquisa e sem os quais eu não conseguiria realizá-la. Obrigada pelo companheirismo e a amizade nesse intenso ano de trabalho!

## RESUMO

Nas últimas décadas observa-se o crescimento da consciência ambiental na sociedade, que tem influenciado na forma como as diversas áreas da indústria desenvolvem suas atividades. O setor da pavimentação vem buscando se adequar a essa nova realidade, atentando-se para alternativas que possibilitem o desenvolvimento de processos mais eficientes e o uso de materiais mais sustentáveis, com os menores custos e sem o comprometimento da qualidade de seus produtos. Dentre essas alternativas estão o uso de escória de aciaria como agregado e a diminuição das temperaturas de trabalho das misturas asfálticas por meio de tecnologias de misturas mornas. Com base nisso, buscou-se analisar o comportamento de misturas asfálticas a quente e mornas produzidas em laboratório, com substituições de agregados de calcário por escória de aciaria Linz-Donawitz. Para as misturas mornas, foram usados dois aditivos: o HUSIL, que provoca a formação de espuma no asfalto, e o Rediset<sup>®</sup> LQ, que é um produto surfactante. O estudo foi dividido em quatro partes: caracterização dos materiais, análise de misturas com diferentes composições de agregados de calcário e escória, estudo de compactação a três temperaturas diferentes e caracterização mecânica. Foram estudadas até quatro porcentagens diferentes de cada aditivo (entre 0,4% e 0,75% para o Rediset e de 0,5% a 2% para o HUSIL) e oito composições distintas de agregados de calcário e escória. Foram mecanicamente avaliadas, segundo os ensaios de estabilidade Marshall, resistência à tração indireta, módulo de resiliência, dano por umidade induzida, creep estático e fadiga, seis misturas diferentes. Três delas eram compostas apenas de agregados de calcário e três possuíam agregados graúdos de escória de aciaria, sendo duas a quente e quatro mornas (com redução de 20°C), dentre as quais duas eram com 1% de HUSIL e duas com 0,5% de Rediset<sup>®</sup>. Os resultados obtidos indicaram que as misturas se mostraram satisfatórias, atendendo aos requisitos comumente exigidos para revestimentos asfálticos. Percebeu-se que o emprego de agregados graúdos de escória de aciaria mostrou-se bastante interessante por proporcionar à mistura asfáltica um esqueleto mineral resistente, estável e com boa adesividade ao ligante. No entanto, é necessário um cuidado especial quanto ao potencial expansivo desse material. Já o uso dos aditivos, especialmente o Rediset, permitiu a produção de misturas mornas sem o comprometimento da trabalhabilidade da massa asfáltica e da qualidade do produto final, apesar de terem sido observados desempenhos mecânicos ligeiramente inferiores às misturas a quente. Dessa forma, uma vez que a questão da expansibilidade esteja sob controle, o uso de misturas mornas com escória de aciaria mostra-se como uma solução tecnicamente viável, que pode ser considerada também uma forma promissora de tornar a pavimentação mais sustentável.

## ABSTRACT

In the last decades, the growth of an environmental awareness in society has influenced the way in which the various areas of industry develop their activities. The paving sector, for instance, has been looking for alternatives that allow more efficient and sustainable ways of production, with lower costs and no loss of quality. Among these alternatives are the use of steel slag as aggregates and the reduction of the production temperature of asphalt mixtures by means of warm mix technologies. Based on these, this research aimed to analyse the behaviour of hot and warm mixes produced in laboratory with different aggregates compositions of limestone and/or Linz-Donawitz steel slags. For the warm mixtures it was considered two types of additives: HUSIL, which uses the principle of foaming asphalt, and Rediset<sup>®</sup> LQ, which is a surfactant product. The study was divided in four main parts: characterization of the materials, analysis of mixtures with different compositions of limestone and steel slag aggregates, study of compaction at three different temperatures and mechanical characterization. Up to four different percentages of each additive (between 0,4% and 0,75% for Rediset<sup>®</sup> and from 0,5% to 2% for HUSIL) and eight different compositions of limestone and slag aggregates were studied. Six mixtures were evaluated by means of Marshall stability, indirect tensile, resilient modulus, moisture damage, static creep and fatigue tests. Three of these mixes were composed only of limestone aggregates and three had coarse aggregates of steel slag, of which two were hot mixtures and four were warm (with a reduction of 20°C). For two of the warm mixes it was added 1% of HUSIL and for the other two, 0,5% of Rediset<sup>®</sup>LQ. The results indicated that the mixtures were satisfactory, meeting the common requirements for asphalt surface layers. It was noticed that the usage of coarse aggregates of steel slag provided to the asphalt mixtures a resistant and stable mineral skeleton, that also have a good adhesion to the binder. However, special care is necessary regarding the expansive potential of this material. The use of additives, especially Rediset<sup>®</sup>, allowed the production of warm mixes without compromising its workability and final quality, although it was observed for this mixtures slightly worse mechanical performances than for hot mixes. Hence, once the issue of volumetric instability is under control, the application of warm mixes with steel slag aggregates proves to be a technically feasible solution, which can also be considered a promising way to make paving more sustainable.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....	3
1.2	HIPÓTESE .....	4
1.3	OBJETIVO GERAL.....	4
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS.....	5
2.1.1	BREVE HISTÓRICO .....	6
2.1.2	TÉCNICAS DE PRODUÇÃO .....	9
2.1.3	BENEFÍCIOS.....	10
2.2	ESCÓRIA DE ACIARIA .....	13
2.2.1	PROCESSO PRODUTIVO.....	14
2.2.2	CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES .....	17
2.2.3	APLICAÇÕES COMO AGREGADO SIDERÚRGICOS.....	20
2.3	MISTURAS MORNAS COM AGREGADOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA.....	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	28
3.1	SELEÇÃO E OBTENÇÃO DOS MATERIAIS .....	29
3.1.1	AGREGADOS .....	29
3.1.2	LIGANTE ASFÁLTICO.....	31
3.1.3	ADITIVOS.....	31
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	32
3.2.1	AGREGADOS .....	32
3.2.2	LIGANTE ASFÁLTICO.....	33
3.3	ESTUDO DE DOSAGEM .....	36
3.3.1	DOSAGEM MARSHALL.....	37
3.3.2	ANÁLISE DE COMPOSIÇÕES DE AGREGADOS COM ESCÓRIA EM MISTURAS ASFÁLTICAS .....	37

3.3.3	ESTUDO DE COMPACTAÇÃO .....	38
3.4	PRODUÇÃO DE AMOSTRAS PARA ENSAIOS MECÂNICOS .....	40
3.5	ENSAIOS MECÂNICOS .....	40
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	44
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS .....	44
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS .....	49
4.3	ESTUDO DE DOSAGEM .....	55
4.3.1	DOSAGEM MARSHALL .....	55
4.3.2	ANÁLISE DE COMPOSIÇÕES DE AGREGADOS COM ESCÓRIA EM MISTURAS ASFÁLTICAS .....	58
4.3.3	ESTUDO DE COMPACTAÇÃO .....	64
4.4	AMOSTRAS PARA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA .....	70
4.5	ENSAIOS MECÂNICOS .....	72
4.5.1	ESTABILIDADE MARSHALL .....	72
4.5.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	75
4.5.3	DANO POR UMIDADE INDUZIDA .....	76
4.5.4	MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....	79
4.5.5	<i>CREEP</i> ESTÁTICO .....	81
4.5.6	FADIGA .....	84
5	CONCLUSÕES .....	88
5.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	92



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição típica de escórias de aciaria LD (concentrações em porcentagem)	18
Tabela 2.2 – Fases mineralógicas típicas em escórias de aciaria .....	18
Tabela 2.3 – Vantagens de desvantagens do uso de misturas asfálticas com agregados de escória de aciaria .....	23
Tabela 3.1- Granulometria da composição de agregados para as misturas asfálticas .....	29
Tabela 3.2 - Ensaio de caracterização dos agregados .....	32
Tabela 3.3 - Ensaio de caracterização dos ligantes asfálticos .....	33
Tabela 3.4 - Identificação das misturas com escória.....	38
Tabela 3.5 - Ensaio mecânico para avaliação das misturas asfálticas.....	40
Tabela 4.1 – Resultados da caracterização dos agregados .....	44
Tabela 4.2 – Densidade e absorção dos agregados .....	44
Tabela 4.3 – Porosidade dos agregados determinada por micrografia no MEV .....	47
Tabela 4.4 – Porcentagem em peso de cada fase mineral das amostras de agregados.....	48
Tabela 4.5 – Concentração dos óxidos identificados nas amostras de agregados.....	48
Tabela 4.6 – Resultados da caracterização do CAP 50/70.....	49
Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de caracterização convencional nos ligantes .....	50
Tabela 4.8 – Resultados da viscosidade rotacional dos ligantes .....	52
Tabela 4.9 – Resultados para o envelhecimento no RTFOT dos ligantes.....	53
Tabela 4.10 – Dosagem Marshall: parâmetros volumétricos e estabilidade .....	56
Tabela 4.11 – Especificações para as misturas asfálticas segundo a norma DNIT-ES 031/2006 .....	57
Tabela 4.12 – Parâmetros volumétricos de misturas com diferentes composições de agregados .....	59
Tabela 4.13 – Resultados do ensaio de estabilidade Marshall para misturas com diferentes composições de agregados .....	62
Tabela 4.14 – Resultados dos ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência para misturas com diferentes composições de agregados .....	62
Tabela 4.15 – Volume de vazios para misturas com HUSIL em diferentes proporções e temperaturas de trabalho .....	65
Tabela 4.16 - Volume de vazios para misturas com Rediset LQ em diferentes proporções e temperaturas de trabalho .....	65
Tabela 4.17 – Resistência à tração para misturas com HUSIL em diferentes proporções e temperaturas de trabalho .....	67

Tabela 4.18 - Resistência à tração para misturas com Rediset LQ em diferentes proporções e temperaturas de trabalho .....	68
Tabela 4.19 – Parâmetros volumétricos das misturas submetidas à caracterização mecânica .....	71
Tabela 4.20 – Resultados do ensaio de estabilidade Marshall .....	73
Tabela 4.21 – Resultados do ensaio de resistência à tração indireta.....	75
Tabela 4.22 – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida.....	77
Tabela 4.23 – Resultados do ensaio de módulo de resiliência .....	79
Tabela 4.24 – Resultados do ensaio de <i>creep</i> estático para misturas quentes e mornas com e sem escória de aciaria.....	81
Tabela 4.25 – Parâmetros das curvas de fadiga .....	84

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Gasto de combustível em função da temperatura de produção de misturas asfálticas (modificado – EAPA, 2014).....	11
Figura 2.2 - Diferença nas emissões de fumos e gases durante descarregamento, no caminhão, de misturas asfálticas a quente (à esquerda) e morna (à direita) (FERREIRA <i>et al.</i> , 2009)....	11
Figura 2.3 – Processo de fabricação do aço (IABR, 2016).....	14
Figura 2.4 – Esquema de produção do aço em conversor a oxigênio (modificado – YILDIRIM e PREZZI, 2011).....	16
Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia de pesquisa.....	28
Figura 3.2 - Curva granulométrica (Faixa C).....	29
Figura 3.3 - Escória de aciaria: a) disposta ao ar livre; b) durante o processo de britagem; c) em detalhe na sua forma final; d) peneirada para composição da curva granulométrica.....	30
Figura 3.4 - Calcário: a) local de coleta (miúdos); b) local de coleta (graúdos); c) frações peneiradas para composição da curva granulométrica.....	31
Figura 3.5 - a) Rediset LQ; b) HUSIL; c) efeito do HUSIL no CAP 50/70.....	32
Figura 3.6 - Exemplo de construção de curva-mestra de $ G^* $ (modificado – YOUSOFF, 2012).....	35
Figura 3.7 - a) Reômetro (DSR); b) amostra de 25 mm de diâmetro entre as placas paralelas.....	36
Figura 3.8 - a) Ensaio de resistência à tração indireta; b) ensaio de estabilidade Marshall.....	41
Figura 3.9 - a) Ensaio de fadiga; b) detalhe do posicionamento da amostra e dos LVDTs.....	41
Figura 3.10 - a) Ensaio de <i>creep</i> estático; b) detalhe montagem do ensaio.....	42
Figura 3.11 - a) Ensaio de fadiga; b) amostra em ruptura por fadiga.....	43
Figura 4.1 - Resultado do ensaio de adesividade dos agregados ao CAP 50/70.....	45
Figura 4.2 – Aspecto superficial das partículas de escória de aciaria.....	46
Figura 4.3 – Exemplos de micrografias usadas no cálculo de área porosa dos agregados.....	47
Figura 4.4 – Resultados da caracterização convencional dos ligantes com adições de HUSIL.....	50
Figura 4.5 – Resultados da caracterização convencional dos ligantes com Rediset LQ.....	51
Figura 4.6 – Comparação das curvas de viscosidade dos ligantes.....	53
Figura 4.7 – Curvas-mestras dos ligantes para o módulo de cisalhamento dinâmico à temperatura de 34°C.....	54
Figura 4.8 – Viscosidade rotacional em função da temperatura.....	55
Figura 4.9 – Variação dos parâmetros volumétricos e da estabilidade por teor de asfalto.....	56

Figura 4.10 – Vv e RBV em função do teor de asfalto .....	58
Figura 4.11 – Comparação entre DMT e Gmm para misturas com diferentes composições de agregados de calcário e escória de aciaria.....	59
Figura 4.12 – Parâmetros volumétricos de misturas com diferentes composições de agregados .....	61
Figura 4.13 – Propriedades mecânicas de misturas com diferentes composições de agregados .....	63
Figura 4.14 – Volume de vazios para diferentes temperaturas de compactação e porcentagens de HUSIL .....	65
Figura 4.15 - Volume de vazios para diferentes temperaturas de compactação e porcentagens de Rediset LQ.....	66
Figura 4.16 – Resumo dos resultados das ANOVAs dos volumes de vazios por temperatura para cada mistura do estudo de compactação.....	67
Figura 4.17 – Resistência à tração para diferentes temperaturas de trabalho e porcentagens de HUSIL .....	68
Figura 4.18 - Resistência à tração para diferentes temperaturas de compactação e porcentagens de Rediset LQ.....	68
Figura 4.19 - Resumos dos resultados das ANOVAs das resistências à tração por temperatura para cada mistura do estudo de compactação.....	69
Figura 4.20 - Descrição das misturas asfálticas submetidas à caracterização mecânica.....	70
Figura 4.21 – Volume de vazios das misturas submetidas à caracterização mecânica .....	71
Figura 4.22 – Resumo da ANOVA para os resultados de volume de vazios.....	72
Figura 4.23 – Estabilidade Marshall para misturas quentes e mornas com e sem escória.....	73
Figura 4.24 – Fluência Marshall para misturas quentes e mornas com e sem escória.....	74
Figura 4.25 – Resumo da ANOVA para os resultados de estabilidade.....	74
Figura 4.26 – Resistência à tração para misturas quentes e mornas com e sem escória .....	75
Figura 4.27 – Resumo da ANOVA para os resultados de resistência à tração .....	76
Figura 4.28 - Resultados do dano por umidade induzida para misturas com escória .....	77
Figura 4.29 – Amostra com trinca devido à expansão .....	78
Figura 4.30 – Amostras pós-condicionamento: observações superficiais.....	79
Figura 4.31 – Módulo de resiliência para misturas quentes e mornas com e sem escória.....	80
Figura 4.32 – Resumo da ANOVA para os resultados de módulo de resiliência .....	80
Figura 4.33 – Curvas de deformação em função do tempo resultantes do ensaio de <i>creep</i> estático para misturas quentes e mornas com e sem escória .....	82

Figura 4.34 – Recuperação elástica das misturas medida no ensaio de <i>creep</i> estático .....	82
Figura 4.35 – Resumo das ANOVAs para os resultados de deformações no ensaio de <i>creep</i>	83
Figura 4.36 – Curvas de fadiga para misturas quentes e mornas com e sem escória.....	84
Figura 4.37 – Comparação entre as curvas de fadiga para misturas a quente e mornas com a mesma composição de agregados .....	85
Figura 4.38 – Comparação entre as curvas de fadiga de misturas iguais com composições de agregados diferentes.....	86

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLARURAS E ABREVIACÕES

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ANOVA	Análise de Variância
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	American Society for Testing and Materials
BOF	Basic Oxygen Furnace
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Asf
CMA	Cold Mix Asphalt
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo-de-prova
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difração de Raios X
DSR	Dynamic Shear Rheometer
E/F	Razão entre Estabilidade e Fluência Marshall
EAF	Electric Arc Furnace
EAPA	European Asphalt Pavement Association
ED	Estatisticamente Diferentes
EI	Estatisticamente Iguais
FHWA	Federal Highway Administration
$G^*$	Módulo Complexo de Cisalhamento
$ G^* $	Módulo Dinâmico
Gmb	Massa Específica Aparente da Mistura Compactada
Gmm	Densidade Máxima Medida
GO	Goiás
HMA	Hot Mix Asphalt
HWMA	Half Warm Mix Asphalt
IABr	Instituto Aço Brasil
IBS	Instituto Brasileiro de Siderurgia
INFRALAB	Laboratório de Infraestrutura Rodoviária
LD	Linz-Donawitz
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MG	Minas Gerais

MR	Módulo de Resiliência
N	Vida de Fadiga
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NBR	Norma Brasileira
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RBV	Relação Betume/Vazios
REGAP	Refinaria Gabriel Passos
RRT	Razão de Resistência à Tração
RT	Resistência à Tração Indireta
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
TMN	Tamanho Máximo Nominal
$T_r$	Temperatura de Referência
TR	Temperatura de Referência
TTSP	Time Temperature Superposition Principle
UnB	Universidade de Brasília
VAM	Vazios do Agregado Mineral
$V_v$	Volume de Vazios
WMA	Warm Mix Asphalt
WMA TWG	Warm Mix Asphalt Technical Working Group
WSDOT	Washington State Department of Transportation
XRF	Fluorescência de Raios X
$\alpha_T$	Shift Factor
$\gamma_0$	Amplitude de Deformação Cisalhante
$\delta$	Ângulo de Fase
$\sigma_T$	Tensão de Tração
$\tau_0$	Amplitude de Tensão Cisalhante
$\omega$	Frequência Angular
$\omega_r$	Frequência Reduzida

# 1 INTRODUÇÃO

Por se tratar de um país de dimensões continentais, o Brasil depende fortemente da infraestrutura de transporte para o seu desenvolvimento econômico e social. Nesse sentido, o setor rodoviário destaca-se por ser o modal de transporte mais expressivo no país, sendo responsável por mais de 60% das movimentações de cargas e 90% de passageiros (CNT, 2016). Sendo assim, a malha rodoviária brasileira merece atenção e cuidado para que apresente qualidade necessária para garantir conforto e segurança a seus usuários. No entanto, o que se observa é que apenas 12% de um total de 1,7 milhões de quilômetros de rede rodoviária nacional é pavimentado (DNIT, 2013).

Dentre as rodovias pavimentadas, a maioria é de pavimentos flexíveis, ou seja, com revestimento de material asfáltico, composto basicamente por uma mistura convenientemente proporcionada de agregados minerais e cimento asfáltico de cimento (CAP). Essa camada tem por função receber diretamente os esforços do tráfego e as ações do clima, devendo ser adequadamente impermeável e resistente às cargas de contato pneu-pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008). De forma geral, utiliza-se, para tanto, o concreto asfáltico usinado a quente (CBUQ), sendo por vezes denominado de mistura asfáltica convencional.

Esse tipo de revestimento exige um processo de mistura em usina e compactação em campo a altas temperaturas, permitindo, respectivamente, o recobrimento adequado dos agregados pelo ligante e o fechamento apropriado dos vazios do concreto asfáltico, conferindo-lhe a estabilidade desejada. Assim, os processos de secagem dos agregados e aquecimento de agregados e ligantes resultam em um grande gasto energético nas usinas e, conseqüentemente, um alto consumo de combustível. A queima desses combustíveis gera um problema ambiental, uma vez que ela é responsável pela maior parte das emissões de gases do efeito estufa na produção do CBUQ, segundo Prowell *et al.* (2012).

Além disso, no processo de pavimentação asfáltica, há ainda importantes emissões advindas diretamente do asfalto aquecido, chamadas de emissões asfálticas, as quais representam não só uma preocupação ambiental, mas também de saúde, visto que os operários ficam expostos a elas (MOTTA, 2011). Isso ocorre, porque o CAP é um produto obtido por meio da destilação do petróleo e constituído de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10 % de outros elementos, como oxigênio, enxofre, nitrogênio e diversos metais. Assim, ao ser aquecido, esse ligante emite vapores visíveis e fumaças, que são perceptíveis em temperaturas por volta de 150°C, contendo hidrocarbonetos, pequena quantidade de sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) e compostos



aromáticos, por exemplo. Ao entrarem em contato com o ar mais frio, esses vapores são condensados, transformando-se em fumos de asfalto, que contêm poluentes na forma de material particulado e gases (BERNUCCI *et al.*, 2007 e MOTTA, 2011).

Essas questões (alto consumo energético, queima de combustíveis fósseis e emissões de poluentes) tornaram-se preocupações recorrentes no contexto atual, em que se observa cada vez mais o crescimento de uma consciência ambiental em todos os setores da sociedade. Nas últimas décadas, por exemplo, emergiu mundialmente a necessidade de redução nas emissões dos chamados gases do efeito estufa, apontados como os principais responsáveis pelo aquecimento global. O setor rodoviário passou a buscar formas de seguir essa tendência, com o desenvolvimento de novas tecnologias em pavimentação que fossem favoráveis às questões ambientais. Assim, nesse contexto, surgiu na Europa a ideia de diminuir as temperaturas de usinagem e compactação do concreto asfáltico, dando início ao desenvolvimento das tecnologias de misturas asfálticas mornas (WMA, do inglês *Warm Mix Asphalt*), como relata Prowell *et al.* (2012).

As misturas mornas distinguem-se dos outros tipos de misturas asfálticas (quentes e frias) pela temperatura de produção e pela resistência e durabilidade dos revestimentos feitos com elas. Dessa forma, o objetivo dessa tecnologia é produzir misturas que apresentem desempenho igual ou superior ao que se tem com as misturas a quente, mesmo que haja uma redução significativa das temperaturas de trabalho, que pode variar entre 20°C e 40°C, a depender do método utilizado (NEWCOMB, 2006 e RUBIO *et al.*, 2012). Com isso, as emissões de poluentes e o consumo energético nos processos de pavimentação também são reduzidos, alinhando essa indústria aos preceitos do desenvolvimento sustentável.

Uma outra forma de reduzir os custos ambientais ligados à pavimentação é o reaproveitamento de materiais de descarte, como por exemplo, resíduos de demolição, pneus usados, escórias siderúrgicas, entre outros. Nesse contexto, as escórias de aciaria destacam-se por consistir em um resíduo que, após resfriamento, beneficiamento e controle de qualidade, passa a ser classificado como agregado siderúrgico, podendo ser utilizadas na fabricação de misturas asfálticas, proporcionando a elas qualidade semelhante ou ainda melhor do que se tem com agregados naturais. Em um país como o Brasil, que produz mais de 31 milhões de toneladas de aço bruto por ano (IABR, 2017), gerando uma quantidade enorme de escória, esse reaproveitamento mostra-se ainda mais interessante, pois reduz bastante a disposição desses materiais em aterros, cujas áreas são cada vez mais escassas. Além disso, a substituição de agregados pétreos naturais pela escória de aciaria diminui ainda a degradação ambiental pela

exploração de jazidas, uma vez que, na pavimentação, os agregados são utilizados em grande escala, correspondendo, por exemplo, a cerca de 95% da massa de misturas asfálticas.

Dessa forma, uma maneira de promover ainda mais a sustentabilidade na pavimentação asfáltica seria aliar as tecnologias de misturas mornas com o uso de agregados de escória de aciaria, reunindo assim as vantagens ambientais apresentadas por essas duas soluções. No entanto, é preciso investigar, por meio de estudos laboratoriais e pela execução e acompanhamento de pistas experimentais, como elas interagem entre si e, conseqüentemente, como é o comportamento mecânico dos revestimentos feitos com misturas asfálticas mornas com agregado siderúrgico sob as ações do tráfego e do clima. Assim, essa ampla investigação é essencial, já que somente com a garantia de que o desempenho apresentado pode ser considerado, no mínimo, equivalente ao de misturas convencionais, será possível promover seu uso em grande escala.

No Brasil, a busca por misturas asfálticas alternativas, como misturas mornas com agregados de escória de aciaria, que resultem em revestimentos de boa qualidade com menores custos é particularmente relevante quando se tem em mente o tamanho de nossa malha rodoviária e a necessidade de ampliação da extensão das vias pavimentadas. Assim, o desenvolvimento de pesquisas nesse sentido pode viabilizar a pavimentação asfáltica em locais onde as tecnologias e materiais atualmente utilizados são insuficientes ou demasiadamente custosos. Dessa forma, a pesquisa desenvolvida visa a contribuir para a consolidação e difusão da tecnologia de misturas mornas no país, além de incentivar o uso de escória de aciaria como agregado, reforçando a importância da sustentabilidade no ramo da pavimentação. Esta pesquisa enquadra-se ainda no contexto mais amplo de um projeto financiado pela FAPDF e pelo CNPq, intitulado "Desenvolvimento de novas misturas asfálticas, matriz de solução de projetos e controle de pavimentos no âmbito do Distrito Federal", o qual foi aprovado no Edital 07/2016 do Projeto de Apoio a Núcleos de Excelência (Pronex).

## **1.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA**

Levando em consideração o contexto apresentado, o problema científico a ser investigado na presente pesquisa pode ser expresso como o seguinte questionamento: como o uso dos aditivos HUSIL e Rediset<sup>®</sup> LQ, a redução das temperaturas de trabalho e a substituição parcial de agregados de calcário por escória de aciaria influenciam no comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas em laboratório?

## **1.2 HIPÓTESE**

O uso dos aditivos HUSIL e Rediset<sup>®</sup> LQ possibilitam a compactação adequada mesmo com temperaturas de trabalho mais baixas e a substituição parcial de agregados de calcário por escória de aciaria proporciona a formação de um esqueleto mineral resistente, resultando em misturas asfálticas de comportamento mecânico satisfatório.

## **1.3 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral dessa pesquisa é avaliar, por meio de ensaios mecânicos, o comportamento de misturas asfálticas mornas produzidas, em laboratório, com dois aditivos diferentes, HUSIL e Rediset<sup>®</sup> LQ, e duas composições de agregados, uma somente com calcário e outra composta também por escória de aciaria, comparando-as entre si e com misturas a quente.

## **1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar o ligante asfáltico puro e modificado com os aditivos químicos (HUSIL e Rediset<sup>®</sup> LQ) a diferentes teores.
- Caracterizar física, química e mineralogicamente os agregados de calcário e de escória de aciaria.
- Analisar o comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente com diferentes composições de agregados de calcário e escória de aciaria.
- Analisar a compactabilidade de misturas asfálticas produzidas em três temperaturas diferentes, com agregados de calcário e diferentes teores dos aditivos.
- Submeter as misturas quentes e mornas (com os aditivos HUSIL e Rediset<sup>®</sup> LQ), compostas por agregados de calcário e escória de aciaria, a ensaios mecânicos, comparando-as entre si.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para se encaixar no modelo de desenvolvimento sustentável, a indústria da pavimentação tem buscado formas de reduzir os impactos negativos que suas atividades provocam no meio ambiente. A ideia de diminuir as temperaturas de trabalho das misturas asfálticas surgiu com este intuito, dando origem a um grupo de tecnologias chamado de misturas mornas (WMA). Além disso, o emprego de materiais de descarte, como a escória de aciaria, em substituição aos agregados naturais contribui para a sustentabilidade na construção de pavimentos. Dessa forma, o uso de misturas mornas com agregados de escória de aciaria torna-se uma opção bastante promissora do ponto de vista ambiental.

Diante disso, este capítulo apresenta, inicialmente, uma revisão bibliográfica acerca das tecnologias de misturas mornas, sua origem e desenvolvimento, bem como suas principais características. Em seguida, trata-se das escórias de aciaria, seu processo de produção, propriedades e aplicações. E, por fim, faz-se uma breve explanação a respeito de estudos recentes sobre o uso dessas escórias em misturas mornas.

### 2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

Com base nas temperaturas médias de produção em usina, as misturas asfálticas podem ser classificadas da seguinte forma: misturas a frio (CMA, do inglês *Cold Mix Asphalt*), produzidas em temperaturas abaixo de 60°C; misturas semimornas (HWMA, do inglês *Half Warm Mix Asphalt*), com temperaturas entre 60 e 100°C; misturas mornas (WMA, do inglês *Warm Mix Asphalt*), entre 100 e 140 °C; e, por fim, misturas a quente (HMA, do inglês *Hot Mix Asphalt*), com produção entre 140 e 190 °C (Rondón, *et al.*, 2015).

As misturas a quente, conhecidas no Brasil pela sigla CBUQ (Concreto Asfáltico Usinado a Quente), são as mais utilizadas em serviços de pavimentação e, segundo Bernucci *et al.* (2008), podem ser produzidas com diversos tipos de granulometria de agregados e ligantes asfálticos, apresentando boa resistência e durabilidade em revestimentos, para os vários níveis de tráfego. Dessa forma, geralmente são necessárias temperaturas altíssimas na usinagem da mistura, para que tanto os agregados pétreos quanto o cimento asfáltico, possam ser devidamente aquecidos, permitindo o recobrimento adequado dos agregados pelo ligante e garantindo a trabalhabilidade e homogeneidade necessárias à mistura. A redução dessas temperaturas de produção sem a perda de qualidade é o que vêm buscando as tecnologias de misturas mornas.

Segundo Motta (2011), as altas temperaturas de produção do concreto asfáltico têm como finalidade: promover a secagem dos materiais pétreos, reduzir a viscosidade do ligante e manter a temperatura da mistura. Os agregados devem ser secos para evitar excesso de umidade na mistura, que pode causar problemas de deslocamento da película de asfalto (*stripping*). Já o aquecimento do ligante é necessário para diminuir sua viscosidade, uma vez que o asfalto passa de semissólido a líquido à medida em que se aumenta a temperatura, permitindo que ele recubra bem os materiais pétreos e que a mistura apresente a trabalhabilidade necessária. Por fim, a manutenção da temperatura é feita principalmente por meio do aquecimento dos agregados de 10 a 15°C acima da temperatura do ligante, já que, por constituírem a maior parte da mistura (por volta de 95% em massa), acabam ajustando a temperatura do asfalto na usinagem e, conseqüentemente, controlando a quantidade de calor da mistura como um todo.

As misturas mornas (WMA) representam um grupo de tecnologias que permitem a diminuição das temperaturas de produção e compactação do CBUQ de 20 a 40°C, segundo Croteau e Tessier (2008). Essas tecnologias tendem a promover o recobrimento completo dos agregados pelo ligante a temperaturas mais baixas, agindo também como facilitadores na compactação ao diminuírem a viscosidade do ligante e/ou aumentar a trabalhabilidade da mistura, sendo os mecanismos que permitem isso variáveis de um método para outro (PROWELL *et al.*, 2012 e CHOWDHURY e BUTTON, 2008).

Dessa forma, mesmo utilizando temperaturas de produção mais baixas, as misturas mornas são capazes de garantir a resistência e a durabilidade do revestimento asfáltico, apresentando desempenho no mínimo igual ao das misturas convencionais em diversas aplicações (EAPA, 2014). Assim, as temperaturas reduzidas dessas misturas geram diversos benefícios ao processo de produção, destacando-se questões ambientais, como a redução do consumo de energia nas usinas e de emissões de poluentes, além da melhoria no ambiente de trabalho dos operários que estão diretamente em contato com os fumos de asfalto.

### **2.1.1 BREVE HISTÓRICO**

A ideia de produzir misturas asfálticas a temperaturas mais baixas não é nova. Em 1956, o professor Dr. Ladis Csanyi, da *Iowa State University*, já havia percebido o potencial do betume espumado no uso como ligante de solo, sendo esse produzido por meio da injeção de vapor de água no betume quente. Desde então, a tecnologia do asfalto espumado, que permite temperaturas de mistura mais baixas, passou a ser usado com sucesso em diversos países. Assim, em 1968, a *Mobil Oil Australia*, que possuía os direitos de patente sobre o método

desenvolvido por Csanyi, modificou o processo original substituindo o vapor por água fria, tornando-o mais prático (MUTHEN, 1998 *apud* KRISTJANSDOTTIR, 2006). Então, segundo Chowdhury e Button (2008), no início da década de 1970, a Chevron desenvolveu metodologias para a dosagem e projeto de misturas para pavimentação estabilizadas com asfalto espumado, publicando, em 1977, um guia prático chamado *Bitumuls Mix Manual*.

Mais tarde, com a crescente preocupação ambiental pelos diversos setores da sociedade em todo o mundo e a realização do Protocolo de Quioto, em 1997, tratado internacional pelo qual os países signatários assumiram o compromisso de reduzir significativamente suas emissões de gases do efeito estufa, passou-se a buscar formas de tornar os processos de pavimentação menos agressivos ao meio ambiente (MOTTA, 2011). Assim, a partir desse tratado, os países da União Europeia, passaram a buscar formas de atingir as metas estabelecidas para a redução de suas emissões.

Nessa mesma época, o Ministério do Trabalho e das Relações Sociais da Alemanha começou a considerar limites de exposição a fumos de asfalto pelos operários da indústria da pavimentação e, em 1997, a ideia de reduzir as temperaturas de produção do concreto asfáltico foi apresentado no “Fórum Alemão de Betume”. Esses fatores levaram ao desenvolvimento de estudos sobre a produção de misturas asfálticas mornas (WMA), que seriam capazes de reduzir o consumo energético e as emissões de poluentes e fumos de asfalto nos processos de pavimentação (PROWELL *et al.*, 2012).

Assim, segundo Prowell *et al.* (2012), os primeiros pavimentos de WMA, utilizando diferentes técnicas, foram construídos na Alemanha e na Noruega na última metade da década de 1990. Além disso, em 1998, a “Associação Alemã de Asfalto” começou o programa “Asfalto de Baixa Temperatura”, cujo objetivo principal era desenvolver e investigar diversos métodos de produção de misturas asfálticas quentes a temperaturas mais baixas (BARTHEL *et al.*, 2003). Somente no ano de 2002, um circuito de estudos da *National Asphalt Pavement Association* (NAPA), que incluiu um tour pela Europa para a análise de processos e produtos, introduziu a tecnologia WMA nos Estados Unidos. E em 2004, várias pesquisas nessa área passaram a ser desenvolvidas nesse país financiadas por órgãos nacionais estadunidenses e empresas ligadas a misturas mornas (NEWCOMB, 2006).

Dessa forma, em 2005, foi formado um grupo de trabalho na área de misturas mornas (*WMA Technical Working Group –WMA TWG*) pela própria NAPA e pela *Federal Highway Administration* (FHWA), a fim de desenvolver uma coleção de dados sobre questões de

engenharia, de meio ambiente e de higiene e segurança do trabalho relacionadas a essa nova tecnologia. Já em 2007, foi feita uma nova expedição à Europa pela FHWA em parceria com a AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) e a NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*), com o intuito de coletar informações adicionais sobre as tecnologias WMA que auxiliassem sua implementação nos Estados Unidos, especialmente, quanto ao desempenho a longo prazo. Nesse mesmo ano, teve início o primeiro projeto de pesquisa NCHRP em WMA, o qual foi encerrado em 2011, com o desenvolvimento de métodos de dosagem para misturas mornas (PROWELL *et al.*, 2012).

Desde então, diversos estudos acerca das propriedades e desempenho de misturas asfálticas mornas vem sendo desenvolvidas não só na Europa e nos Estados Unidos, mas também em diversos outros países, como Austrália, África do Sul, Índia, China, Colômbia, entre outros. No geral, observa-se, com as experiências mundiais, que, fora as evidentes vantagens ambientais, as misturas mornas apresentam desempenho no mínimo equivalente às misturas quentes, exibindo, entre outras características mecânicas, módulos, vida em fadiga, resistência a deformações permanentes satisfatórios (CAPITÃO *et al.*, 2012). No entanto, segundo Rubio *et al.* (2012), é importante o desenvolvimento de pesquisas mais aprofundadas acerca do desempenho a longo prazo das WMAs para atestar que sua performance global é realmente comparável à das misturas quentes, o que ainda é limitado por essa ser uma tecnologia relativamente nova. Além disso, Rondón *et al.* (2015) destacam também que há a necessidade de maiores investigações acerca dos impactos ambientais e econômicos envolvidos na produção e aquisição contínua dos aditivos usados nas misturas mornas, considerando uma análise de ciclo de vida completa do pavimento.

O Brasil também pode ser inserido nesse contexto, uma vez que diversos estudos sobre a tecnologia de misturas mornas, inclusive com parcerias entre Universidades e concessionárias de rodovias, têm sido desenvolvidos desde a última década. É possível encontrar uma boa diversidade de pesquisas brasileiras com o emprego de diferentes tecnologias, como o uso de asfalto-espumado – por meio da adição de zeólitas, de agregados úmidos ou de água diretamente – e de aditivos comerciais, como Gemul XT14, Evotherm, CCBit, AD-Warm e Rediset<sup>®</sup> WMX, e até mesmo alternativos, como cera de carnaúba, óleo de girassol e óleo de mamona (LUCENA *et al.*, 2017; FEITOSA, 2015; OTTO, 2009; WARGHA FILHO, 2013; BUDNY, 2012; SOUZA, 2012; CAVALCANTI, 2010). Verifica-se ainda a aplicação dessas técnicas em misturas asfálticas com as mais diversas composições: com granulometrias densas e descontínuas, com ligantes CAP 50/70, CAP 30/45 e modificados por polímeros e borracha,

incluindo também materiais fresados (RIVOIRE JR., 2014; OLIVEIRA, 2013; SILVEIRA *et al.*, 2007; ZUBARAN E MOTTA, 2015).

Além disso, essas misturas foram testadas em laboratório por uma extensa gama de ensaios mecânicos e em campo, com a execução de diversos trechos experimentais, inclusive em importantes rodovias, como a Presidente Dutra, a Rodovia dos Bandeirantes, a SPA 248/055, a Régis Bittencourt (BR 116) e a BR 040 (MOTTA, 2011; MERIGHI E SUZUKI, 2017; MELLO, 2012; MOTTA *et al.*, 2012). No geral, os estudos indicam que as misturas mornas se mostram promissoras, apresentando resultados mecânicos satisfatórios e com processos produtivos sem maiores dificuldades quando comparadas a misturas convencionais. Observou-se, no entanto, que um ponto que merece maior cuidado e atenção no uso das WMAs é a resistência às deformações permanentes. Assim, percebe-se que há esforço para entender essa “nova” tecnologia da pavimentação asfáltica e desenvolver essa técnica no contexto brasileiro, buscando incentivar e viabilizar pavimentos mais eficientes e sustentáveis, com revestimentos de boa qualidade.

### **2.1.2 TÉCNICAS DE PRODUÇÃO**

As formas de produção das misturas asfálticas mornas são basicamente três: formação de espuma no asfalto, incorporação de aditivos orgânicos e adição de aditivos químicos ou surfactantes. Para cada uma dessas formas ou mesmo incluindo mais de uma delas, diversas técnicas e produtos foram desenvolvidos ao longo dos últimos anos. Além disso, a redução de temperatura obtida por cada uma das técnicas varia bastante com os produtos e a dosagem utilizados, dependendo ainda do tipo de mistura, teor de asfalto, condições do tempo, tipo de ligante, dentre outros fatores (MOTTA, 2011 e PROWELL *et al.*, 2012). Segundo Rondón *et al.* (2015), há duas formas de incorporação de aditivos para a produção de misturas mornas: por via úmida, no ligante, ou por via seca, nos agregados, sendo a primeira mais utilizada no geral.

O grupo que considera processos de formação de espuma para a produção das misturas mornas introduz uma pequena quantidade de água no ligante asfáltico quente por meio de injeção direta, agregados úmidos ou materiais hidrofílicos, como as zeólitas (D'ANGELO *et al.*, 2008). As zeólitas são silicatos de alumínio hidratados que contêm cerca de 20% de água, a qual é liberada aos poucos em temperaturas acima de 100°C (EAPA, 2014). Dessa forma, a água injetada nesses processos vaporiza e faz com que a fase do ligante sofra uma expansão de 5 a 10 vezes em volume, segundo Prowell *et al.* (2012), resultando na diminuição de sua viscosidade. Esse processo faz com que haja uma melhoria no recobrimento dos agregados e na compactação da



mistura. Dentre os processos de formação de espuma, podemos citar: Aspha-min®, Advera® WMA, LEAB®, WAM-Foam®, entre outros.

A categoria de tecnologias de misturas mornas que faz uso de aditivos orgânicos (ceras) proporciona a redução da viscosidade do ligante em temperaturas acima do ponto de fusão desses compostos, que passam a interferir nas propriedades do asfalto. Dessa forma, o tipo e o teor de aditivo ou cera devem ser cuidadosamente escolhidos, para que a temperatura em que este sofre fusão seja maior do que as temperaturas de serviço esperadas para o pavimento, diminuindo os riscos de deformações permanentes e trincamentos a baixas temperaturas (PROWELL *et al.*, 2012). Tais efeitos podem ser causados, respectivamente, pela redução excessiva da viscosidade do ligante e pelo enrijecimento exagerado da mistura pela incorporação de grandes quantidades de aditivo, uma vez que, com o resfriamento da mistura, esses elementos se cristalizam de modo disperso no ligante, aumentando sua rigidez (D'ANGELO *et al.*, 2008). São exemplos de aditivos orgânicos usados em misturas mornas: Asphaltan B®, Licomont® BS 100 e Sasobit®, sendo esse último um dos mais utilizados mundialmente (RONDÓN *et al.*, 2015).

Por fim, o grupo que utiliza aditivos químicos ou surfactantes na produção de misturas mornas é o mais recentemente desenvolvido e conta com diversos mecanismos capazes de melhorar o recobrimento dos materiais pétreos pelo ligante asfáltico e a compactação da mistura em campo, por meio de um efeito lubrificante (PROWELL *et al.*, 2012). Assim, em geral, esses aditivos não alteram a consistência do asfalto, mas agem na interface agregado/ligante microscopicamente, alterando as forças de fricção nesse contato quando submetidos a determinado intervalo de temperatura, tipicamente de 85 a 140°C (EAPA, 2014). Além disso, em alguns casos, os aditivos químicos são formados por um pacote de produtos, que agem não só como surfactantes, mas também como emulsificantes e melhoradores de adesividade (PROWELL *et al.*, 2012). Dentre os aditivos químicos usados atualmente estão: Cecabase RT®, Rediset® WMX e LQ, Evotherm®, HyperTherm® WMA, entre outros.

### **2.1.3 BENEFÍCIOS**

Os principais benefícios associados às tecnologias de misturas mornas dizem respeito a questões ambientais (RONDÓN *et al.*, 2015). O uso de temperaturas de produção mais baixas não só proporciona menores emissões de vapores e fumos de asfalto durante a mistura na usina e a aplicação em campo, mas também reduz a quantidade de energia necessária e, conseqüentemente, a queima de combustíveis no processo de usinagem (PROWELL *et al.*,

2012). A Figura 2.1 ilustra como a temperatura de produção, associada a cada tecnologia de misturas asfálticas, influencia no gasto energético que se tem, o que pode ser estendido à quantidade de gás carbônico e outros poluentes que é emitida.

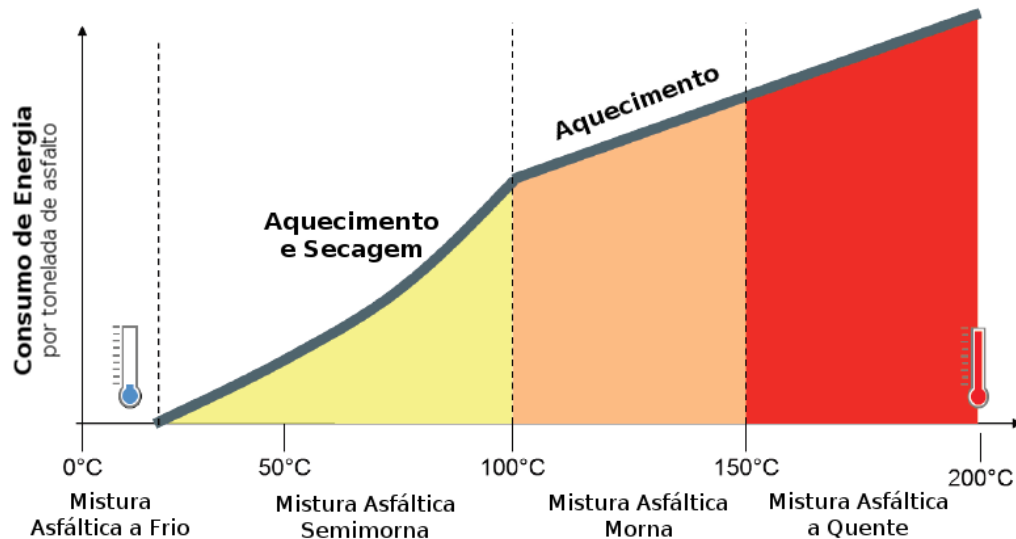


Figura 2.1 – Gasto de combustível em função da temperatura de produção de misturas asfálticas (modificado – EAPA, 2014)

Além disso, a minimização das emissões de fumos de asfalto e, conseqüentemente, de seus odores, melhora as condições de trabalho dos operários durante a usinagem e a compactação das misturas asfálticas, como pode ser observado na Figura 2.2.



Figura 2.2 - Diferença nas emissões de fumos e gases durante descarregamento, no caminhão, de misturas asfálticas a quente (à esquerda) e morna (à direita) (FERREIRA *et al.*, 2009)

No Brasil, medições feitas por Merighi e Suzuki (2017) em torno do caminhão basculante na usina indicaram reduções de 64% na emissão de compostos orgânicos voláteis, 90% nos fumos voláteis de asfalto e 86% nos fumos totais. Já segundo BRANDT e DE GROOT (1999) *apud* EAPA (2014), como uma regra prática, pode-se dizer que a cada 12°C de redução da

temperatura de produção, a emissão de fumos cai cerca de 50%. Tais reduções são apontadas por EAPA (2014) como a principal razão pela qual a indústria de asfalto europeia incentiva o uso de misturas mornas, já que, além de diminuir a exposição dos trabalhadores, a mitigação dos fumos de asfalto proporciona um ambiente de trabalho com temperaturas mais agradáveis e menos odores. Essas melhores condições durante os processos de produção e aplicação da mistura traz ainda outros benefícios para a indústria, favorecendo na qualidade do trabalho e podendo ainda aumentar a produtividade na obra (D'ANGELO *et al.*, 2008).

Quanto às emissões das usinas, segundo Prowell (2007), estudos na Europa apontam que podem-se esperar quedas da ordem de 30 a 40% para gás carbônico (CO<sub>2</sub>), 35% para dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), 50% para compostos orgânicos voláteis (COVs), de 10 a 30% para monóxido de carbono (CO), de 60 a 70% para óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e de 20 a 25% para materiais particulados nas produções de misturas mornas em comparação a misturas a quente. Esses números são possíveis graças à diminuição da queima de combustíveis nas usinas, a qual varia entre 20 a 35%, segundo D'Angelo *et al.* (2008). Assim, além da questão ambiental, com menos emissões de poluentes e menor consumo de recursos naturais, há também um viés econômico nessa redução de gasto energético nas usinas, uma vez que os custos com combustíveis ficam menores. O quanto será economizado, no entanto, depende de vários fatores, como as temperaturas, a umidade dos agregados e o tipo de combustível utilizado (ANDERSON *et al.*, 2008)

Além disso, existem ainda diversas vantagens do ponto de vista construtivo no emprego de tecnologias de misturas mornas em revestimentos asfálticos. A menor viscosidade dos ligantes e/ou a melhor trabalhabilidade das misturas a temperaturas mais baixas, proporcionadas pelas diversas técnicas disponíveis, contribuem para uma maior facilidade de compactação. Isso, aliado ao fato de que, com temperaturas mais baixas, a taxa de esfriamento da mistura é menor, favorecem a construção em épocas e locais frios e permitem ainda maiores tempos de transporte da usina ao local da obra (D'Angelo *et al.*, 2008). Assim, há menores riscos de perda de material pelo resfriamento excessivo da massa asfáltica inviabilizando a compactação. Essa questão favorece ainda a realização de serviços de pavimentação no período da noite, que, em muitos casos, como em aeroportos, é quando existe a possibilidade de fechamento do tráfego para manutenção da via (MOTTA, 2011).

Outra questão associada às temperaturas de usinagem e compactação mais baixas é o menor envelhecimento do ligante, uma vez que há uma menor oxidação do asfalto pelo seu aquecimento e, conseqüentemente, um enrijecimento mais baixo do mesmo. Esse menor

envelhecimento a curto prazo, pode levar a uma mistura mais flexível e que apresente melhor resistência a trincas por fadiga durante a vida de serviço. No entanto, essa questão merece atenção especial em locais de clima quente, já que ela pode contribuir para uma perda de estabilidade, resultando em deformações permanentes (NEWCOMB, 2006).

Voltando às questões de apelo ambiental, destaca-se ainda que as misturas mornas se apresentam como uma ótima alternativa no uso de materiais reciclados. Quanto ao aproveitamento de material fresado (RAP, do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*), D'Angelo *et al.* (2008) apontam que essas tecnologias são benéficas ao facilitar a compactação e ajudar na compensação do ligante envelhecido do fresado, devido à diminuição do envelhecimento a curto prazo sofrido pelo ligante. Isso permite que maiores porcentagens de material reciclado sejam incorporadas na mistura, podendo chegar a 50%, como comprovado por algumas experiências de sucesso (PROWELL *et al.*, 2012 e ANDERSON *et al.*, 2008). Além disso, segundo Motta (2011), o uso das técnicas de misturas mornas se faz ainda mais pertinente com asfaltos modificados por polímeros e borrachas recicladas de pneu, já que eles requerem temperaturas ainda maiores do que os asfaltos convencionais.

## **2.2 ESCÓRIA DE ACIARIA**

Além do aço, o processo siderúrgico resulta em materiais chamados de coprodutos, que podem ser utilizados, de forma ambientalmente adequada, como matéria-prima ou fonte de energia, na própria cadeia produtiva ou em outras áreas, como a agricultura, a pavimentação e a construção civil. Dentre eles, a escória de aciaria destaca-se por consistir em um resíduo que, após resfriamento, beneficiamento e controle de qualidade, passa a ser classificado como agregado siderúrgico, podendo ser utilizada em diversos tipos de estruturas, incluindo lastros rodoviários, infraestrutura de pavimentos, aterros, entre outros. O reaproveitamento dessas escórias contribui, portanto para um desenvolvimento mais sustentável, não só por reduzir a disposição de resíduos em aterros, mas também, por diminuir a degradação ambiental pela exploração de jazidas minerais.

Assim, para melhor entender do que a escória de aciaria é constituída e como ela se comporta quando usada como agregado, é importante entender os processos a partir dos quais ela é gerada. Dessa forma, este tópico inicia-se com uma breve descrição dos processos siderúrgicos e segue com a apresentação das propriedades e características relevantes desse coproduto para o emprego no contexto da pavimentação, finalizando com suas possíveis aplicações, especialmente, em revestimentos asfálticos.

## 2.2.1 PROCESSO PRODUTIVO

O aço é uma liga metálica composta essencialmente por ferro e uma pequena porcentagem de carbono, tendo uma infinidade de aplicações no nosso cotidiano. Esse material é de grande importância do ponto de vista econômico e industrial, por estar presente em diversas cadeias produtivas. Assim, segundo o Instituto Aço Brasil (IABr), no ano de 2016, a China sozinha foi responsável pela produção de mais de 800 milhões de toneladas de aço bruto, sendo o maior produtor mundial. Já o Brasil ocupa a 9ª posição nesse *ranking* com uma produção de cerca de 31,3 milhões de toneladas, o que representa mais da metade do que é produzido em toda a América Latina (IABR, 2017).

O processo de produção do aço, representado de forma esquemática na Figura 2.3, pode ser dividido basicamente em cinco etapas: preparação da carga, redução do minério de ferro, refino, lingotamento e conformação mecânica.

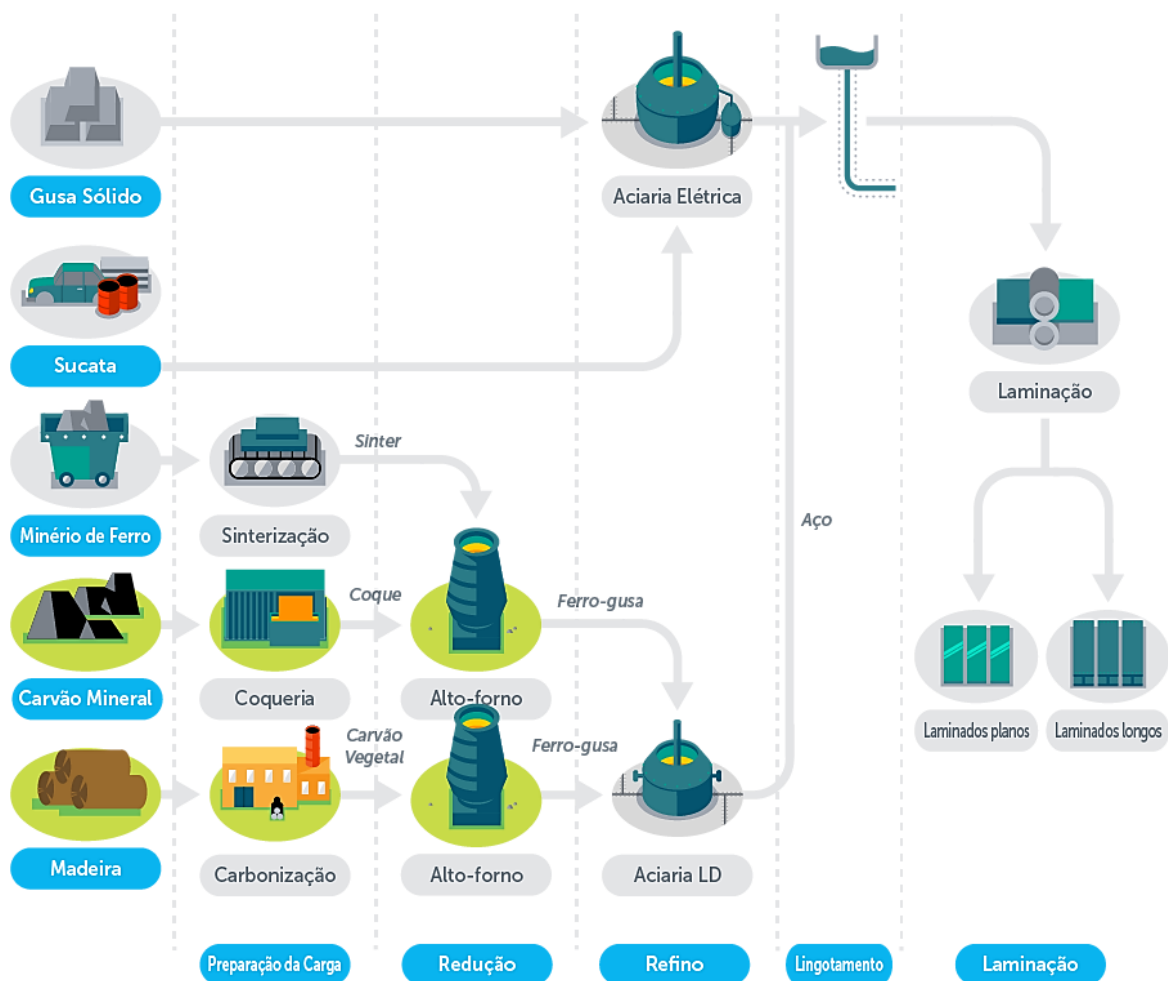


Figura 2.3 – Processo de fabricação do aço (IABR, 2016)

A primeira etapa consiste no processamento do minério de ferro e do carvão mineral ou vegetal. Em seguida, ocorre a redução nos altos-fornos, onde o oxigênio presente nos óxidos do minério é removido, resultando numa liga de ferro e carbono denominada ferro gusa. Esse produto, que contém ainda impurezas de fósforo, enxofre e silício, é levado então para o processo de refino na aciaria, onde pode haver ainda a adição de sucata. Aí ocorre a redução do teor de carbono e dos compostos indesejados até os valores adequados ao tipo de aço pretendido. A depender do tipo de usina, essa pode ser a primeira etapa de produção, e, nesse caso, são as sucatas, principalmente, que passam pelo refino. Feito isso, o aço vaza em lingoteiras ou em máquinas de lingotamento contínuo, onde é resfriado e toma a forma de lingotes ou de produtos semiacabados, como tarugos. Por fim, na etapa de conformação, esses produtos são trabalhados mecanicamente, por meio de processos como a laminação, e o aço assume sua forma final, tal como chapas, fios, vergalhões, perfis, entre outros (IABR, 2014).

A obtenção do aço líquido (durante o refino) pode ser feita por meio de dois processos principais: em fornos elétricos a arco (EAF, do inglês, *Electric Arc Furnace*) ou em conversores a oxigênio (BOF, do inglês, *Basic Oxygen Furnace*), sendo a tecnologia LD (*Linz-Donawitz*) a mais utilizada nesse caso (IABR, 2014). A diferença entre eles está no tipo de carga metálica e da fonte de energia. No processo EAF, utiliza-se basicamente a sucata e a energia necessária à fusão dos materiais no forno é gerada por meio de um arco elétrico formado entre os eletrodos e a carga metálica. Já no conversor LD, como pode ser visto na Figura 2.4, a carga metálica é composta principalmente por gusa líquido (em torno de 70-75%), mas conta também com uma quantidade menor de sucata. Nesse caso, a energia necessária ao processo é proveniente do calor de aquecimento do próprio ferro gusa e de reações exotérmicas, que ocorrem entre elementos químicos contidos na carga metálica e o oxigênio injetado em velocidade supersônica por meio de uma lança refrigerada (JUCKES, 2003; MACHADO, 2000; GONÇALVES, 2005; YILDIRIM e PREZZI, 2011). Atualmente, segundo IABr (2017), cerca de 77% da produção de aço bruto no Brasil é feita por meio de conversores a oxigênio LD em usinas integradas.

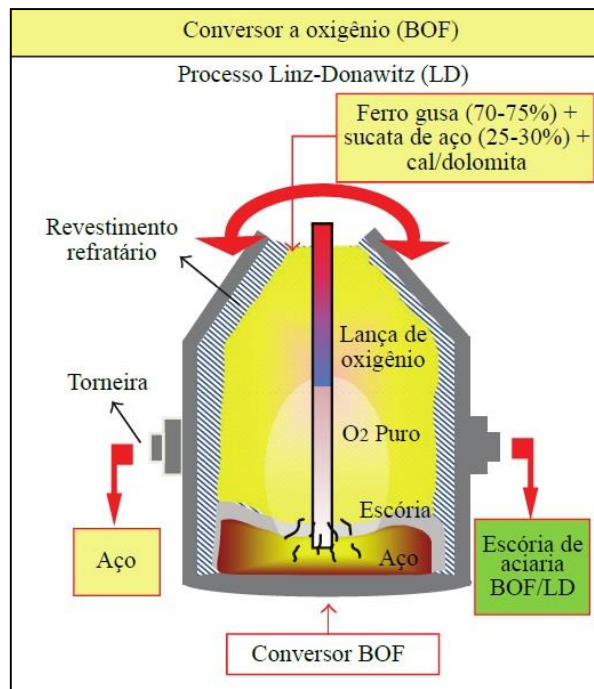


Figura 2.4 – Esquema de produção do aço em conversor a oxigênio (modificado – YILDIRIM e PREZZI, 2011)

Todas essas etapas de fabricação do aço geram uma grande quantidade de resíduos (como lamas, pós, escórias e carepas) a uma taxa de quase 600 kg por tonelada de aço bruto (IABR, 2016). As escórias correspondem a mais de 70% desses materiais e podem ser classificadas como de alto-forno, quando produzidas na etapa de redução do minério de ferro (produção do ferro gusa), ou de aciaria, resultantes do processo de refino (produção do aço). Esse último grupo pode ser subdividido ainda, quanto ao tipo de processo utilizado, em escórias de aciaria EAF e escórias de aciaria LD.

A formação dessas escórias é de grande importância no processo de fabricação do aço, uma vez que, além de proteger o material refratário do forno, é por meio dela que são retiradas grande parte das impurezas inerentes à produção das ligas metálicas. Para tanto, são introduzidos, nos fornos e conversores, componentes escorificantes, como a cal (CaO) e a dolomita (MgCa(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>). Dessa forma, durante o processo de refino, a injeção de oxigênio provoca a oxidação de elementos indesejados, como alumínio, fósforo, silício, manganês e carbono, que se combinam à cal e/ou à dolomita, formando as escórias. Assim, as reações que ocorrem durante a retirada de impurezas do aço determinam a composição química desse coproduto (MACHADO, 2000; GONÇALVES, 2005; YILDIRIM e PREZZI, 2011).

A escória ainda na forma líquida é retirada do forno e levada a pátios de resfriamento, onde é resfriada e solidificada de forma lenta ao ar ou por meio da aspersão de água. Em seguida, esse

material é levado a uma planta de beneficiamento, onde é britado e separado granulometricamente. Além disso, por meio de uma separação magnética, as frações metálicas ainda presentes são retiradas para serem recicladas, no próprio processo de produção de aço, como sucata. Por fim, o restante do material é estocado em pilhas no pátio de deposição, onde passa por um período de cura ao ar livre, antes de sua destinação final. Na etapa de beneficiamento, as escórias podem passar ainda por um tratamento especial para redução da expansibilidade, por meio de processos de umectação e aeração, durante o qual elas são monitoradas por ensaios e testes laboratoriais (GUMIERI, 2002; FREITAS, 2007; MARTINI, 2015).

### **2.2.2 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES**

Segundo Yildirim e Prezzi (2011), o conhecimento das propriedades químicas, mineralógicas e morfológicas da escória de aciaria é essencial, visto que elas estão intimamente ligadas às características mecânicas e cimentantes desse material, as quais tem um papel fundamental na sua utilização. Essas propriedades são determinadas pelos processos que deram origem à escória e, portanto, o conhecimento das etapas de produção do aço e do beneficiamento desse coproduto também é de grande importância.

Assim, a escória de aciaria é um material bastante heterogêneo, uma vez que sua composição depende de fatores como o tipo de forno empregado no refino do aço, as matérias-primas utilizadas, as especificações do aço produzido, o modo como é feito o resfriamento do resíduo, entre outros, sendo bastante variável de uma usina para outra ou até mesmo entre corridas diferentes de uma mesma usina. No entanto, pode-se dizer que ela é constituída principalmente por óxidos e silicatos que são formados pela combinação de escorificantes e elementos eliminados no processo de produção do aço, dentre os quais podemos citar o oxigênio, o óxido de cálcio (CaO), o carbono e íons de fósforo, alumínio e silício, por exemplo (EMERY, 1984; CASTELO BRANCO, 2004; MACHADO, 2000).

As escórias de aciaria LD e EAF tem, no geral, composições química e mineralógica similares, sendo os óxidos de cálcio e ferro os dois maiores constituintes químicos em ambos os casos, segundo Yildirim e Prezzi (2011). Para as escórias LD, esses autores afirmam que, a depender da eficiência do forno, os teores de óxidos de ferro (FeO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) podem chegar a 38%, já para o CaO a porcentagem típica é geralmente maior que 35%. Também em alta concentração, encontra-se a sílica (SiO<sub>2</sub>), com valores entre 7 e 18%, mas observam-se também, em menores quantidades, óxidos de alumínio e magnésio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e MgO), cujos teores podem chegar a no



máximo 4% e 14% respectivamente. Complementando essas informações, a Tabela 2.1 apresenta composições típicas de escórias de aciaria LD segundo IBS (1998) *apud* Castelo Branco (2004), no contexto brasileiro, e Shi (2004), de forma generalizada.

Tabela 2.1 – Composição típica de escórias de aciaria LD (concentrações em porcentagem)

<b>Componentes</b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>FeO</b>	<b>MnO</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>
IBS (1998)	6 – 45	1 – 9	7 – 16	1 – 4	8 – 30	3 – 7	-
SHI (2004)	30 – 55	5 – 15	8 – 20	1 – 6	10 – 35	2 – 8	0,4 – 2

Do ponto de vista mineralógico, as escórias de aciaria também apresentam uma grande variedade de componentes, incluindo as fases minerais listadas na Tabela 2.2, além de soluções sólidas entre FeO, MnO, MgO e CaO (SHI, 2004; MACHADO, 2000; WANG *et al.*, 2010; YILDIRIM e PREZZI, 2011).

Tabela 2.2 – Fases mineralógicas típicas em escórias de aciaria

<b>Mineral</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Abreviação</b>
<b>Silicato dicálcico</b>	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
<b>Silicato tricálcico</b>	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
<b>Silicato de magnésio</b>	2MgO.SiO <sub>2</sub>	M <sub>2</sub> S
<b>Ferrita dicálcica</b>	2CaO.Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> F
<b>Mervinita</b>	3CaO.MgO.2SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> MS <sub>2</sub>
<b>Brownmillerita</b>	4 CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF
<b>Wustita</b>	FeO	F
<b>Periclásio</b>	MgO	M
<b>Cal</b>	CaO	C

São esses elementos, em maior ou menor quantidade, que conferem às escórias de aciaria as propriedades que permitem a elas serem tratadas como agregados siderúrgicos. Assim, apesar de heterogêneas, suas partículas são, no geral, bastante angulares, rugosas e porosas, exibindo, conseqüentemente, boa estabilidade devido ao elevado ângulo de atrito. Além disso, em virtude do alto teor de óxido de ferro, as escórias de aciaria apresentam alto peso específico e alta dureza (próxima a do quartzo), sendo caracterizadas também por uma elevada resistência à abrasão e ao intemperismo (durabilidade), bem como por uma boa capacidade de carga pelo método CBR (MOTZ e GEISELER 2001; WSDOT, 2015; SOUZA, 2007).

No entanto, uma das características mais importantes da escória de aciaria, quanto ao uso como agregado, é o seu comportamento expansivo, que pode inclusive limitar sua aplicação. Essa instabilidade volumétrica, em menor proporção, pode estar associada ao polimorfismo do

silicato dicálcico ( $C_2S$ ) e à oxidação do ferro metálico residual. A maior parte da expansão sofrida pelas partículas de escória de aciaria, porém, ocorre devido às reações de hidratação dos óxidos de cálcio e magnésio livres, podendo chegar a uma variação de 10% ou mais em volume, geralmente acompanhada da desintegração dos grãos e uma consequente perda de resistência (KANDHAL e HOFFMAN, 1997; EMERY, 1984; JUCKES, 2003; CASTELO BRANCO, 2004; MACHADO, 2000; FERNANDES, 2010).

Isso ocorre, porque, ao sofrer hidratação, esses óxidos formam produtos de menor densidade, resultando em um aumento de volume do mineral. Para a cal livre ( $CaO$ ), essa reação acontece de forma rápida e, portanto, a maior parte da expansão provocada por ela ocorre em alguns dias ou semanas, quando colocada na presença de água. Por outro lado, o periclásio ( $MgO$ ), por se encontrar na forma cristalina, hidrata-se a uma taxa bem mais lenta, causando mudanças significativas de volume durante meses ou até anos. Assim, pode-se dizer que o óxido de cálcio é responsável pela expansão inicial da escória, enquanto o óxido de magnésio pela manutenção desse fenômeno ao longo do tempo. Essa expansão, no entanto, depende de diversos fatores, como o teor desses compostos na escória, a umidade, a temperatura, a disponibilidade de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) no ambiente e o tamanho dos grãos (EMERY, 1984; TAVARES, 2012; YILDIRIM e PREZZI, 2011; MACHADO, 2000; FERNANDES, 2010; WANG *et al.*, 2010; JUCKES, 2003).

Diante disso, para fins de aplicação como agregado, a escória de aciaria deve passar por um tratamento que vise à sua estabilização volumétrica. Um dos métodos mais usuais consiste em submeter esse material a um período de cura em pilhas de estocagem para proporcionar a hidratação dos óxidos expansivos, o que pode ser desencadeado simplesmente pela umidade do ar e pela chuva ou pela aspersão de água natural ou aquecida (MOTZ e GEISELER, 2001; MACHADO, 2000; ROHDE *et al.*, 2003; TAVARES, 2012). O tempo necessário para reduzir ao máximo a expansibilidade da escória, nesse processo, varia entre três meses e um ano, mas normalmente adota-se uma cura de seis meses, segundo Rohde *et al.* (2003). Para aumentar a velocidade dessa estabilização, no entanto, Machado (2000) sugere a redução da granulometria do material, a fim de aumentar a superfície de contato da escória com a água, e o aumento do teor de umidade do meio até a saturação, facilitando assim as reações de hidratação. A eficiência da cura da escória pode ser elevada ainda pela injeção de vapor, reduzindo o tempo de estabilização de meses para alguns dias ou mesmo horas (FERNANDES, 2010).

Além disso, Motz e Geiseler (2001) destacam que, adicionalmente ao método de cura ao ar livre, a separação das escórias com alto e baixo teor de cal livre em pilhas diferentes, após a análise química de amostras ainda líquidas, pode ajudar a garantir uma estabilidade volumétrica suficiente. Esses autores citam ainda que uma outra possibilidade de estabilização consiste no tratamento da escória ainda no estado líquido, fora da linha de produção do aço, por meio da injeção de oxigênio e areia seca, como fonte de sílica. Nesse processo, aumenta-se a temperatura para manter a escória líquida e dissolver a areia, causando a dissolução da cal livre e sua ligação química com outros elementos. Assim, a escória passa a exibir teores de CaO abaixo de 1% em massa e, portanto, não apresenta expansão.

### **2.2.3 APLICAÇÕES COMO AGREGADO SIDERÚRGICOS**

Segundo Motz e Geiseler (2001), a indústria do aço, tradicionalmente, tem produzido coprodutos que têm sido utilizados com sucesso para diversos fins. O uso de escórias como fertilizantes na agricultura, por exemplo, já era feito em 1880 e, desde então, as siderúrgicas passaram a controlar e até mesmo modificar seus processos de produção para que as escórias geradas cumprissem com requisitos técnicos e tivessem a qualidade necessária para seu melhor aproveitamento. Diante disso, a escória deve ser considerada como um produto e não, um rejeito, e, sendo assim, devido aos esforços da indústria de ferro e aço, desde 1993, ela não consta mais na lista de resíduos da União Europeia (GEISELER, 1996).

Segundo IABr (2016), no ano de 2015, foram produzidas, no Brasil, cerca de 8,5 e 5,5 milhões de toneladas de escória de alto-forno e de aciaria, respectivamente. Além de as escórias de alto-forno serem produzidas em maior escala, elas são vendidas pelas siderúrgicas, quase que em sua totalidade, para a indústria do cimento, sendo seu reaproveitamento bastante estabelecido. Já para as escórias de aciaria, as destinações são mais variadas: vendas e doações somam quase 60% e a reutilização interna corresponde a 26%, enquanto cerca de 15% fica em estoque e o que é destinado à disposição final fica em torno de 2%. Além disso, elas também apresentam uma maior diversidade de aplicações, dentre as quais se destacam a construção de bases e sub-bases de estradas e o nivelamento de terrenos e aterros, que correspondem, cada uma, a mais de 40% dos usos.

Nesse contexto, observa-se que ainda há espaço para um crescimento no reaproveitamento das escórias, em especial, as de aciaria. É importante, no entanto, que o tratamento dado a elas antes de sua destinação e, conseqüentemente, as propriedades apresentadas por elas estejam aliados ao tipo de aplicação que será feita. Na agricultura, as escórias de aciaria podem ser empregadas

como fertilizantes à base de fosfatos e aditivos no cultivo de plantas e algas, sendo desejável, nesses casos, um alto teor de  $P_2O_5$ . Além disso, escórias com altas concentrações de CaO e MgO podem ser utilizadas, nessa área, como corretivos de solos ácidos. Já na mineração, graças às suas altas taxas de alcalinidade, as escórias de aciaria podem ser utilizadas no controle de drenagem ácida (CASTELO BRANCO, 2004 e FERNANDES, 2010).

Por outro lado, na engenharia civil, esses coprodutos têm aplicações em diversos campos. Assim, devido à sua composição semelhante à do clínquer, que inclui silicatos dicálcicos e tricálcicos, eles podem ser utilizados como matéria-prima na produção de cimento Portland ou mesmo como aditivo na produção de concreto. Pode-se ainda citar o emprego das escórias de aciaria na construção de lastros de ferrovias – que se torna interessante diante do alto peso específico e da boa resistência e drenabilidade apresentados por elas – e na estabilização de solos, devido à sua excelente forma, angularidade, rugosidade e resistência à abrasão. Na área da geotecnia, elas podem ser utilizadas também na execução de aterros, em obras de contenção (na forma de gabiões), na proteção de taludes de barragens (rip-rap), entre outros (MACHADO, 2000; CASTELO BRANCO, 2004; ROHDE, 2002; FERNANDES, 2010).

No entanto, pelo que se observa mundialmente, a principal aplicação das escórias de aciaria consiste no seu uso como agregado nas diversas camadas que formam a estrutura de um pavimento. Segundo Silva (1994) *apud* Castelo Branco (2004), a utilização dos agregados siderúrgicos em revestimentos asfálticos e/ou na infraestrutura de estradas vem sendo feita desde a década de 1970 em vários países, como Estados Unidos, Inglaterra, Japão, Canadá, França, Alemanha, Polônia e Rússia. Já no Brasil, Silva (1994) *apud* Rohde (2002) relata que esse tipo de aplicação teve início em meados da década de 1980, no estado do Espírito Santo, onde a mistura da escória de aciaria com materiais de absorção (solo) e com areia natural, em camadas de base e em misturas asfálticas, respectivamente, permitiu o sucesso de sua utilização, mesmo sem cura prévia. Além disso, nesses projetos, verificou-se também uma redução nos custos em relação à utilização de agregados pétreos.

De acordo com Motz e Geiseler (2001), na década de 1970, foram construídas, na Europa, pistas experimentais em que foram utilizadas escórias de aciaria tanto nas camadas de base e sub-base como no revestimento asfáltico. Esses pavimentos foram acompanhados ao longo do tempo, possibilitando não só a investigação de seus desempenhos a curto e longo prazo, mas também a comparação entre agregados siderúrgicos e convencionais. Essas análises confirmaram o sucesso do uso de escórias de aciaria como material de construção em pavimentos, que vinha sendo observado em vários países europeus, incentivando a indústria do aço e as autoridades a

desenvolverem cada vez mais pesquisas na área. Dentre os resultados obtidos nessas pistas, destacam-se: a boa resistência a deformações permanentes e ao polimento apresentada pelos revestimentos asfálticos ao longo de mais de 25 anos, mesmo sob tráfego pesado; maior capacidade de carga nas camadas com agregados siderúrgicos; manutenção da estabilidade das camadas ao longo do tempo, uma vez cumpridos os requisitos quanto à estabilidade volumétrica dos agregados; e ausência de dano ambiental por lixiviação.

Segundo Emery (1984), o uso de escórias de aciaria em misturas asfálticas resulta em um excelente produto e minimiza o potencial expansivo, uma vez que a película de asfalto dificulta o acesso da umidade aos grãos e a presença de vazios permite alguma variação volumétrica sem grandes problemas (o que, no entanto, não exclui a necessidade de cuidados especiais quanto esse fator). Essas inferências decorrem da experiência obtida ao longo de vários anos em Ontário, no Canadá, onde, a partir de 1970, passaram a ser construídos vários pavimentos com o uso de escórias de aciaria em camadas de ligação e rolamento em revestimentos asfálticos de vias urbanas e rodovias, além de áreas industriais.

Assim, a partir do que foi observado nesses trechos, Emery (1984) destaca, dentre outras coisas, que a aplicação de concreto asfáltico com escória de aciaria é uma excelente opção para pavimentos de áreas industriais ou de estacionamento sujeitas ao tráfego de veículos pesados, uma vez que esses revestimentos apresentam elevada estabilidade, além de alta resistência a deformações permanentes e, conseqüentemente, à formação de trilhas de roda. O autor afirma ainda que o uso de agregados siderúrgicos, principalmente, em graduações abertas (*gap-graded*) é capaz de promover uma ótima resistência à derrapagem em camadas de rolamento. Além disso, as misturas com escória apresentam uma alta rigidez, com módulos de resiliência que podem chegar a valores até 80% maiores do que em misturas convencionais, o que pode levar ao projeto de pavimentos com camadas mais finas de revestimento.

Nos Estados Unidos, as agências de transporte parecem ser mais cautelosas quanto ao emprego de escórias de aciaria em revestimentos asfálticos. Nas poucas aplicações feitas, foram relatados desempenhos técnicos iguais ou superiores a misturas convencionais, mas destacaram-se as desvantagens do ponto de vista econômico. Assim, em Hunt e Boyle (2000), Stoup-Gardiner e Wattenberg-Komas (2013) e WSDOT (2015), ressalta-se o custo adicional que a alta massa específica e porosidade elevada dos agregados siderúrgicos podem proporcionar ao serem utilizados em misturas asfálticas. O maior peso resulta em maiores custos de transporte, além de menor rendimento da mistura, visto que, para uma mesma massa, tem-se um menor volume em relação a misturas convencionais. Já a natureza porosa dos grãos exige maiores teores de

cimento asfáltico na mistura. Dessa forma, do ponto de vista econômico, recomenda-se a aplicação desses materiais apenas em áreas relativamente próximas ao seu fornecedor.

As propriedades, tanto positivas quanto negativas, das partículas de escória de aciaria influenciam diretamente no desempenho de revestimentos asfálticos que as utilizam como agregados. Dessa forma, para que sejam utilizadas sem preocupações, essas escórias devem ser previamente estabilizadas volumetricamente e submetidas a ensaios de expansibilidade e lixiviação, evitando danos estruturais e ambientais. Assim, diante das experiências acumuladas ao longo de décadas de investigações em vários países, pode-se dizer que, de um modo geral, os revestimentos betuminosos com agregados siderúrgicos apresentam as vantagens e desvantagens listadas na Tabela 2.3, que reúne informações retiradas dos diversos trabalhos citados neste item.

Tabela 2.3 – Vantagens e desvantagens do uso de misturas asfálticas com agregados de escória de aciaria

<b>VANTAGENS</b>	<b>DESVANTAGENS</b>
<b>AMBIENTAIS</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução do problema de disposição final para os resíduos siderúrgicos</li> <li>• Redução da degradação ambiental pela extração de agregados pétreos em jazidas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilidade de contaminação do solo e de cursos d'água por meio da lixiviação de contaminantes</li> </ul>
<b>TÉCNICAS</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta resistência à derrapagem e ao desgaste superficial</li> <li>• Alta estabilidade, devido ao maior atrito entre grãos</li> <li>• Boa resistência ao dano por umidade</li> <li>• Boa resistência a deformações permanentes, devido à alta estabilidade</li> <li>• Maior rigidez</li> <li>• Boa resistência à fadiga</li> <li>• Boa adesividade entre agregados e ligante asfáltico</li> <li>• Menor taxa de perda de calor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto potencial expansivo (instabilidade volumétrica) na presença de umidade</li> <li>• Heterogeneidade</li> </ul>
<b>ECONÔMICAS</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo custo de aquisição</li> <li>• A maior rigidez, permite a construção de camadas com espessuras menores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exigência de maiores teores de asfalto, devido à maior porosidade dos grãos</li> <li>• Maiores custos de transporte, devido aos altos valores de peso específico</li> <li>• Menor rendimento da mistura (menor volume para uma mesma massa)</li> <li>• Maior quantidade de energia necessária para o aquecimento da mistura em usina</li> </ul>

Assim, o comportamento promissor de pavimentos com agregados de escória de aciaria, bem como as preocupações quanto ao potencial expansivo, aumentos de custo e possíveis danos ambientais podem ser encontradas tanto em trabalhos mais antigos, como por exemplo Wachsmuth *et al.* (1981), Emery (1984), Geiseler (1996) e Kandhal e Hoffman (1997), quanto em pesquisas mais recentes, entre as quais podemos citar Castelo Branco (2004), Wu *et al.* (2007), Freitas e Motta (2008), Ahmedzade e Sengoz (2009), Wang *et al.* (2010), Pedrosa (2010), Passetto e Baldo (2012), Sorlini *et al.* (2012), Chen e Wei (2016) e Groeninger e Wistuba (2017). Dessa forma, o grande número de estudos relacionados a esse assunto, realizados em diversos países do mundo, mostram a busca pelo desenvolvimento de uma pavimentação mais sustentável, que não só faça o reaproveitamento de materiais e controle suas emissões de poluentes, mas que reduza os custos de produção e garanta um bom desempenho a longo-prazo.

### **2.3 MISTURAS MORNAS COM AGREGADOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA**

O uso de escória de aciaria como agregado e o desenvolvimento das tecnologias de misturas asfálticas mornas foram impulsionados principalmente pelo desejo de tornar a pavimentação mais sustentável, diminuindo os impactos negativos que essa indústria causa no meio ambiente com a extração de recursos naturais e a emissão de poluentes. No entanto, diversos estudos têm mostrado que, além da questão ambiental, existem vantagens técnicas nessas duas alternativas de revestimentos asfálticos, que resultam ainda em desempenho mecânico, muitas vezes, mais que satisfatório, como foi discutido nos itens anteriores.

Com base nisso, pode-se dizer que o uso de escória de aciaria em misturas mornas resultaria em uma solução ainda mais sustentável e também promissora do ponto de vista de comportamento mecânico. Além disso, como constatado por Hunt e Boyle (2000), o uso de escória de aciaria pode exigir uma maior energia para aquecimento das misturas a uma determinada temperatura, mas, ao mesmo tempo, esse calor é mantido por um período mais longo, se comparado a misturas com agregados naturais. Assim, a combinação entre tecnologias WMA e esse tipo de agregado torna-se interessante também para atenuar essa maior demanda de energia, além de produzir misturas com taxas de esfriamento ainda menores. Contudo, são necessárias amplas investigações, em laboratório e em campo, para identificar como esses agregados interagem com as diversas tecnologias usadas para reduzir as temperaturas de produção das misturas asfálticas e os efeitos dessa interação no desempenho do revestimento.

Dessa forma, são citados alguns dos estudos publicados acerca dessa combinação e os resultados mais relevantes que foram apresentados por eles.

Ameri *et al.* (2013) utilizaram escória de aciaria EAF em substituição a agregados graúdos de calcário na produção de misturas asfálticas mornas com o aditivo orgânico Sasobit<sup>®</sup>. Essas misturas foram submetidas a uma série de ensaios mecânicos (módulo de resiliência, resistência à tração indireta, resistência ao dano por umidade induzida e *creep* dinâmico) e seu desempenho foi comparado ao de misturas mornas com agregados naturais e quentes com e sem escória. Com base nos resultados obtidos, os autores concluíram que o uso da escória de aciaria em WMAs levou a uma melhor adesividade do ligante aos agregados e, conseqüentemente, maior resistência ao dano por umidade e durabilidade da mistura. Além disso, o melhor intertravamento do esqueleto de agregados com escória, devido à angularidade e rugosidade de seus grãos, aliado à maior rigidez do ligante com o aditivo orgânico, resultou em um melhor desempenho quanto a deformações permanentes.

Hesami *et al.* (2014) continuaram esses estudos com foco na resistência ao dano por umidade induzida, a qual consiste em uma das maiores preocupações no uso de misturas mornas e de agregados de escória de aciaria. Além do aditivo orgânico, foi empregado ainda o aditivo químico Rediset<sup>®</sup> para a produção das misturas a temperaturas reduzidas e, novamente, utilizou-se a escória de aciaria como agregado graúdo em substituição ao calcário. A suscetibilidade ao dano por umidade das misturas foi avaliada por meio de ensaios de estabilidade Marshall, módulo de resiliência e resistência a tração em amostras com e sem condicionamento. Assim, os autores relataram que as misturas mornas com escória apresentaram menores resultados nesses três ensaios em comparação às mornas somente com calcário, mas todas elas superaram as misturas quentes quanto a esses parâmetros. Em relação ao dano por umidade, novamente as misturas mornas mostraram-se mais resistentes do que as misturas quentes e, além disso, a substituição das frações graúdas por escória nas misturas mornas proporcionou a elas um desempenho ainda melhor.

Zeinoddin *et al.* (2016) também atestaram a menor suscetibilidade ao dano por umidade de misturas mornas com escória de aciaria EAF em comparação com misturas quentes com mesma composição de agregados. Eles estudaram o comportamento mecânico em laboratório de misturas mornas com agregados graúdos de escória de aciaria EAF, mas empregando uma resina à base de aminoácidos como aditivo para provocar a formação de espuma no asfalto e sua conseqüente redução de viscosidade. Por outro lado, Masoudi *et al.* (2017) e Amelian *et al.*



(2018) relataram que, segundo seus estudos, embora a mistura morna com escória de aciaria tenha apresentado melhor resistência ao dano por umidade do que a morna somente com calcário, ambas foram menos resistentes do que as misturas quentes. Já Gouli *et al.* (2017) concluíram novamente que a resistência ao dano por umidade das misturas mornas melhorou com a substituição das frações graúdas por escória de aciaria, o que não foi observado nas misturas quentes. No entanto, comparando-se misturas mornas e quentes com mesmas composições de agregados, os resultados foram similares.

Masoudi *et al.* (2017) tiveram como foco de sua pesquisa o envelhecimento das misturas asfálticas mornas com agregados graúdos de escória de aciaria para uma previsão de desempenho a longo prazo das mesmas. Assim, os resultados obtidos por esses autores indicaram que, tanto para o envelhecimento a curto prazo como a longo prazo, as misturas mornas com escória foram mais resistentes quanto à estabilidade Marshall e a resistência à tração indireta e mais rígidas em relação ao módulo de resiliência se comparadas com a mistura de referência (quente e com agregados de calcário). Já quanto ao índice de envelhecimento, dado pela razão entre os parâmetros mecânicos para a mistura envelhecida a longo e a curto prazo, concluiu-se que, embora o uso de escória tenha levado a um aumento no efeito do envelhecimento, as misturas mornas com esses agregados apresentaram menor envelhecimento em comparação às quentes somente com calcário.

Passeto *et al.* (2017) realizaram ensaios de rigidez, fadiga e deformação permanente em mástiques e misturas com escória de aciaria EAF e aditivo surfactante. A substituição parcial de calcário por escória, que foi usada em diversas frações, foi de 32% em volume, já o teor de ligante foi o mesmo para as misturas com e sem escória em volume, mas diferente em massa. Quanto aos ensaios nos mástiques, concluiu-se que o aditivo químico afetou a resposta elástica do ligante, melhorando a resistência à fadiga e às deformações permanentes. Já a adição de escória aumentou a rigidez e reduziu as deformações permanentes, mas piorou a vida em fadiga. Em relação às misturas, foram obtidas, para as mornas, menor rigidez e melhor resistência à fadiga, sem que fosse afetado o desempenho a deformações permanentes, quando comparadas às misturas quentes. No entanto, segundo os autores, as baixas temperaturas de produção das misturas mornas mascararam as contribuições (positivas e negativas) da escória no desempenho das mesmas, ou seja, os potenciais ganhos de rigidez e resistência a deformações permanentes foram limitados e a vida em fadiga não foi tão reduzida quanto se esperava.

Por fim, Fakhri e Ahmadi (2017) fizeram um estudo que aliou o uso de asfalto reciclado (RAP) ao de escória de aciaria em misturas mornas, com o intuito de reduzir a quantidade de asfalto,

normalmente mais alta, que os agregados siderúrgicos exigem. Além de comprovar essa redução, os autores concluíram que a adição de RAP e/ou escória às misturas mornas melhora a resistência à tração das misturas, bem como à fadiga e a deformações permanentes. Esses resultados são particularmente interessantes por considerar, ao mesmo tempo, a reciclagem de dois tipos de resíduo (material fresado e escória de aciaria) e a redução das temperaturas de produção das misturas asfálticas, o que provavelmente teria um impacto positivo muito grande quanto às questões de cunho ambiental.

Assim, com base nos estudos aqui apresentados, percebe-se que as misturas mornas com agregados de escória de aciaria, no geral, apresentam desempenho mecânico igual ou superior às misturas convencionais e, portanto, têm potencial para serem utilizadas em grande escala em revestimentos asfálticos. No entanto, são necessários ainda muitos estudos laboratoriais além de aplicações em pistas experimentais para atestar essa potencialidade e tirar as incertezas que existam quanto à performance dessas misturas, principalmente no que diz respeito à suscetibilidade ao dano por umidade e ao desempenho a longo prazo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na produção das misturas asfálticas desta pesquisa, bem como as etapas que a compuseram, as quais foram realizadas, em sua maioria, no Laboratório de Infraestrutura Rodoviária da Universidade de Brasília (INFRALAB/UnB). A Figura 3.1 mostra um fluxograma que resume essas informações.

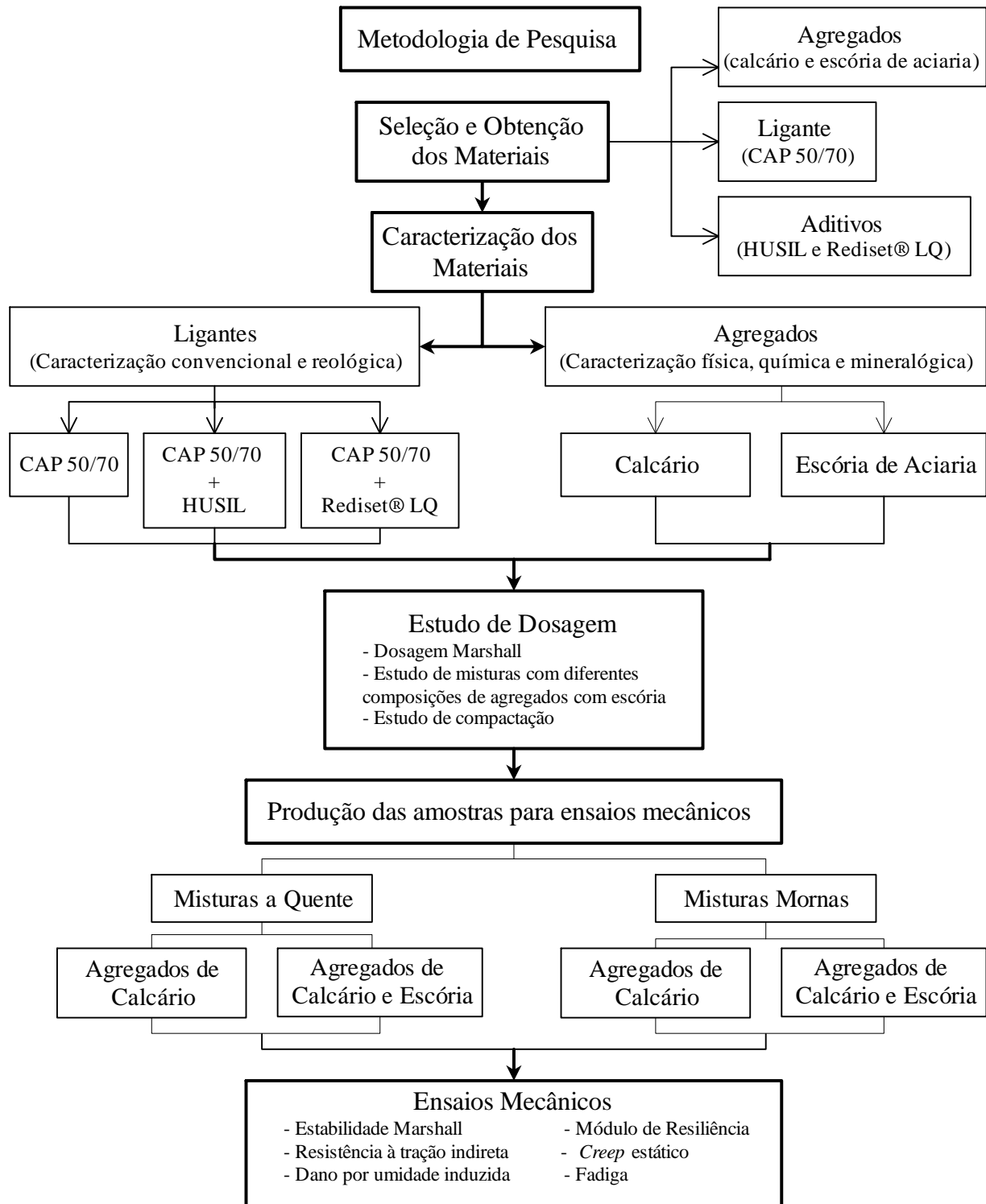


Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia de pesquisa

### 3.1 SELEÇÃO E OBTENÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta primeira etapa de trabalho, determinaram-se os materiais que seriam utilizados nas misturas asfálticas como ligante, agregado e aditivo. Em seguida, procedeu-se à obtenção desses materiais junto aos fornecedores para a realização das etapas seguintes, dando início à pesquisa propriamente dita.

#### 3.1.1 AGREGADOS

Para a produção das misturas asfálticas, foram utilizadas composições de agregados naturais de calcário britado e agregados de escória de aciaria. Quanto à granulometria, optou-se por seguir a Faixa C do DNIT, especificada na norma DNIT-ES 031/2006, uma vez que se desejava estudar as propriedades de misturas densas (CBUQ), mais comumente empregadas nas obras brasileiras. A Tabela 3.1 e a Figura 3.2 mostram a granulometria adotada.

Tabela 3.1- Granulometria da composição de agregados para as misturas asfálticas

Peneira	Abertura (mm)	% Retida
3/4"	19,10	0%
1/2"	12,70	10%
3/8"	9,50	10%
# 4	4,80	22%
# 10	2,00	22%
# 40	0,42	19%
# 80	0,18	7%
# 200	0,075	4%

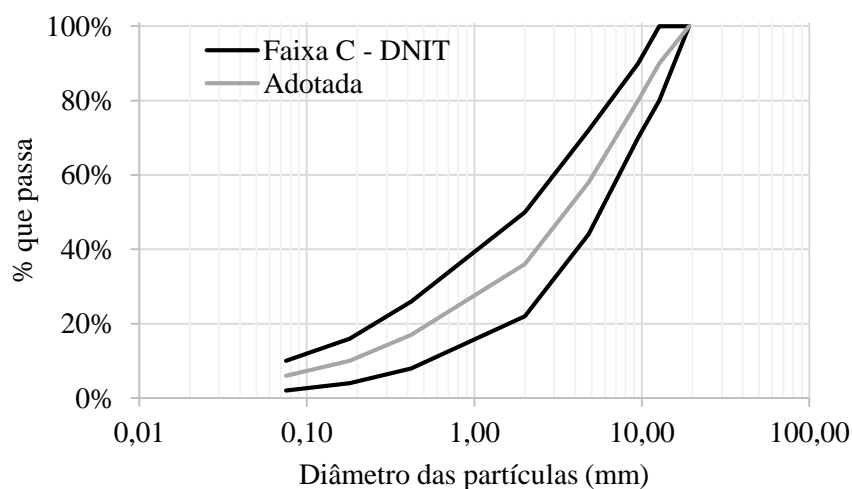


Figura 3.2 - Curva granulométrica (Faixa C).

## Escória de aciaria

Como agregado alternativo, utilizou-se a escória de aciaria LD, proveniente da Usiminas de Ipatinga – MG. O material chegou ao laboratório em julho de 2015 e ficou disposto ao ar livre desde então. Para este trabalho, a escória de aciaria foi primeiramente britada em britador de mandíbula para que apresentasse granulometria adequada ao uso como agregado. Em seguida, parte dela foi levada ao moinho de bolas (máquina Los Angeles) para produzir assim os finos necessários. Feito isso, os grãos de escória foram peneirados para composição da curva granulométrica desejada, utilizando-se as peneiras indicadas na Tabela 3.1. Na Figura 3.3 observa-se a escória em alguns estágios desse processo.



Figura 3.3 - Escória de aciaria: a) disposta ao ar livre; b) durante o processo de britagem; c) em detalhe na sua forma final; d) peneirada para composição da curva granulométrica

## Calcário

Como agregado natural utilizou-se calcário britado fornecido pela empresa SKS Mineração, cuja pedreira e parque industrial estão situados a cerca de 65 km do centro de Brasília, nas proximidades de Padre Bernardo – GO. O material foi coletado diretamente das pilhas da pedreira em diferentes granulometrias e levado ao laboratório, onde passou por peneiramento nas frações da curva granulométrica de interesse. A Figura 3.4 mostra o local de coleta do calcário e o material já peneirado.

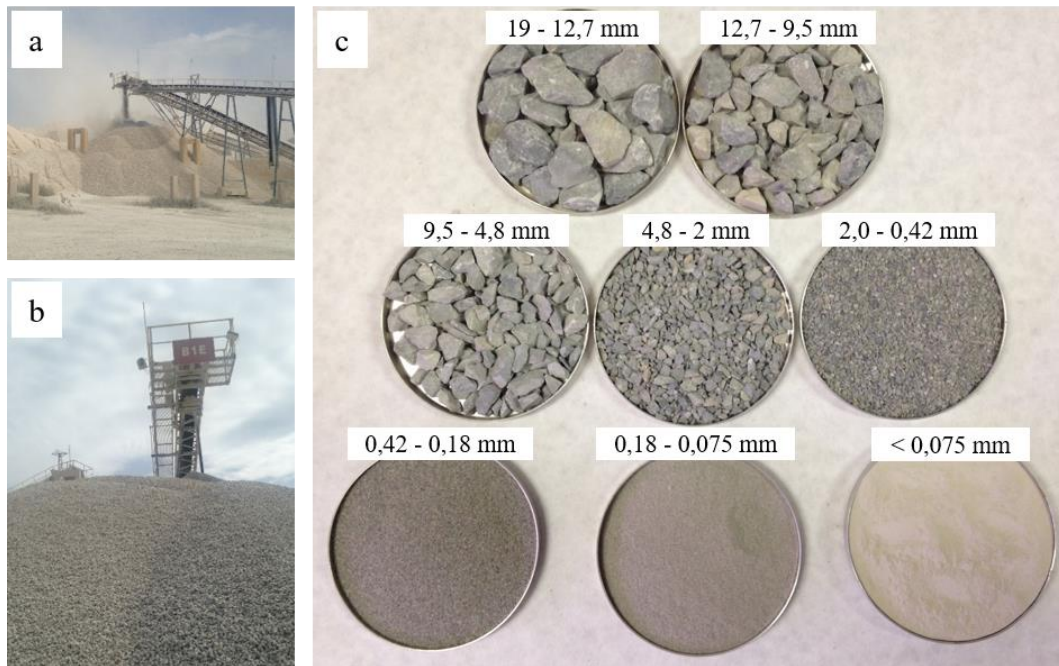


Figura 3.4 - Calcário: a) local de coleta (miúdos); b) local de coleta (graúdos); c) frações peneiradas para composição da curva granulométrica

### 3.1.2 LIGANTE ASFÁLTICO

Nas misturas asfálticas produzidas nesta pesquisa utilizou-se o ligante convencional CAP 50/70, proveniente da Refinaria REGAP (Betim – MG) e fornecido pela Centro-Oeste Asfaltos, localizada em Brasília. A escolha por esse material se deu por ele ser o ligante convencionalmente utilizado no Brasil.

### 3.1.3 ADITIVOS

Para a produção de misturas asfálticas mornas foram utilizados dois aditivos químicos diferentes: Rediset<sup>®</sup> LQ-1106 e HUSIL. O Rediset<sup>®</sup> LQ é um aditivo químico comercial, desenvolvido, comercializado e fornecido, para esta pesquisa, pela empresa AkzoNobel. Ele age como surfactante e, portanto, modifica o ligante asfáltico, reduzindo sua tensão superficial e, conseqüentemente, melhorando sua capacidade de recobrimento dos agregados e a trabalhabilidade da mistura, o que leva a reduções de temperatura de até 33°C, segundo *Prowell et al.* (2012).

Já o HUSIL é um aditivo inorgânico, incombustível, não perigoso e não poluente que consiste em uma solução aquosa e provoca a formação de espuma no ligante asfáltico quente. A composição e o nome verdadeiro desse produto não são mencionados, uma vez que o mesmo ainda se encontra em desenvolvimento tecnológico. No entanto, estudos mostram que o HUSIL

é capaz de reduzir significativamente a temperatura de mistura (em torno de 30°C), melhorando não só a trabalhabilidade da mistura, mas também aumentando a rigidez do ligante (RONDÓN *et al.*, 2014 e RONDÓN *et al.*, 2016). Além disso, é um produto químico acessível, de baixo custo e fácil aquisição, altamente disponível no mercado. A aparência de ambos os aditivos, bem como a formação de espuma no CAP com a adição de HUSIL podem ser observados na Figura 3.5.

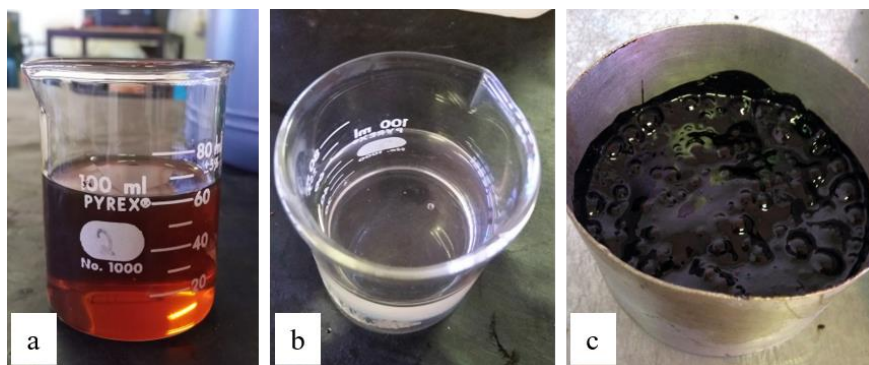


Figura 3.5 - a) Rediset<sup>®</sup> LQ; b) HUSIL; c) efeito do HUSIL no CAP 50/70

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os agregados e ligantes utilizados na confecção das misturas asfálticas foram caracterizados por meio de ensaios convencionais e especiais. Isso permitiu não só determinar a adequação dos mesmos às especificações, mas também conhecer melhor suas propriedades.

### 3.2.1 AGREGADOS

Os agregados, tanto de calcário, quanto de escória de aciaria, foram caracterizados, no INFRALAB/UnB, segundo os ensaios e normas indicados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Ensaios de caracterização dos agregados

Ensaio	Norma
Abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/98
Absorção e densidade de agregados graúdos	DNER-ME 081/98
Absorção e massa específica aparente de agregados miúdos	ASTM C 128 - 15
Massa específica real do material de enchimento	DNER-ME 081/98
Angularidade do agregado miúdo	ASTM C 1252 - 03
Partículas longas e achatadas	ASTM D 4791 - 10
Durabilidade	DNER-ME 089/94
Adesividade ao ligante asfáltico	DNER-ME 078/94

Além disso, esses materiais foram química e mineralogicamente analisados com o uso de um microscópio eletrônico de varredura (MEV), da difração de raios x (DRX) e da fluorescência de raios x (XRF) no Laboratório GMAS, em Bogotá, na Colômbia.

### 3.2.2 LIGANTE ASFÁLTICO

Os ligantes asfálticos são considerados materiais viscoelásticos e seu comportamento varia em função da temperatura e do tempo (ou frequência) de carregamento. Assim, a baixas temperaturas e altas frequências de carregamento (curto tempo de aplicação da carga), o asfalto responde de forma predominantemente elástica. Por outro lado, para temperaturas elevadas e baixas frequências (carregamentos de duração mais longa), essas respostas se assemelham às de um líquido, apresentando um caráter viscoso. Logo, em condições normais de serviço dos pavimentos, os ligantes asfálticos se comportam de uma forma intermediária a esses dois casos, apresentando, ao mesmo tempo, uma parcela elástica e outra viscosa de comportamento (BERNUCCI *et al.*, 2008; DUKATZ E ANDERSON, 1980 *apud* YUSOFF, 2012).

Assim, buscou-se caracterizar esse material por meio de ensaios convencionais de consistência, segurança e envelhecimento, bem como pela determinação de seus parâmetros viscoelásticos, utilizando-se, para isso, amostras de CAP 50/70 puro e modificado com os aditivos químicos (Rediset<sup>®</sup> LQ e HUSIL) em diferentes proporções.

#### Caracterização convencional

O ligante asfáltico puro (CAP 50/70) e com adições de Rediset<sup>®</sup> LQ e HUSIL em diferentes proporções foram caracterizados segundo ensaios convencionais e envelhecimento a curto prazo pelo RTFOT (do inglês, *Rolling Thin Film Oven Test*), os quais estão indicados na Tabela 3.3. Para tais ensaios foram utilizadas quatro porcentagens em massa de ligante para cada aditivo, sendo 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% para o HUSIL e 0,3%, 0,4%, 0,5% e 0,75% para o Rediset<sup>®</sup> LQ. A escolha dessas proporções se deu com base em estudos anteriores (PROWELL *et al.*, 2012; BENNERT, 2012; RONDÓN *et al.*, 2016; RONDÓN *et al.*, 2014; RONDÓN *et al.*, 2017) e, no caso do Rediset<sup>®</sup> LQ, na indicação do fabricante.

Tabela 3.3 - Ensaios de caracterização dos ligantes asfálticos

Ensaio	Norma
Penetração	DNIT-ME 155/2010
Ponto de amolecimento	DNIT-ME 131/2010
Viscosidade Rotacional ( <i>Brookfield</i> )	NBR 15184 : 2004
Ponto de fulgor	NBR 11341 : 2010
Ductilidade	DNER-ME 163/98
Densidade relativa e massa específica	DNER-ME 193/96
RTFOT	NBR 15235 : 2006



## Caracterização reológica dos ligantes

Para proporcionar uma melhor compreensão acerca dos termos e conceitos utilizados na caracterização reológica, antes de descrever os procedimentos adotados nesta fase da pesquisa, apresenta-se, uma breve introdução sobre a viscoelasticidade em ligantes asfálticos.

Primeiramente, considere um ligante asfáltico sujeito a uma sollicitação dinâmica, senoidal, por exemplo, sob uma tensão controlada com uma frequência específica  $\omega$  e uma amplitude  $\tau_0$ . A deformação apresentada pelo ligante será da mesma forma senoidal, mas com amplitude  $\gamma_0$  e uma frequência defasada em relação a  $\omega$  de um valor  $\delta$ . Esse parâmetro ( $\delta$ ) é chamado de ângulo de fase e indica a magnitude relativa das parcelas elástica e viscosa de um material. Em materiais viscoelásticos, como o asfalto em temperaturas moderadas, esse ângulo varia entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , uma vez que, para corpos puramente elásticos,  $\delta$  é igual a  $0^\circ$ , já que não há defasagem entre tensão e deformação, e, para materiais de comportamento viscoso, essa defasagem é máxima, sendo  $\delta$  equivalente a  $90^\circ$  (BERNUCCI *et al.*, 2008; MELLO, 2008; YOUSOFF, 2012).

Além do ângulo de fase, um outro parâmetro de grande importância na análise de materiais viscoelásticos é o módulo complexo ( $G^*$ ), dado pela razão entre as tensões e deformações dinâmicas. Por se tratar de um número complexo, o  $G^*$  apresenta uma parcela real e uma imaginária, que representam, respectivamente, os módulos de armazenagem e de perda, sendo relacionados à energia armazenada e dissipada durante um ciclo de carregamento. Utiliza-se ainda, nesse contexto, o valor absoluto do módulo complexo ( $|G^*|$ ), chamado também de módulo dinâmico, que é dado pela razão entre as amplitudes de tensão ( $\tau_0$ ) e deformação ( $\gamma_0$ ) em um carregamento harmônico (AIREY, 1997, MELLO, 2008; YOUSOFF, 2012).

O comportamento de ligantes asfálticos é comumente representado por meio de curvas-mestras, que são construídas com base no princípio da superposição tempo-temperatura (TTSP, do inglês, *Time Temperature Superposition Principle*), segundo o qual existe uma relação de equivalência entre temperatura e frequência (ou tempo) em materiais viscoelásticos. Assim, a curva-mestra corresponde a uma combinação de várias curvas isotérmicas de um mesmo material, as quais descrevem uma propriedade viscoelástica em função da frequência para uma dada temperatura (AIREY, 1997; YOUSOFF, 2012).

Essa combinação ocorre por meio do deslocamento das isotérmicas em relação a uma temperatura de referência ( $T_r$ ) arbitrariamente escolhida, formando, com a sobreposição de todas elas, uma curva única que caracteriza o comportamento do material, como exemplificado

na Figura 3.6. Para obter essa superposição, utilizam-se os fatores de translação  $\alpha_T$  (*shift factors*), os quais só dependem das temperaturas de referência e da isotérmica em questão, podendo ser determinados de diversas formas (SAYEGH, 1967 *apud* MELLO, 2008; AIREY, 1997).

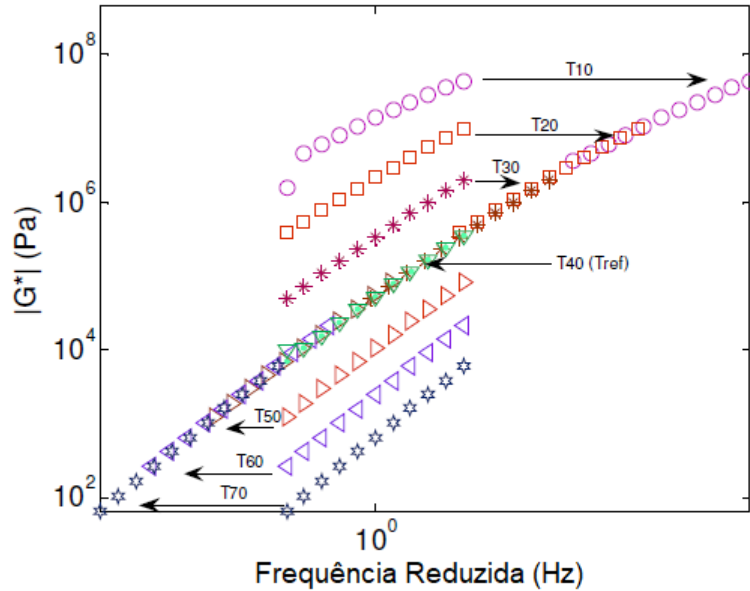


Figura 3.6 – Exemplo de construção de curva-mestra de  $|G^*|$  (modificado – YOUSOFF, 2012)

Segundo Mello (2008), a curva-mestra do  $|G^*|$  pode ser, então, modelada por meio do ajuste de uma função sigmoial, por exemplo, que matematicamente é descrita como:

$$\log |G^*| = v + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(\frac{1}{\omega_r})}} \quad (3.1)$$

onde  $v$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são coeficientes da função e  $\omega_r$  é a frequência reduzida. Nesse modelo, o fator de translação ( $\alpha_T$ ) é dado pelas seguintes equações:

$$\log \alpha_T(T_i) = a \cdot T_i^2 + b \cdot T_i + c \quad (3.2)$$

$$\alpha_T = \frac{t}{t_r} = \frac{\omega_r}{\omega} \quad (3.3)$$

onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  são coeficientes determinados durante a construção da curva-mestra,  $T_i$  é a temperatura da isotérmica a ser deslocada e  $t$  e  $t_r$  são os tempos de carregamento nas temperaturas de interesse e de referência.

Assim, diante dessa complexidade das respostas mecânicas dos ligantes asfálticos e tendo como base a norma ASTM D 7175 - 15, além dos ensaios de caracterização convencionais, foi realizada ainda a caracterização reológica dos ligantes com o auxílio de um reômetro de

cisalhamento dinâmico (DSR, do inglês, *Dynamic Shear Rheometer*) para a determinação de seus parâmetros viscoelásticos e, posteriormente, suas curvas-mestras. Nessa fase, foram utilizadas apenas as proporções de aditivo assumidas como de projeto, sendo analisados, portanto, três ligantes diferentes.

No reômetro, amostras de ligante de 8 mm e 25 mm de diâmetro, com 2 mm e 1 mm de espessura, respectivamente, são formadas entre duas placas paralelas de metal localizadas no interior de uma câmara com temperatura controlada, como mostrado na Figura 3.7. Durante o ensaio, uma das placas oscila em relação à outra, submetendo o ligante a uma sollicitação cisalhante. Nesta pesquisa, realizou-se o ensaio para diversas temperaturas, variando entre 22°C e 64°C, com deformação cisalhante constante de 0,1% e frequência angular que variava em rampa linear de 1 a 100 rad/s. Assim, para uma dada temperatura, eram obtidos os valores de  $|G^*|$  e  $\delta$  para cada uma das frequências aplicadas. Feito isso, os resultados de módulos foram então utilizados para montar a curva-mestra de cada ligante com base no modelo sigmoidal e com o auxílio de uma planilha eletrônica, em que era feito o ajuste dos parâmetros do modelo por meio de uma regressão de mínimos quadrados.

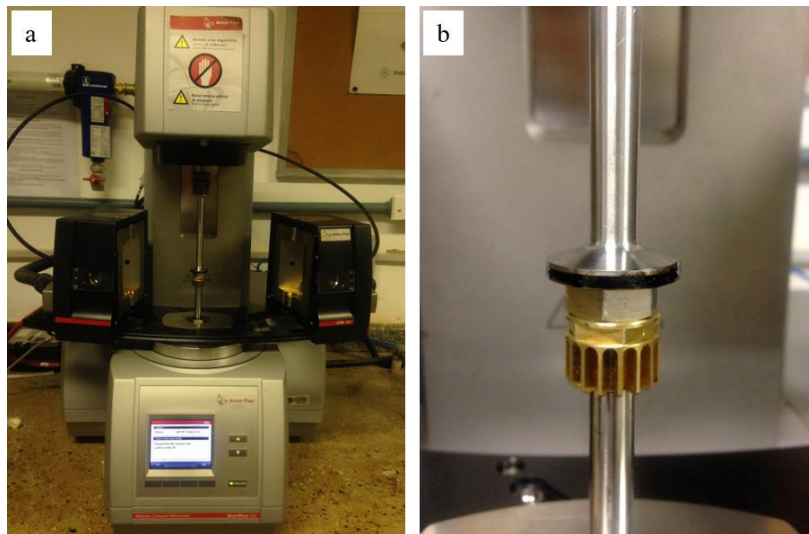


Figura 3.7 - a) Reômetro (DSR); b) amostra de 25 mm de diâmetro entre as placas paralelas

### 3.3 ESTUDO DE DOSAGEM

Nesta etapa buscou-se, primeiramente, determinar o teor de asfalto de projeto para todas as misturas produzidas ao longo da pesquisa por meio da metodologia Marshall. Fez-se ainda uma análise, por meio de ensaios mecânicos, do emprego de diversas composições de agregados de calcário e escória em misturas asfálticas para que fosse escolhida aquela que seria utilizada nas próximas etapas. Por fim, foi feito um estudo de compactação para verificar o efeito de

diferentes porcentagens dos aditivos nas misturas, a fim de escolher as proporções que seriam adotadas como de projeto.

### **3.3.1 DOSAGEM MARSHALL**

A dosagem das misturas a quente foi feita segundo a metodologia Marshall (DNER-ME 043/95). Assim, foram considerados cinco teores de ligante (3,5%, 4,0%, 4,5%, 5,5% e 5,5%) e, então, para cada um deles, três corpos-de-prova (CP) cilíndricos, de 1200 g cada, foram produzidos com 75 golpes do compactador Marshall em cada face. Nesse processo, as temperaturas de mistura e compactação foram determinadas a partir da viscosidade do ligante asfáltico, segundo recomendação da ASTM D 6925 - 15.

Para cada teor, foi calculada a densidade máxima teórica (DMT) da mistura e, para cada CP, foram determinadas a massa específica aparente ( $G_{mb}$ ), segundo a norma DNER-ME 117/94, bem como suas dimensões, com o uso de um paquímetro. Assim, foram calculados os parâmetros volumétricos de cada CP, incluindo volume de vazios ( $V_v$ ), relação betume-vazios (RBV) e vazios do agregado mineral (VAM). Além disso, os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de estabilidade e fluência Marshall e, com esses dados, volumétricos e mecânicos, foi possível determinar o teor de asfalto de projeto. Esse teor foi, então, aplicado em todas as misturas posteriormente produzidas neste estudo.

### **3.3.2 ANÁLISE DE COMPOSIÇÕES DE AGREGADOS COM ESCÓRIA EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

Nesta fase da pesquisa, buscou-se estudar diferentes composições de agregados com calcário e escória de aciaria em misturas asfálticas, de modo a identificar as proporções com as quais seria mais interessante trabalhar. Assim, foi adotado sempre o mesmo teor de asfalto, determinado pela dosagem Marshall, alterando-se gradativamente a quantidade de escória incorporada à mistura em substituição ao calcário. Assim, foram estudadas, no total, oito misturas com composições de agregados diferentes.

Dessa forma, como a escória de aciaria apresenta massa específica maior do que o calcário, optou-se por fazer as substituições por volume, ou seja, as massas de agregado foram determinadas de forma a se manter o mesmo volume em todas as misturas. Com isso, os corpos-de-prova produzidos apresentaram massas diferentes, mas alturas praticamente constantes. As misturas foram, então, nomeadas de acordo com a porcentagem de calcário substituído por escória, como indicado na Tabela 3.4. Assim, a mistura G20%, por exemplo, corresponde

àquela na qual as frações retidas nas peneiras 1/2" (19,1 mm) e 3/8" (12,7 mm), que juntas equivalem a 20% da massa de calcário na mistura de referência, foram substituídas por escória de aciaria.

Tabela 3.4 - Identificação das misturas com escória

<b>Mistura</b>	<b>Frações de calcário substituídas por escória</b>	
G20%	1/2" e 3/8"	
G42%	1/2", 3/8" e #4	Frações graúdas
G64%	1/2", 3/8", #4 e #10	
M10%	#200 e fíler	
M17%	#80, #200 e fíler	Frações miúdas
M36%	#40, #80, #200 e fíler	

Além dessas misturas, compostas ao mesmo tempo pelos dois tipos de agregados, ainda houve misturas com composições “puras”. Assim, na mistura 0% nenhuma fração foi substituída, isto é, os agregados eram todos de calcário, e na mistura 100%, todas as frações foram substituídas e, portanto, todos os agregados eram de escória de aciaria. Para cada uma das oito misturas, primeiramente, foi determinada a densidade máxima medida pelo método Rice (ASTM D 2041 - 11) para que o volume de vazios das amostras produzidas fosse calculado de forma mais realista, uma vez que o cálculo da DMT não leva em consideração as especificidades de agregados alternativos, como a escória.

Então, confeccionou-se uma série de corpos-de-prova dessas diferentes misturas, com o uso do compactador Marshall (75 golpes por face), os quais foram submetidos aos ensaios de estabilidade Marshall (DNER-ME 043/95), resistência à tração por compressão diametral (DNIT-ME 136/2010) e módulo de resiliência (DNIT-ME 135/2010). Foram utilizadas três amostras para cada mistura em cada um dos ensaios realizados, sendo o resultado expresso como uma média, com seu desvio-padrão correspondente. Por fim, a partir dos resultados obtidos nos ensaios, bem como no aspecto visual e nos parâmetros volumétricos das misturas, pôde-se fazer uma análise básica de comportamento das mesmas e definir aquela que seria mais interessante para o estudo de comportamento mecânico posterior.

### 3.3.3 ESTUDO DE COMPACTAÇÃO

O estudo de compactação foi feito com o intuito de se verificar qual seria o efeito da adição de diferentes quantidades de aditivos químicos nas propriedades volumétricas e de resistência das misturas, tanto quentes como mornas. Para tanto, foram considerados sete teores de aditivos no total: 0% (sem aditivo); 0,5%, 1,0% e 1,5% de HUSIL; e 0,4%, 0,5% e 0,75% de Rediset<sup>®</sup> LQ.

Além disso, consideraram-se três temperaturas de trabalho diferentes, sendo a primeira chamada de temperatura de referência (correspondente à temperatura da mistura a quente, determinada pelo método da viscosidade) e as outras 20°C e 30°C abaixo dessa temperatura. As misturas foram nomeadas, então, segundo a porcentagem e o tipo de aditivo utilizado - 0%, 0,5%H, 1,0%H, 1,5%H, 0,4%R, 0,5%R e 0,75%R - e as temperaturas de trabalho foram indicadas por TR, TR-20 e TR-30.

Em todas as misturas foi utilizado o mesmo teor de ligante (obtido pela dosagem Marshall), a mesma composição de agregados (apenas calcário) e a mesma energia de compactação (75 golpes do compactador Marshall), produzindo-se de três a cinco corpos-de-prova para cada teor de aditivo e cada temperatura de trabalho, com um total de 91 amostras. Para o processo de mistura, a redução de temperatura, em TR-20 e TR-30, deu-se, ao mesmo tempo, nos agregados e no ligante asfáltico, resultando também numa redução da temperatura de compactação. Dessa forma, a padronização e a consistência dos procedimentos foram essenciais para que não houvesse alterações significativas nas condições de produção das amostras.

Para o preparo das misturas com HUSIL, a incorporação do aditivo ocorreu com o uso de uma seringa diretamente no misturador durante o processo de mistura dos agregados com o ligante. Já para as misturas com Rediset<sup>®</sup> LQ, o aditivo era previamente incorporado ao ligante, que estava aquecido a cerca de 135°C, sendo a mistura dos dois feita manualmente, com o uso de uma colher, durante aproximadamente um minuto. O ligante já modificado era então misturado aos agregados normalmente, podendo ser utilizado em até dois dias após o acréscimo do aditivo.

Para cada um dos CPs produzidos, foram determinados parâmetros volumétricos de interesse, em especial o volume de vazios, e a resistência à tração por compressão diametral (DNIT-ME 136/2010), sendo os resultados expressos como uma média de três a cinco amostras, com o desvio-padrão correspondente. Além disso, utilizou-se a análise de variância (ANOVA) como um auxílio na comparação entre as misturas, determinando se os grupos eram ou não estatisticamente iguais entre si. Então, com base nos resultados obtidos nessa fase e na caracterização dos ligantes, bem como em dados da literatura, determinou-se a porcentagem de cada aditivo a ser utilizado nas misturas mornas desta pesquisa, além da temperatura de trabalho das mesmas.

Vale esclarecer que, nessa e nas demais etapas em que foi feita a comparação estatística entre médias, utilizou-se a análise de variância simples (*one-way* ANOVA) com um intervalo de confiança de 95%. Assim, caso o valor *p* dado pelo método fosse maior que 0,05, era possível

afirmar que os grupos seriam estatisticamente iguais (EI), aceitando-se a hipótese nula de igualdade. Caso contrário, o teste indicava que havia indícios de que pelo menos um dos grupos era estatisticamente diferente dos demais (ED). Dessa forma, a análise foi feita primeiramente para todo o conjunto de grupos e, caso a hipótese nula não fosse aceita, ela era repetida par a par a fim de verificar entre quais grupos havia igualdade.

### 3.4 PRODUÇÃO DE AMOSTRAS PARA ENSAIOS MECÂNICOS

Tendo definidas todas as variáveis relativas às misturas asfálticas, passou-se então à confecção dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios mecânicos, para avaliar o comportamento das misturas em estudo. Assim, foram consideradas duas composições de agregados, uma apenas com calcário e a outra com substituições por escória, além de três tipos de misturas, uma quente e duas mornas com aditivos diferentes (HUSIL e Rediset<sup>®</sup> LQ). Já os processos de mistura e compactação das amostras foram os mesmos definidos na etapa de estudo de compactação, sendo produzidos, em média, 25 CPs por mistura.

### 3.5 ENSAIOS MECÂNICOS

Para avaliar o comportamento das misturas em estudo, foram realizados os ensaios mecânicos listados na Tabela 3.5, sendo ensaiadas de três a cinco amostras de cada mistura em cada um deles.

Tabela 3.5 - Ensaios mecânicos para avaliação das misturas asfálticas

<b>Ensaio</b>	<b>Norma utilizada</b>
Resistência à tração indireta por compressão	DNIT-ME 136/2010
Estabilidade Marshall	DNER-ME 043/95
Módulo de resiliência	DNIT-ME 135/2010
<i>Creep</i> estático	-
Fadiga por compressão diametral	-
Dano por umidade induzida	-

Os procedimentos adotados nos ensaios de estabilidade Marshall e resistência à tração indireta seguiram estritamente as normativas, sendo realizados a 60°C e 25°C, respectivamente. A Figura 3.8 mostra a montagem e os equipamentos utilizados nesses ensaios.

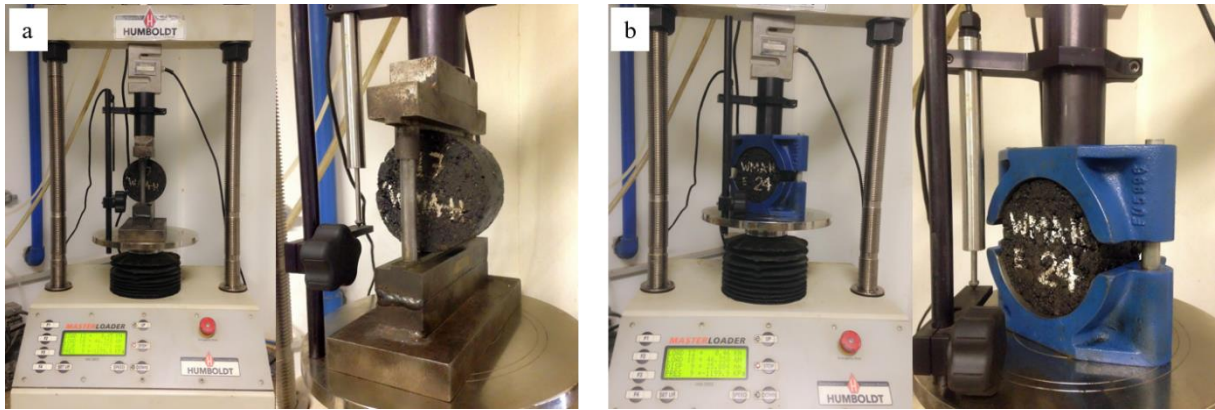


Figura 3.8 - a) Ensaio de resistência à tração indireta; b) ensaio de estabilidade Marshall

Para a determinação do módulo de resiliência das misturas asfálticas, utilizou-se o ensaio de tração indireta e optou-se por adotar um carregamento que geraria uma tensão de cerca de 30% da resistência à tração das mesmas. Assim, o ensaio foi realizado a uma temperatura de 25 °C, com uma aplicação de carga cíclica de forma *haversine* em uma frequência de 1 Hz (60 aplicações por minuto) e com duração de 0,1 s. Aplicou-se primeiramente um pré-condicionamento de 200 aplicações, seguido por cinco ciclos, nos quais realizavam-se as leituras dos dados efetivamente usados no cálculo do módulo. Para isso, considerou-se ainda um coeficiente de Poisson de 0,3. Na Figura 3.9 observa-se a montagem do ensaio, com destaque para o posicionamento dos LVDTs (do inglês, *Linear Variable Differential Transformer*) responsáveis pela leitura dos deslocamentos horizontais sofridos pela amostra com a aplicação da carga.

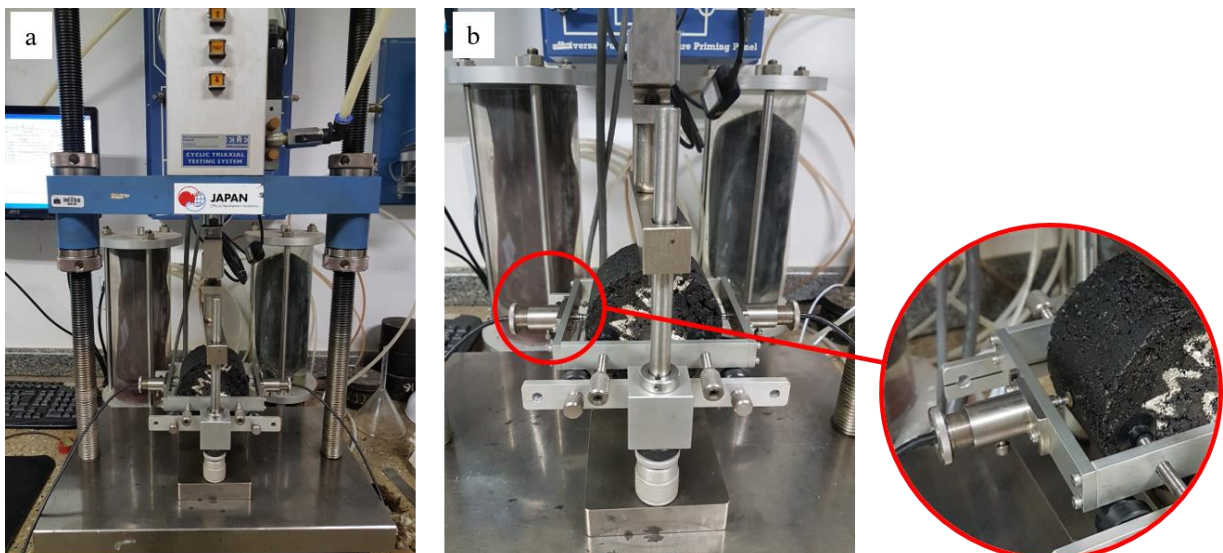


Figura 3.9 - a) Ensaio de fadiga; b) detalhe do posicionamento da amostra e dos LVDTs



Para a realização do *creep* estático, aplicou-se uma carga de compressão uniaxial contínua de 100 kPa durante 3600 segundos, com um período de recuperação, sem aplicação de carga, de 900 segundos. Para isso, os corpos-de-prova tiveram suas faces lixadas ou capeadas com pasta de gesso pedra para garantir que fossem perfeitamente lisas e paralelas entre si. O ensaio é ilustrado na Figura 3.10, onde pode ser observada a placa de carregamento sobre a qual se encontra um par de LVDTs, para determinação da deformação axial sofrida pela amostra. Vale ressaltar ainda que a temperatura de ensaio foi de 25 °C.

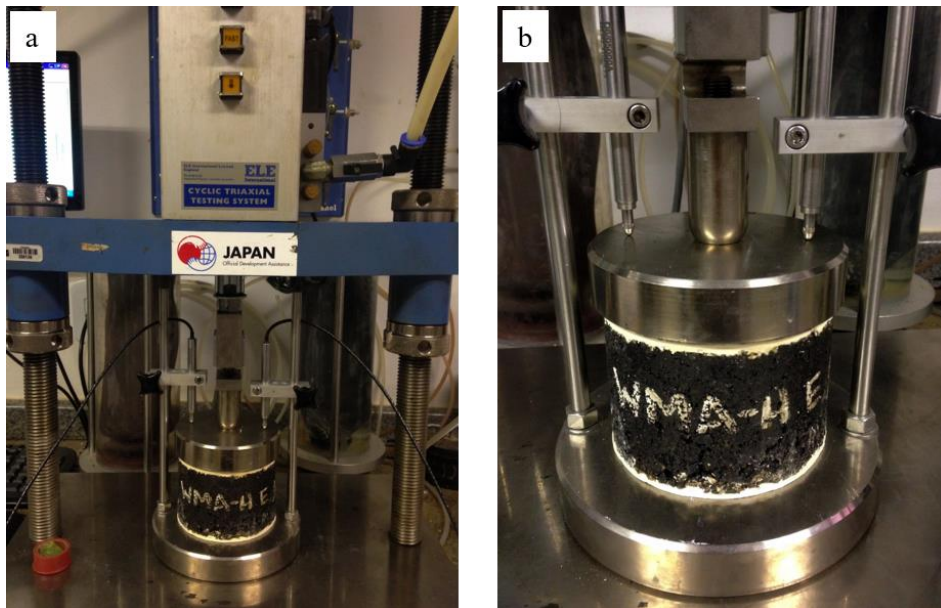


Figura 3.10 - a) Ensaio de *creep* estático; b) detalhe montagem do ensaio

O ensaio de fadiga por compressão diametral foi realizado a tensão controlada e com temperatura constante de 25°C. Para isso, bem como na determinação do módulo de resiliência, utilizou-se uma frequência de 60 aplicações de carga por minuto, com duração de 0,1 segundo, sendo 0,9 segundo de descanso entre uma carga e outra. Para cada mistura, o ensaio foi realizado em três níveis de tensão diferentes, a fim de se montar uma curva de fadiga, sendo o critério de parada a ruptura total da amostra. Então, optou-se por utilizar os mesmos níveis de tensão (cerca de 250 kPa, 330 kPa e 400 kPa) para todas as misturas estudadas, de modo a facilitar a análise comparativa dos resultados. Na Figura 3.11 ilustra-se um ensaio de fadiga em andamento, bem como uma amostra já em processo de ruptura.



Figura 3.11 - a) Ensaio de fadiga; b) amostra em ruptura por fadiga

Por fim, o ensaio de dano por umidade induzida, foi feito sem o uso de normas específicas, apenas como uma forma de avaliação preliminar. Assim, foram utilizadas amostras compactadas normalmente, com o volume de vazios de projeto, sendo uma parte delas ensaiada quanto à resistência à tração por compressão diametral no estado natural (seco) e a outra, em estado de saturação parcial. Essa saturação foi feita colocando-se os corpos-de-prova submersos em água em temperatura ambiente (por volta de 25°C) durante cerca de 6 semanas. O resultado do ensaio foi dado, então, pela razão entre as médias das resistências com e sem condicionamento.

Uma vez que as misturas estudadas tinham como variáveis, ao mesmo tempo, a temperatura de produção, o aditivo e a composição de agregados, a comparação entre elas não era muito simples. Então recorreu-se à análise de variância (ANOVA) dos resultados para que fosse determinado se um grupo de misturas era considerado estatisticamente igual ou diferente de outro em relação a cada um dos ensaios realizados. Além disso, buscou-se ainda confrontar os parâmetros mecânicos obtidos com os limites especificados por normas brasileiras e/ou internacionais. Com isso, foi possível analisar, de forma geral, o comportamento das misturas estudadas, observando suas potencialidades.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nas etapas de trabalho descritas no capítulo anterior, bem como as análises que foram feitas com base neles. Dessa forma, os tópicos a seguir detalham as informações obtidas na caracterização dos materiais, bem como nas três fases de dosagem, onde foram determinados os teores de asfalto e aditivo das misturas, além das temperaturas de trabalho e as composições de agregados utilizadas. Por fim, apresentam-se os resultados relativos ao desempenho mecânico das misturas em estudo, estabelecendo uma comparação entre elas.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Os ensaios convencionais de caracterização de agregados para misturas asfálticas foram realizados no INFRALAB/UnB e seus resultados estão listados na Tabela 4.1, onde se encontram ainda os limites usuais considerados para cada propriedade, e na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 – Resultados da caracterização dos agregados

Ensaio	Unidade	Resultado		Limites
		Calcário	Escória de aciaria	
Partículas longas e achatadas (1:5)	%	2	2	máx. 10
Angularidade do miúdo	%	45,8	55,0	mín. 45
Abrasão Los Angeles	%	18	14	máx. 50
Durabilidade em sulfato de sódio	%	0,01	5,03	máx. 12

Tabela 4.2 – Densidade e absorção dos agregados

Agregado	Peneira	Escória de Aciaria			Calcário		
		Densidade (kg/m <sup>3</sup> )		Absorção (%)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )		Absorção (%)
		Real	Aparente		Real	Aparente	
Graúdo	1/2"	3,609	3,486	0,98	2,733	2,711	0,47
	3/8"	3,603	3,438	1,34			
	n.4	3,580	3,379	1,66			
Miúdo	n.10	3,581	3,295	2,42	2,723	2,607	1,63
	n.40	3,614	3,367	2,02			
	n.80	3,491	3,209	2,52			
	n.200	3,393	3,034	3,48			
Fíler		3,436	-	-	2,738	-	-

Quanto aos ensaios de caracterização física, percebe-se que os dois materiais apresentaram desempenho adequado, respeitando os limites de aceitação para todas as propriedades. No entanto, destacam-se, entre elas, a resistência à abrasão e a forma das partículas que, em ambos os agregados, apresentaram resultados bastante satisfatórios. Tais características são de grande

importância nos revestimentos asfálticos, uma vez que diminuem os riscos de quebra dos agregados durante a compactação e sob a ação do tráfego. A angularidade mostra ainda uma característica vantajosa da escória, que é o maior atrito entre os grãos, favorecendo a uma melhor resistência às deformações permanentes da mistura.

Em relação aos ensaios de caráter químico, quanto à durabilidade ao sulfato de sódio, observa-se que tanto o calcário, quanto a escória se mostraram consideravelmente resistentes à desintegração química, principalmente o calcário. Já no ensaio de adesividade ao ligante, observou-se que, enquanto a escória manteve o recobrimento quase total das partículas ao final do ensaio, para o calcário foram identificados pontos de deslocamento da película de CAP, como pode ser verificado na Figura 4.1.

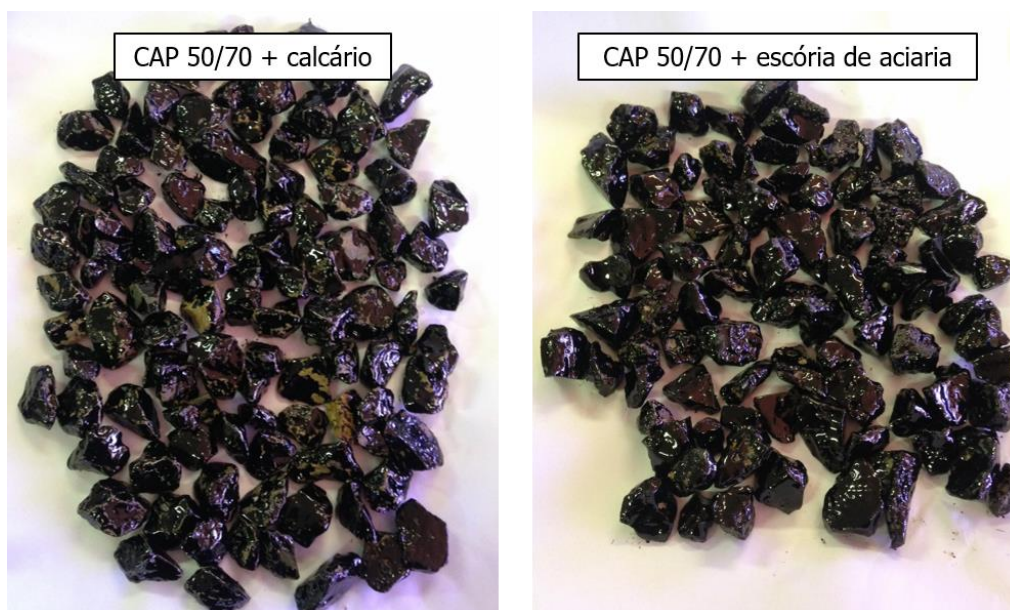


Figura 4.1 - Resultado do ensaio de adesividade dos agregados ao CAP 50/70

Para complementar essa análise e avaliar se os deslocamentos de película observados eram importantes, foi feito também um ensaio de dano por umidade induzida (apresentado posteriormente no item Ensaio Mecânicos), que buscou verificar a adesividade para misturas asfálticas já compactadas.

Na Tabela 4.2, percebe-se que, como esperado, a escória de aciaria apresenta densidade e absorção maiores que o calcário. Essa alta densidade da escória deve-se à própria natureza e composição química do material, a qual será detalhada mais à frente. Por outro lado, a elevada absorção do rejeito é resultado de sua alta porosidade, que, como pode ser visto na Figura 4.2,

varia de partícula para partícula, sendo essa heterogeneidade uma dificuldade encontrada ao se trabalhar com a escória.



Figura 4.2 – Aspecto superficial das partículas de escória de aciaria

A porosidade dos agregados foi ainda verificada e quantificada com o uso de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) no Laboratório GMAS, em Bogotá, na Colômbia. Com as imagens feitas nesse equipamento, concluiu-se que a porosidade encontrada nos grãos de calcário correspondia a espaços dispersos sem conexões entre si. O mesmo foi identificado para a escória de aciaria, onde as áreas porosas estavam associadas a espaços amorfos não conectados, cuja origem poderia estar ligada a gases aprisionados ou a minerais que mudaram de fase ao serem submetidos a altas temperaturas.

Além disso, as micrografias obtidas no MEV foram processadas no programa IMAGE J, que realça as áreas com poros e microfraturas com a cor vermelha, e, com as imagens geradas, calculou-se a porosidade das partículas. A Figura 4.3 mostra um exemplo de micrografia utilizada nesse cálculo para ambos os materiais e a Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos para diversas imagens, bem como a média de área porosa para cada tipo de agregado.

Com esses dados, é possível confirmar o que os resultados de absorção e o aspecto visual das partículas dos agregados indicaram: a escória de aciaria apresenta porcentagens bem maiores de área porosa do que o calcário. Além disso, na Figura 4.3, é possível observar ainda que a

superfície do agregado de escória é muito mais rugosa do que o calcário, característica que lhe confere, juntamente com a alta absorção e porosidade, a melhor adesividade observada anteriormente na Figura 4.1.

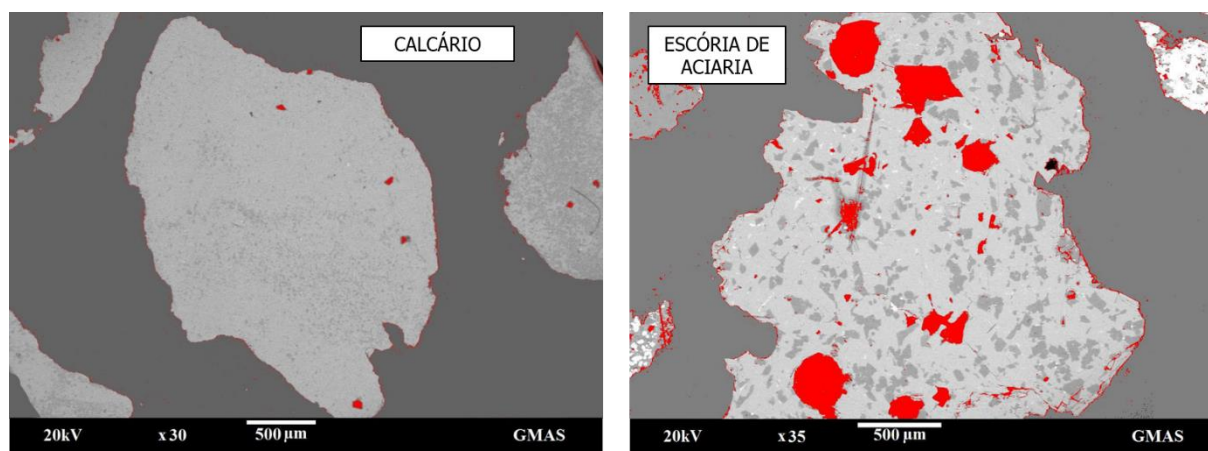


Figura 4.3 – Exemplos de micrografias usadas no cálculo de área porosa dos agregados

Tabela 4.3 – Porosidade dos agregados determinada por micrografia no MEV

Imagem	Porcentagem de área porosa (%)	
	Calcário	Escória de aciaria
1	1,18	9,09
2	0,12	7,14
3	0,34	1,53
4	0,79	5,26
5	0,46	4,76
6	0,50	8,76
Média	<b>0,57</b>	<b>6,09</b>

Além da avaliação da porosidade dos grãos, o uso do MEV permitiu ainda a identificação dos minerais presentes nas amostras. Assim, para os agregados de calcário, no geral, detectou-se que as partículas eram compostas principalmente por fragmentos de calcita (Cal) acompanhados de minerais de quartzo (Qtz), dolomita (Dol) e zirconita ou zircão (Zrn). Já na amostra de escória de aciaria, foram encontrados dois tipos de grão principais, onde foram identificados minerais de akermanita (Ak) e gehlenita (Gh) como solução sólida, além de belita (Bel), wustita (Wus) e brownmillerita (Brw).

As fases minerais dos agregados também foram identificadas por meio da difração de raios x (DRX) para amostras de pó desses materiais e os resultados obtidos nessa análise seguem listados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Porcentagem em peso de cada fase mineral das amostras de agregados

Mineral	Fórmula Química	Porcentagem em peso (%)	
		Calcário	Escória de Aciaria
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	77,36	
Microclina ou Microclínio	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	12,90	
Quartzo	SiO <sub>2</sub>	6,22	
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	3,52	
Akermanita	Ca <sub>2</sub> Mg(Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )		9,98
Belita	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>		27,99
Brownmillerita	Ca <sub>2</sub> (Al,Fe <sup>3+</sup> ) <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		24,59
Wustita	FeO		23,42
Cal	CaO		14,02

Por fim, as amostras de agregados foram submetidas ainda a ensaios de fluorescência de raios x (FRX), a fim de identificar os óxidos que compõem o calcário e a escória, bem como a quantidade em que estão presentes. Assim, os resultados obtidos nessa análise seguem na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Concentração dos óxidos identificados nas amostras de agregados

Composto/elemento	Concentração (% em massa)	
	Calcário	Escória de aciaria
CaO	72,8	38,2
MgO	2,3	4,1
SiO <sub>2</sub>	14,4	10,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,0	4,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,1	36,6
K <sub>2</sub> O	3,0	0,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,9	1,8
TiO <sub>2</sub>	0,3	0,6
Na <sub>2</sub> O	-	0,3

Observa-se que, como esperado, os agregados de calcário são compostos basicamente de calcita (CaCO<sub>3</sub>) e, portanto, o óxido presente em maior concentração é o óxido de cálcio (CaO). Já a escória de aciaria possui uma composição mineralógica mais diversificada, resultado em maiores concentrações de óxidos de cálcio e de ferro, seguidos pelo dióxido de silício. O óxido de ferro é responsável pela maior densidade da escória e, juntamente com o dióxido de silício, é também responsável pela boa resistência à abrasão da escória (HESAMI *et al.*, 2014). Além disso, a composição da escória estudada mostrou-se condizente com as encontradas na literatura para escórias de aciaria LD (Tabela 2.1).

Os compostos mais preocupantes quanto à estabilidade volumétrica das escórias são os óxidos de cálcio e de magnésio livres. Percebe-se, na Tabela 4.4, que, apesar de não ter sido encontrada grande quantidade de MgO, há uma porcentagem considerável de cal (CaO) no material analisado, apontando para que haja um cuidado quanto à sua expansão pelo processo de hidratação.

Pelo modo e tempo de disposição da escória ao ar livre, esperava-se que ela já estivesse estabilizada, e, portanto, foi assumido inicialmente que o potencial expansivo desse material seria muito pequeno. No entanto, a caracterização mineralógica, cujos resultados foram disponibilizados meses após o início dos trabalhos em laboratório, indicou a necessidade da realização de ensaios de expansibilidade para se avaliar verdadeiramente o quanto essa quantidade de cal livre encontrada interfere no desempenho da escória no uso como agregado. Infelizmente, por uma questão de cronograma, não foi possível fazer essa avaliação no âmbito desta pesquisa.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

A caracterização dos ligantes por meio de ensaios convencionais e envelhecimento a curto prazo (RTFOT) foi feita para o CAP 50/70 puro e com adições de HUSIL - nas proporções 0,5%, 1%, 1,5% e 2% - e Rediset<sup>®</sup> LQ (abreviado como RLQ) - nas porcentagens de 0,3%, 0,4%, 0,5% e 0,75%. Assim, inicialmente, são mostrados os resultados dos ensaios para o ligante sem aditivos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Resultados da caracterização do CAP 50/70

Ensaio	Unidade	Resultado	Especificação (ANP 19/2005)
Penetração (100 g, 5 s, 25° C)	0,1 mm	51	50 a 70
Ponto de amolecimento	°C	52	mín. 46
Densidade relativa	-	1,022	-
Viscosidade rotacional <i>Brookfield</i>			
a 135° C		337	mín. 274
a 150° C	cP	177	mín. 112
a 177° C		66	57 a 285
Ponto de fulgor	°C	338	mín. 235
Ductilidade a 25° C	cm	>100	mín. 60
Efeito do calor e do ar (RTFOT)			
Varição em massa	%	-0,042	máx. 0,5
Ductilidade a 25° C	cm	>100	mín.. 20
Aumento do ponto de amolecimento	°C	8	máx. 8
Penetração retida	%	81	mín. 55



Observa-se, na Tabela 4.6, que o ligante obedeceu aos limites da especificação da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) para o cimento asfáltico de petróleo de classificação 50/70. Já quando os aditivos químicos foram adicionados nesse mesmo ligante, os resultados apresentaram algumas alterações, como mostrado nas Tabelas 4.7, 4.8, 4.9 e nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6.

Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de caracterização convencional nos ligantes

Ligante	Densidade relativa	Ponto de amolecimento (°C)	Penetração (mm)	Ponto de fulgor (°C)	Ductilidade (cm)
CAP 50/70	1,022	52	51	338	> 100
CAP + 0,5% HUSIL	1,003	53	47	345	> 100
CAP + 1,0% HUSIL	1,001	55	45	338	> 100
CAP + 1,5% HUSIL	1,010	54	48	330	> 100
CAP + 2,0% HUSIL	1,016	53	58	340	70
CAP + 0,3% RLQ	1,007	54	59	305	>100
CAP + 0,4% RLQ	1,006	52	61	319	>100
CAP + 0,5% RLQ	1,006	52	59	316	>100
CAP + 0,75% RLQ	1,006	51	58	320	>100

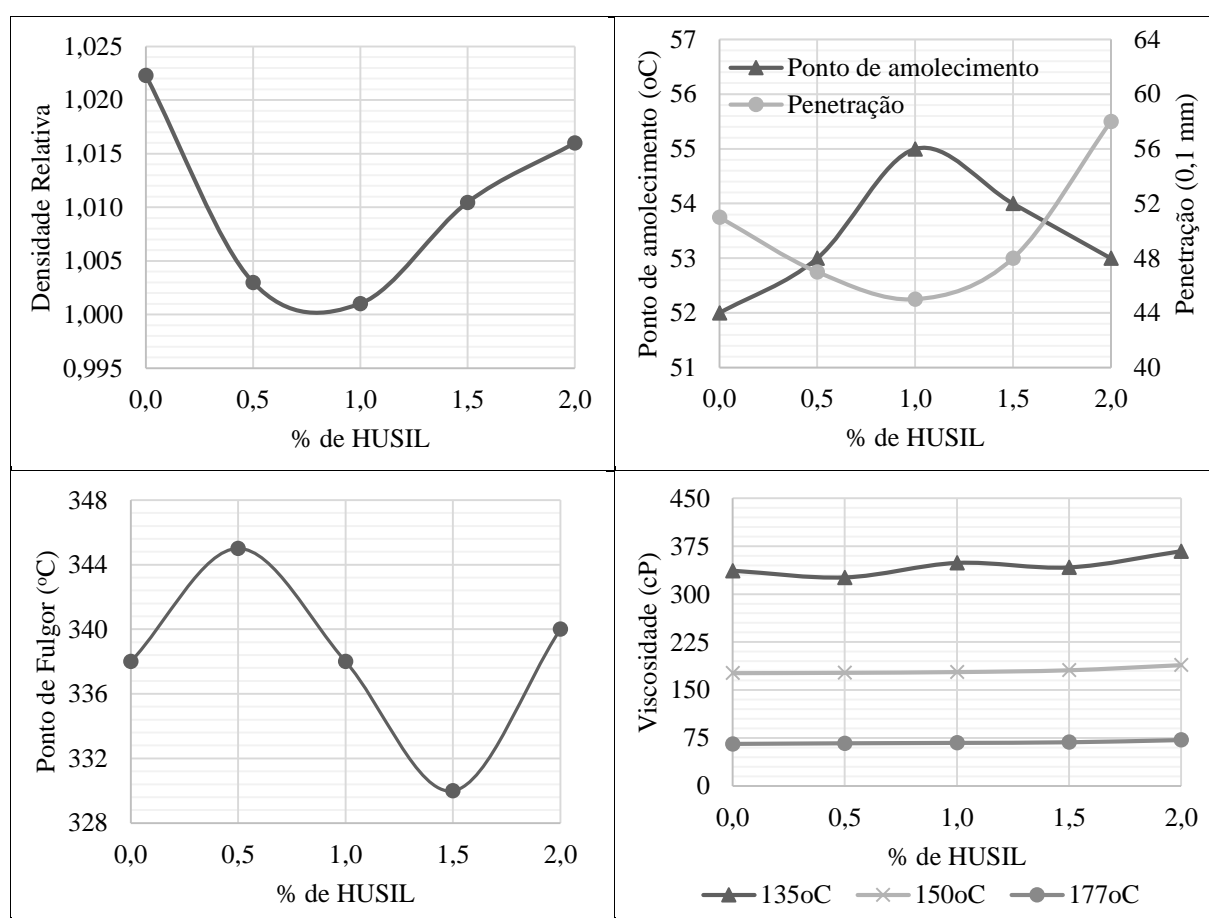


Figura 4.4 – Resultados da caracterização convencional dos ligantes com adições de HUSIL

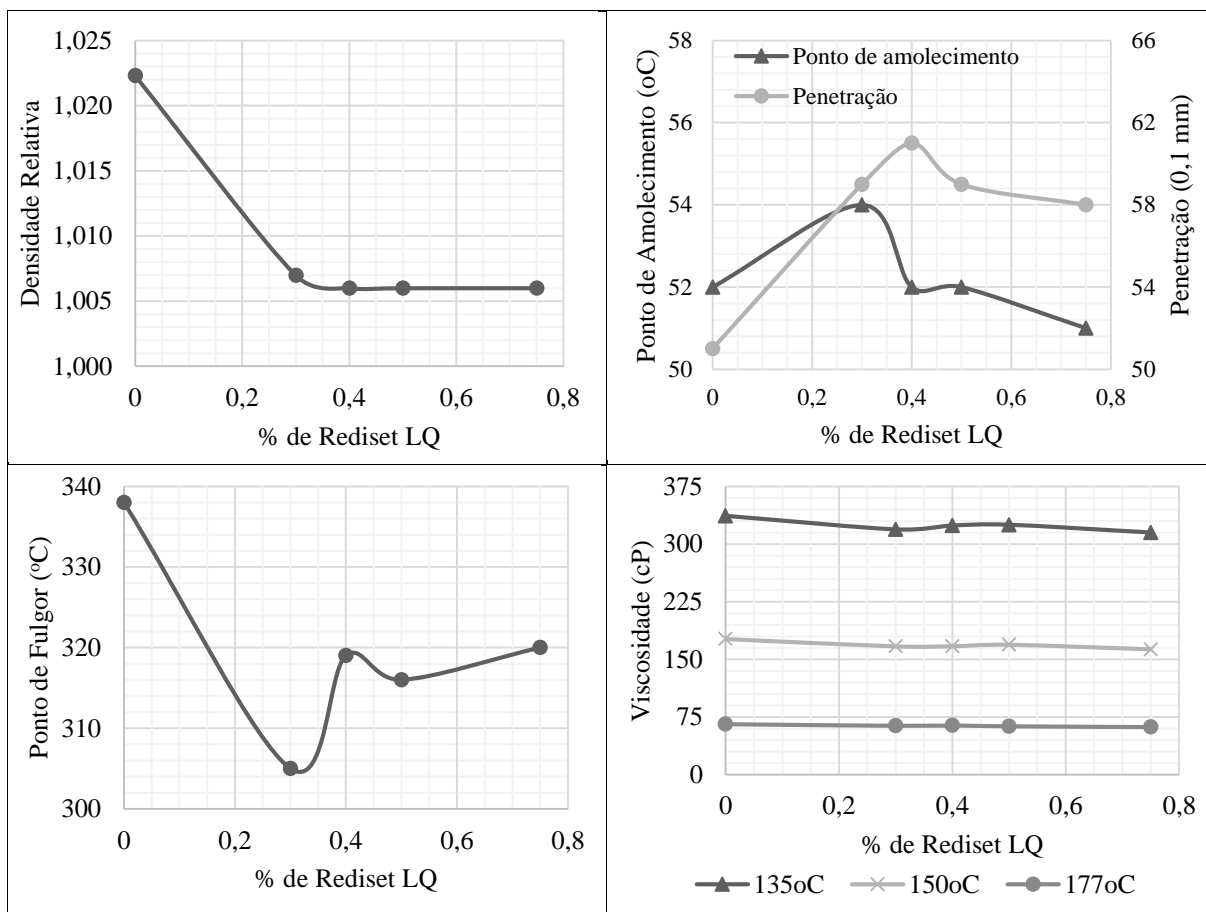


Figura 4.5 – Resultados da caracterização convencional dos ligantes com Rediset<sup>®</sup> LQ

Com a observação da Tabela 4.7 e das Figuras 4.4 e 4.5, percebe-se que, no geral, houve poucas alterações expressivas nos resultados dos ensaios com a incorporação dos aditivos. Quanto à densidade relativa, os dois aditivos provocaram uma diminuição, mesmo que modesta, desse parâmetro em relação ao ligante puro. Em relação ao ponto de fulgor, nos ligantes com Rediset<sup>®</sup> LQ, observa-se uma diminuição considerável nas temperaturas obtidas em relação ao CAP de referência, chegando a 33°C para 0,3% de aditivo. Já para os ligantes com HUSIL não houve uma tendência clara à medida que se aumentavam as proporções de aditivo, mas a maior diferença entre o ponto de fulgor deles e do ligante puro foi de 8°C.

Além disso, esperava-se que quanto mais consistente fosse o ligante, menor seria a penetração e maior o ponto de amolecimento. Essa tendência foi observada, em geral, nos resultados para adições de HUSIL, que indicaram um ganho de consistência nesses ligantes em comparação ao CAP puro. A porcentagem desse aditivo que resultou em maior ganho de consistência, no entanto, foi 1%. Já para as adições de Rediset<sup>®</sup> LQ, observou-se que a tendência era uma redução de consistência em relação ao ligante original para os resultados de penetração. Porém,

para o ponto de amolecimento, com exceção de 0,3%, os ligantes modificados mantiveram o resultado do puro ou ficou levemente menos consistente (0,75%).

Tabela 4.8 – Resultados da viscosidade rotacional dos ligantes

Ligante	Viscosidade (cP)		
	135°C	150°C	177°C
CAP 50/70	337	177	66
CAP + 0,5% HUSIL	326	177	67
CAP + 1,0% HUSIL	349	178	67
CAP + 1,5% HUSIL	342	181	68
CAP + 2,0% HUSIL	367	189	72
CAP + 0,3% RLQ	319	167	64
CAP + 0,4% RLQ	324	167	64
CAP + 0,5% RLQ	325	169	63
CAP + 0,75% RLQ	315	163	62

Quanto à viscosidade, os resultados mostram-se particularmente interessantes, uma vez que indicam que, para todos os ligantes, as curvas obtidas são muito similares, como pode ser visto na Figura 4.6. Isso evidencia que os aditivos não alteram consideravelmente essa propriedade ao serem incorporados ao CAP a ponto permitir que se identifique a possibilidade de redução das temperaturas de trabalho da mistura por meio do método da viscosidade. Para aditivos, surfactantes, como o Rediset<sup>®</sup> LQ, esse comportamento já era esperado, pois eles agem na interação entre o ligante e os agregados. Apesar disso, percebeu-se uma pequena diminuição de viscosidade com o uso desse produto. Já para o HUSIL, que provoca espumejo no asfalto, esperava-se perceber uma diminuição considerável na viscosidade, o que não ocorreu, havendo inclusive um pequeno aumento. Isso pode ser explicado pelo fato de que, segundo Rondón *et al.* (2017), esse aditivo se torna rígido quando o asfalto modificado por ele resfria depois de ser espumado e, além disso, o HUSIL age apenas momentaneamente e não produz o efeito usual ao se reaquecer o ligante, como foi feito com as amostras ensaiadas no viscosímetro.

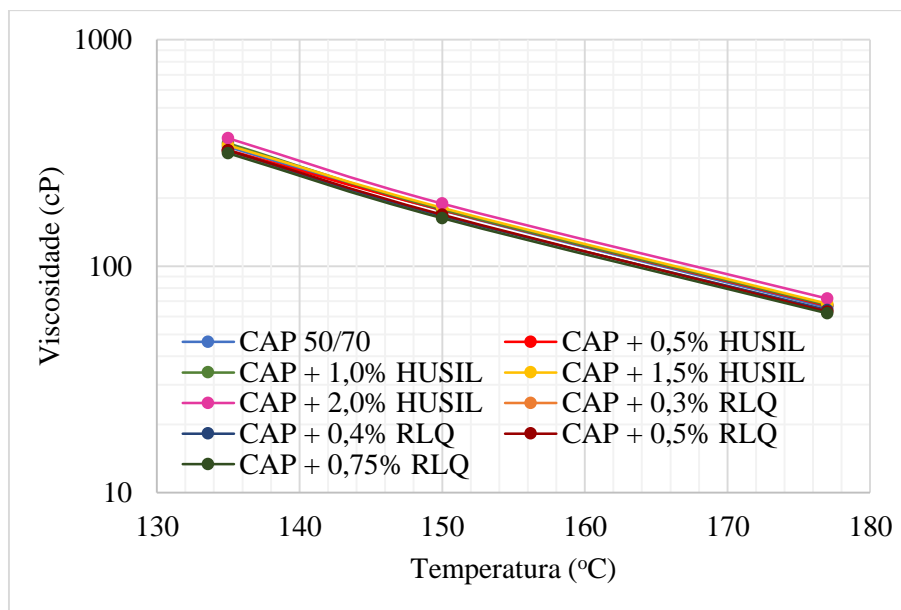


Figura 4.6 – Comparação das curvas de viscosidade dos ligantes

Tabela 4.9 – Resultados para o envelhecimento no RTFOT dos ligantes

Ligante	Perda de massa (%)	Penetração retida (%)	Aumento do ponto de amolecimento (°C)	Ductilidade (cm)
CAP 50/70	0,04	81	8	100
CAP + 0,5% HUSIL	0,06	70	5	57
CAP + 1,0% HUSIL	0,09	63	3	48
CAP + 1,5% HUSIL	0,15	64	5	96
CAP + 2,0% HUSIL	0,19	63	6	53
CAP + 0,3% RLQ	0,05	62	5	86
CAP + 0,4% RLQ	0,05	52	4	90
CAP + 0,5% RLQ	0,06	70	5	93
CAP + 0,75% RLQ	0,07	59	7	99

Já os resultados do envelhecimento a curto prazo no RTFOT, apresentados na Tabela 4.9, mostram que a incorporação de aditivos no CAP não alterou significativamente suas propriedades e os ligantes respeitaram os limites da ANP (indicados na Tabela 4.6). Quanto à perda de massa, percebe-se que os ligantes com HUSIL tenderam a perder maiores porcentagens quando comparados aos com Rediset<sup>®</sup> LQ, sendo esses valores tão maiores quanto a proporção de aditivo. Em relação à ductilidade, o HUSIL também exibiu resultados inferiores ao Rediset<sup>®</sup> LQ, mas ainda bastante satisfatórios.

Além disso, os resultados de penetração retida e aumento do ponto de amolecimento não foram muito diferentes para os dois aditivos. A penetração indicou que os aditivos contribuíram para o enrijecimento do ligante, o que está ligado a um maior envelhecimento. Já os resultados do

ponto de amolecimento mostraram que os aditivos levaram os ligantes envelhecidos a mudarem de consistência em menores temperaturas quando comparados ao CAP puro, o que indica menor envelhecimento. Assim, quanto a essas variáveis, as porcentagens de aditivo que menos colaboraram para o envelhecimento do ligante foram 0,5% e 1% para o HUSIL e 0,4% e 0,5% para o Rediset<sup>®</sup> LQ.

Finalmente, para a caracterização reológica dos ligantes, foram considerados o CAP puro e com adições de 1% de HUSIL e 0,5% de Rediset<sup>®</sup> LQ. Essas proporções de aditivo foram as utilizadas na produção das misturas mornas avaliadas quanto ao comportamento mecânico e foram selecionadas com base nos resultados de caracterização apresentados até aqui e do estudo de compactação, como descrito mais à frente no item Estudo de Dosagem. Com os resultados obtidos no reômetro (DSR), foi construída a curva-mestra do módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) para cada um dos três ligantes no estado virgem (sem envelhecimento). Para isso, foi considerada uma temperatura de referência de 34°C e os dados foram ajustados ao modelo sigmoidal, resultando nas curvas retratadas na Figura 4.7.

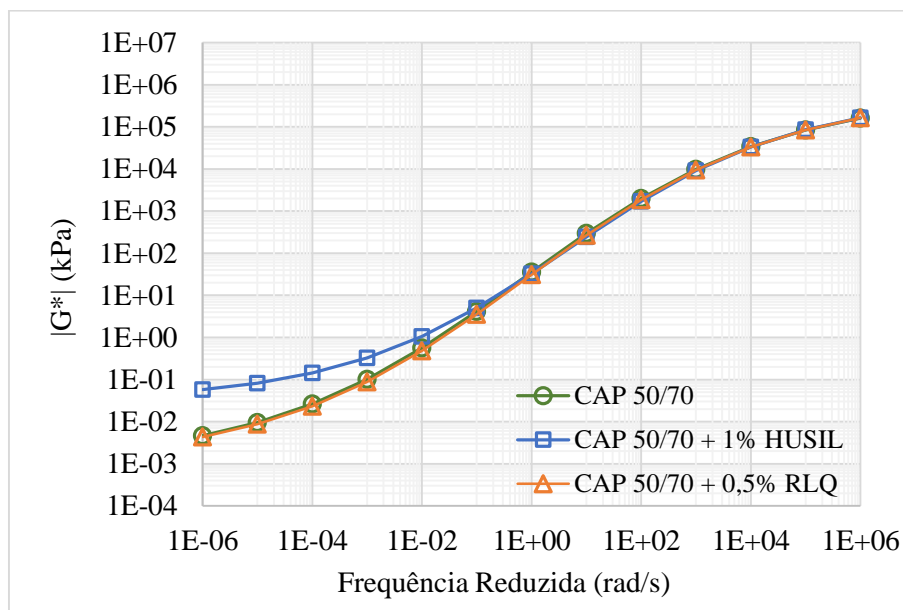


Figura 4.7 – Curvas-mestras dos ligantes para o módulo de cisalhamento dinâmico à temperatura de 34°C

A Figura 4.7 mostra que o ligante puro e modificado com 0,5% de Rediset<sup>®</sup> LQ apresentaram praticamente a mesma curva-mestra. Além disso, a altas frequências ou baixas temperaturas, a incorporação de HUSIL na proporção apresentada também não alterou o comportamento do CAP 50/70. Já para baixas frequências ou altas temperaturas, a adição de 1% de HUSIL ao ligante aumentou seu módulo, deixando-o mais rígido.

### 4.3 ESTUDO DE DOSAGEM

Com o objetivo de determinar as diversas variáveis relativas às misturas que seriam objeto de estudo na fase de ensaios mecânicos, foram realizadas três etapas de investigação: dosagem Marshall, análise de composições de agregados com escória e estudo de compactação. Os resultados obtidos em cada uma delas, bem como as análises e as escolhas feitas a partir deles são apresentados a seguir.

#### 4.3.1 DOSAGEM MARSHALL

A determinação do teor de ligante a ser utilizado em todas as misturas asfálticas a serem confeccionadas nas etapas seguintes foi feita por meio da metodologia de dosagem Marshall para misturas quentes sem aditivo e com agregados somente de calcário. Para isso, primeiramente, as temperaturas de trabalho foram determinadas a partir da viscosidade do CAP 50/70. Sendo assim, a temperatura de mistura resultante foi de  $153 \pm 3^\circ\text{C}$ , correspondendo a uma viscosidade de  $170 \pm 20$  cP, e a temperatura de compactação foi de  $140 \pm 3^\circ\text{C}$ , equivalendo a  $280 \pm 30$  cP, como ilustrado na Figura 4.8.

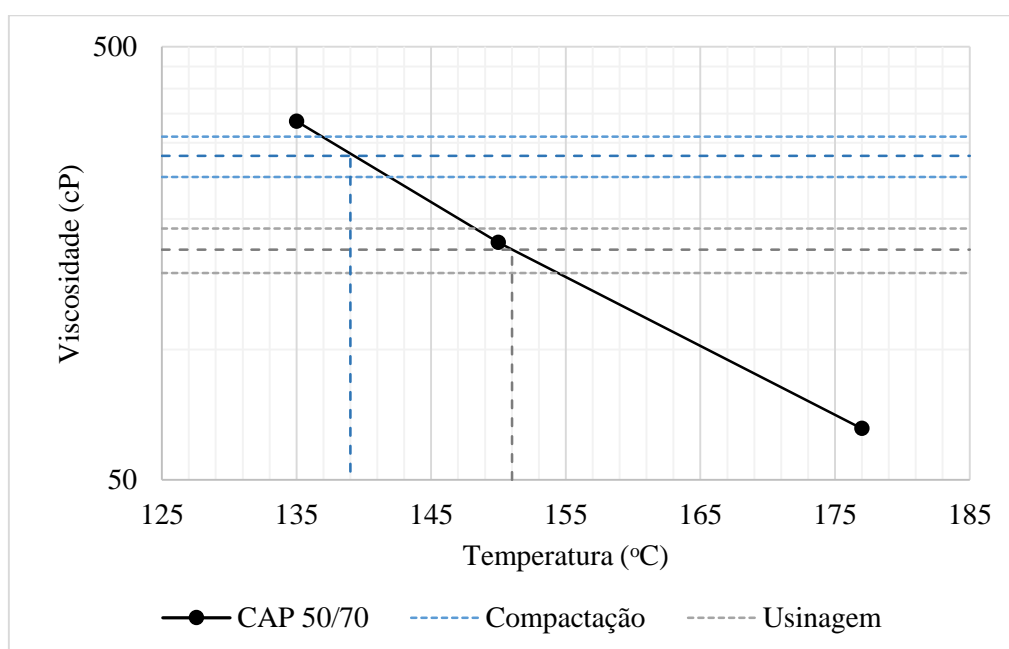


Figura 4.8 – Viscosidade rotacional em função da temperatura

Feito isso e após a confecção dos corpos-de-prova com diferentes teores foram obtidos os parâmetros volumétricos e o valor da estabilidade Marshall para as amostras. As médias dessas variáveis para cada teor de asfalto podem ser observadas na Tabela 4.10, onde encontram-se ainda os desvios-padrão (DP) correspondentes, e na Figura 4.9. Vale ressaltar ainda que nesta etapa foi utilizada apenas a densidade máxima calculada (DMT).

Tabela 4.10 – Dosagem Marshall: parâmetros volumétricos e estabilidade

Teor (%)	DMT (g/cm³)	Gmb (g/cm³)		Vv (%)		VAM (%)		RBV (%)		Estabilidade (N)	
		Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
3,5	2,577	2,425	0,012	5,90	0,28	14,2	0,26	58,5	1,24	13715	659
4,0	2,557	2,452	0,011	4,08	0,33	13,7	0,30	70,2	1,77	13913	85
4,5	2,537	2,467	0,009	2,75	0,27	13,6	0,24	79,8	1,61	13247	552
5,0	2,517	2,471	0,002	1,83	0,04	14,0	0,03	86,9	0,24	12531	117
5,5	2,498	2,460	0,001	1,52	0,05	14,8	0,04	89,7	0,29	10932	532

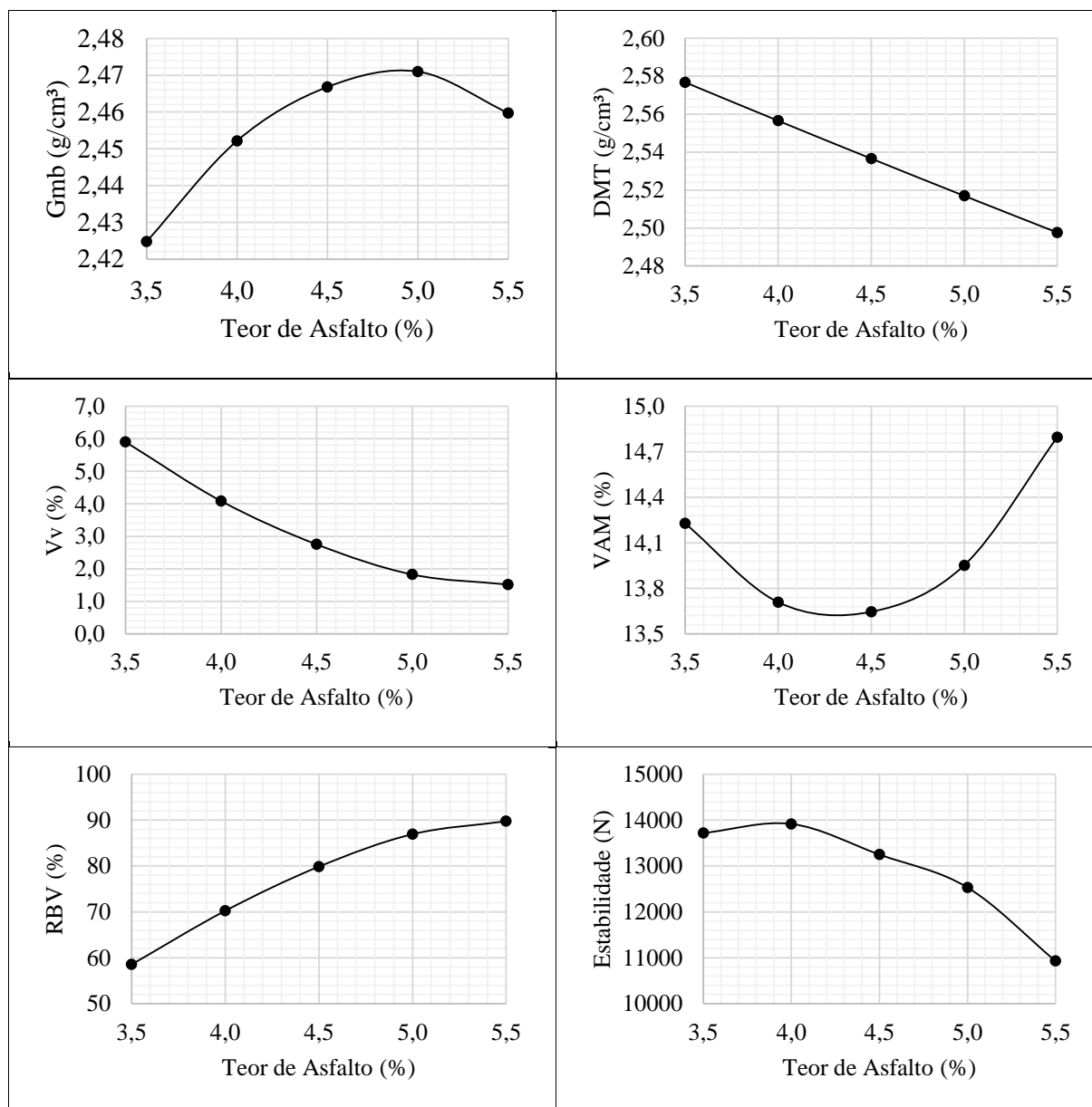


Figura 4.9 – Variação dos parâmetros volumétricos e da estabilidade por teor de asfalto

Para estar em conformidade com a norma DNIT-ES 031/2006, as misturas devem obedecer aos requisitos indicados na Tabela 4.11, sendo que, quanto à relação betume/vazios e vazios do agregado mineral, exige-se apenas o atendimento aos limites de uma das duas propriedades.

Tabela 4.11 – Especificações para as misturas asfálticas segundo a norma DNIT-ES 031/2006

<b>Característica</b>	<b>Limites</b>
V <sub>v</sub> , %	3 - 5
VAM para TMN de 19 mm, mín, %	15
RBV, %	75 - 82
Estabilidade, mín, kgf	500
RT a 25°C, mín, MPa	0,65

Observando-se os valores da Tabela 4.10 e as referidas especificações, tem-se que: quanto ao volume de vazios, apenas o teor de 4,0% atende à especificação (entre 3% e 5%) para camada de rolamento; com respeito ao VAM nenhuma mistura atende o mínimo exigido (>15%), mas, em relação ao RBV, a mistura com 4,5% de asfalto obedece aos limites especificados (entre 75% e 82%); por fim, quanto à estabilidade, todas as misturas estão de acordo com a norma (>5000N), mas os três primeiros teores apresentaram os maiores resultados, sendo eles bem próximos entre si. Sendo assim, pode-se dizer, que o teor ótimo estaria entre 4,0% e 4,5%, onde a combinação das características volumétricas e da estabilidade indicam desempenhos mais satisfatórios.

No entanto, é importante destacar que os baixos valores de VAM apresentados pelas misturas, apesar de indicarem que os agregados formam um arranjo estrutural mais denso, o que lhes confere boa estabilidade, apontam para uma dificuldade de que uma quantidade suficiente de asfalto seja adicionada, resultando em uma película de recobrimento dos agregados muito fina, que pode comprometer a durabilidade da mistura. Segundo Gouveia (2006), quanto menor a angularidade e a rugosidade das partículas de agregados, maior a dificuldade de se atingir o valor mínimo de VAM, além disso, a granulometria escolhida age em conjunto com esses fatores, tendo grande influência nesse parâmetro volumétrico. Dessa forma, pode-se dizer que a insuficiência de vazios do agregado mineral, neste caso, deve-se, principalmente, à textura superficial lisa do agregado de calcário e, possivelmente, à proporção escolhida de agregados graúdos e miúdos.

Assim, para auxiliar na escolha do teor de projeto, utilizou-se ainda o gráfico da Figura 4.10, em consonância com o que é prescrito pelo 3º DRF do DNIT, que contém os dados de volume de vazios (V<sub>v</sub>) e de relação betume/vazios (RBV) para cada teor de asfalto, com as respectivas linhas de tendência, além dos limites especificados pelo DNIT para cada um desses parâmetros.



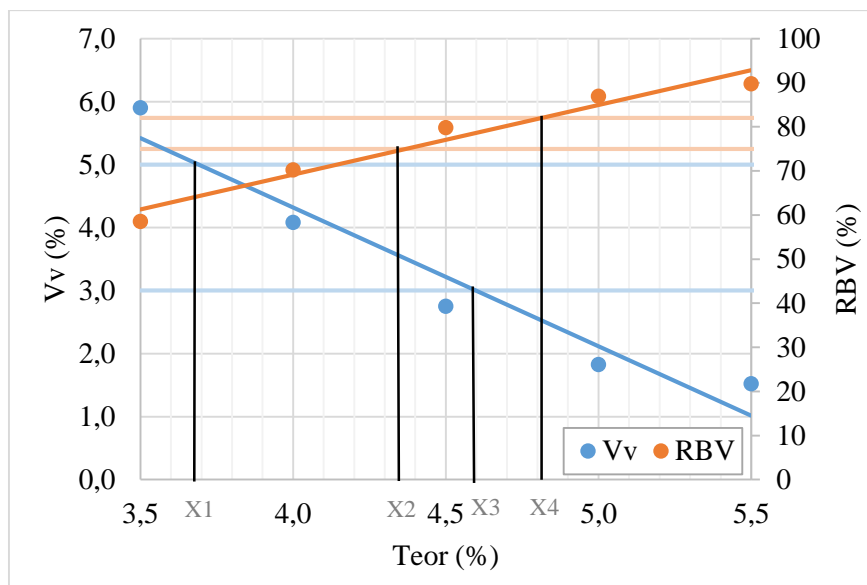


Figura 4.10 – Vv e RBV em função do teor de asfalto

Como mostrado na Figura 4.10, as intersecções das linhas de tendência de Vv e RBV com seus respectivos limites resultam em quatro teores de asfalto, indicados por X1, X2, X3 e X4. Assim, segundo Bernucci *et al.* (2008), pode-se selecionar o teor de projeto por meio da média dos teores intermediários entre eles, ou seja, X2 e X3. Nesse caso, portanto, foi obtido um valor de 4,48%, já que X2 e X3 foram, respectivamente, 4,37% e 4,60%. Dessa forma, optou-se por adotar um teor de projeto de 4,5% de asfalto.

#### 4.3.2 ANÁLISE DE COMPOSIÇÕES DE AGREGADOS COM ESCÓRIA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Nessa fase da pesquisa, foram produzidas misturas asfálticas a quente com teor de asfalto de 4,5% e diferentes composições de agregados de calcário e escória de aciaria. Os nomes das misturas indicam a porcentagem de calcário que foi substituída por escória, sendo G20%, G42% e G64% misturas onde as frações substituídas eram graúdas e M10%, M17% e M36%, misturas com substituições nos agregados miúdos. Vale lembrar ainda que, na confecção das amostras, não foi realizado o envelhecimento a curto prazo da massa asfáltica, ou seja, a compactação foi feita imediatamente após a mistura dos materiais.

Para todas as misturas, foram determinados os parâmetros volumétricos Gmb, Gmm, DMT (exceto para 10%), Vv, VAM e RBV. A Figura 4.11 apresenta uma comparação entre os valores obtidos para as densidades máximas teórica (DMT) e medida pelo método Rice (Gmm).

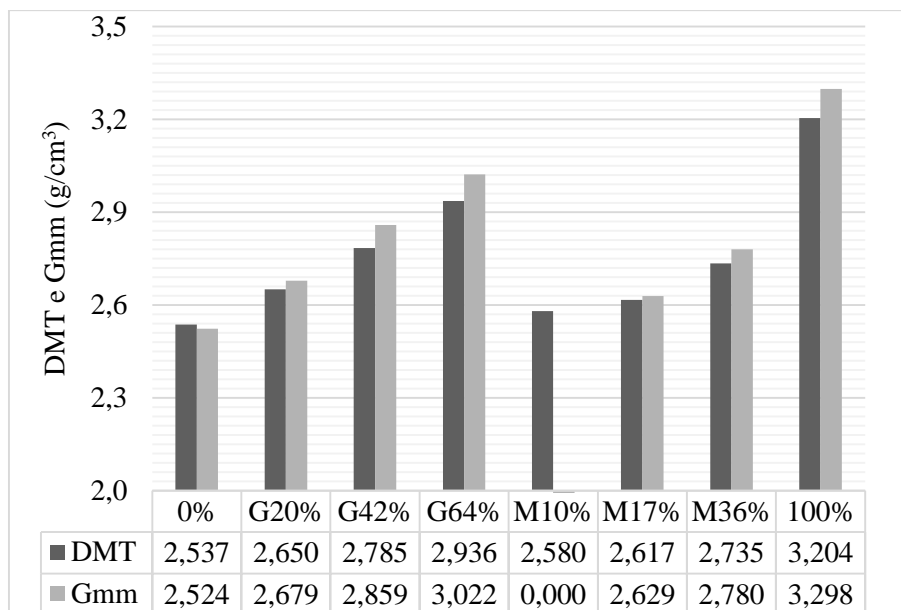


Figura 4.11 – Comparação entre DMT e Gmm para misturas com diferentes composições de agregados de calcário e escória de aciaria

Percebe-se que, com exceção da mistura somente com calcário (0%), todas as misturas exibiram Gmm ligeiramente maior do que a DMT. As maiores diferenças, no entanto, foram observadas nas misturas G64% e 100%, ambas com densidade medida cerca de 2,85% mais alta que a calculada (teórica).

Na Tabela 4.12 encontram-se os valores obtidos para todos os parâmetros volumétricos considerados, com a média das amostras compactadas e o respectivo desvio-padrão. Esses resultados são mostrados em forma de gráfico na Figura 4.12, onde se observa a evolução desses parâmetros com as substituições de calcário por escória nas frações graúdas e nas frações miúdas.

Tabela 4.12 – Parâmetros volumétricos de misturas com diferentes composições de agregados

Mistura	Gmb (g/cm <sup>3</sup> )		Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	Vv (%)		VAM (%)		RBV (%)	
	Média	DP		Média	DP	Média	DP	Média	DP
0%	2,462	0,008	2,524	2,44	0,31	13,32	0,28	81,68	1,96
G20%	2,631	0,007	2,679	1,77	0,26	13,39	0,23	86,81	1,75
G42%	2,766	0,018	2,859	3,26	0,62	15,47	0,54	79,02	3,40
G64%	2,880	0,015	3,022	4,67	0,51	17,39	0,44	73,19	2,28
M10%	2,506	0,001	2,580	2,87	0,06	13,94	0,05	79,38	0,34
M17%	2,527	0,003	2,629	3,91	0,11	15,07	0,10	74,07	0,56
M36%	2,618	0,009	2,780	5,83	0,33	17,39	0,29	66,52	1,34
100%	3,029	0,021	3,298	8,15	0,64	21,53	0,54	62,19	1,99

Como era esperado, as massas específicas aparente ( $G_{mb}$ ) e máxima ( $G_{mm}$ ) das misturas compactadas apresentaram valores crescentes com o aumento da porcentagem de escória na composição de agregados, o que se deve à maior densidade desse material em comparação com o calcário. Quanto ao volume de vazios ( $V_v$ ), uma tendência crescente também foi observada com a adição do rejeito, o que se explica pelo fato de que os grãos de escória apresentam maior porosidade, angularidade e rugosidade e, portanto, acabam absorvendo mais o ligante asfáltico e deixando a mistura mais “seca”, além de dificultarem o rearranjo das partículas durante a compactação. Essa ocorrência é ainda mais importante nas misturas em que as substituições foram feitas nas frações miúdas, como pode ser visto no gráfico de  $V_v$  na Figura 4.12. Observando os valores da Tabela 4.12, percebe-se ainda que apenas as misturas G42%, G64% e M17% possuem  $V_v$  dentro dos limites da especificação do DNIT (3% a 5%). Além disso, os desvios-padrões também se tornam maiores com o aumento da proporção de escória, o que pode ser explicado pela heterogeneidade de suas partículas.

Ainda sobre os parâmetros volumétricos, observa-se que quanto ao VAM somente as misturas 0%, G20% e M10% não superaram o valor mínimo especificado pelo DNIT (15%) e, em relação ao RBV, os limites da especificação (75% a 82%) só foram respeitados pelas misturas 0%, G42% e M10%. No entanto, como a norma exige apenas que a mistura atenda a um ou outro critério, pode-se dizer que a única que não cumpre o exigido é a mistura G20%. Os gráficos da Figura 4.12 revelam ainda que o VAM cresce e o RBV diminui à medida que aumenta a porcentagem de escória na mistura, ou seja, o volume total de vazios entre os agregados aumenta e a porcentagem desses vazios que são preenchidos pelo ligante fica menor, sendo a porosidade, a angularidade e a textura dos grãos novamente a justificativa para isso. Os maiores resultados de VAM para as substituições nas frações miúdas, como ocorreu para o  $V_v$ , pode ser justificada pelo fato de que, segundo Gouveia (2006), os agregados finos são os componentes mais críticos para o controle do VAM e os que mais influenciam na estabilidade das misturas.

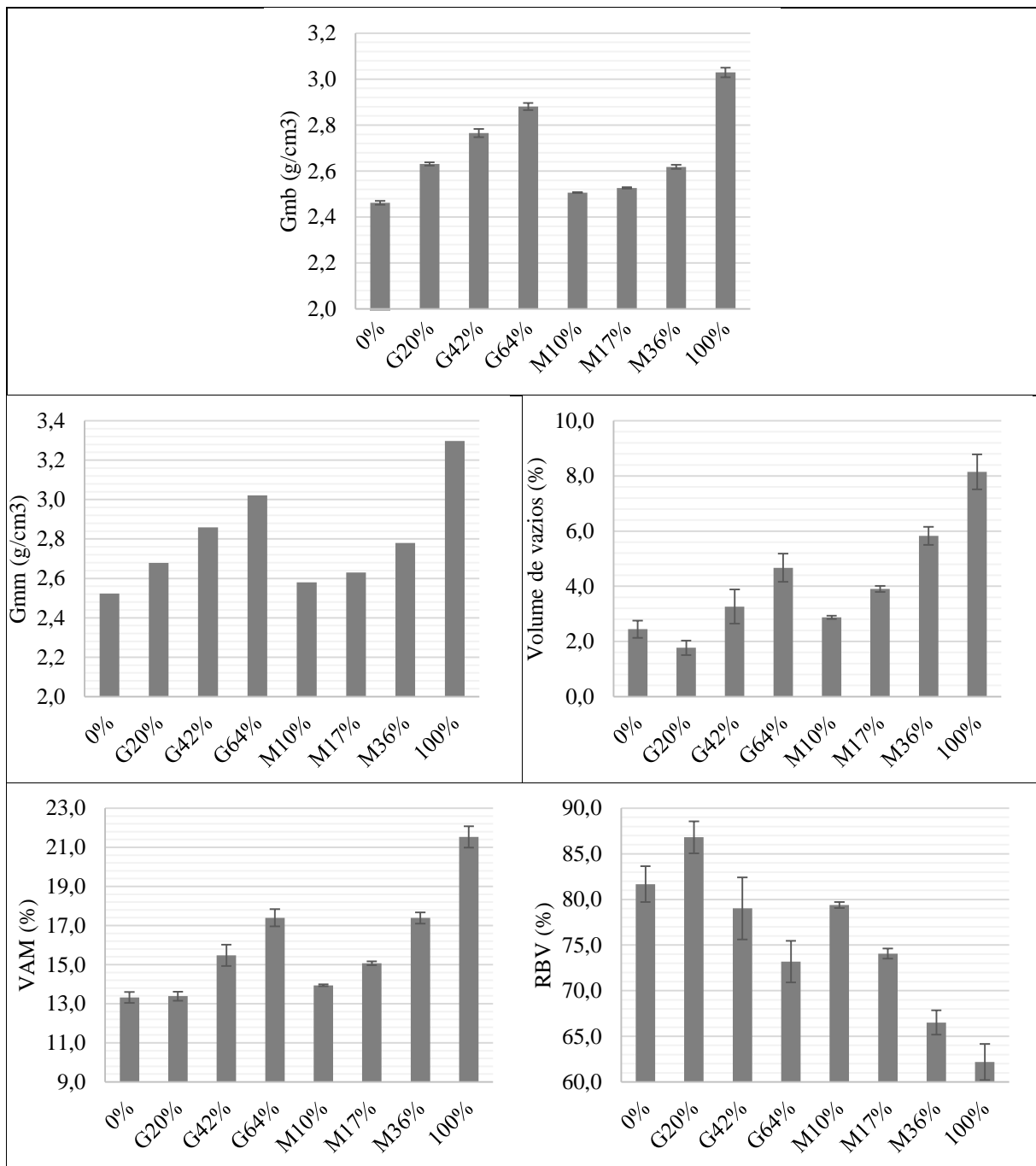


Figura 4.12 – Parâmetros volumétricos de misturas com diferentes composições de agregados

Além dos parâmetros volumétricos, determinaram-se a estabilidade e a fluência Marshall para todas as misturas. A partir dos resultados obtidos, foram escolhidas algumas delas para a realização do ensaio de resistência à tração indireta. Por fim, módulo de resiliência foi também determinado para três dessas misturas. As Tabelas 4.13 e 4.14 e a Figura 4.13 mostram os resultados decorrentes desses ensaios.

Tabela 4.13 – Resultados do ensaio de estabilidade Marshall para misturas com diferentes composições de agregados

Mistura	Estabilidade (N)		Fluência (mm)		E/F (kN/mm)	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
0%	12941	331	3,76	0,40	3,5	0,450
G20%	13964	1104	2,96	0,70	5,0	1,734
G42%	14164	1572	2,86	0,67	5,2	1,589
G64%	14869	965	3,33	1,05	4,9	1,858
M10%	14016	331	2,62	0,69	5,6	1,261
M17%	14800	549	2,85	0,59	5,4	1,232
M36%	16157	1159	2,68	0,28	6,1	0,964
100%	15163	1057	2,61	0,63	6,1	1,691

Tabela 4.14 – Resultados dos ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência para misturas com diferentes composições de agregados

Mistura	Resistência à Tração (kPa)		Módulo de Resiliência (MPa)	
	Média	DP	Média	DP
0%	1274	18	4695	42
G42%	1377	77	-	-
G64%	1501	10	5067	100
M36%	1188	84	-	-
100%	1240	58	4526	215

Os valores obtidos para a estabilidade Marshall das misturas revelam uma tendência crescente desse parâmetro com a substituição do calcário pela escória, sendo os resultados ainda maiores quando as frações substituídas eram de agregados miúdos. Isso pode ser explicado pelo fato de que, os agregados miúdos de escória, em comparação com os graúdos, tornaram as misturas mais “secas”, com maiores vazios ( $V_v$  e  $V_{AM}$ ) e, conseqüentemente, mais rígidas e estáveis do ponto de vista do ensaio de estabilidade Marshall, uma vez que seus resultados são influenciados, principalmente, pela estrutura do esqueleto mineral. Assim, maiores estabilidades corresponderam às misturas M36% e 100%, as quais apresentaram também os maiores volumes de vazios, indicando predomínio da resistência por atrito em relação à parcela coesiva.

Já em relação à fluência, observa-se uma tendência decrescente e, juntamente com os valores da relação estabilidade/fluência, que exprime uma ideia de deformabilidade, indicam que as misturas com escória tendem a ser mais rígidas. Então, acredita-se que esse ganho de resistência e rigidez com as substituições se deve a um melhor intertravamento do esqueleto de agregados

devido não só à maior angularidade e rugosidade das partículas de escória quando comparadas às de calcário, mas também à menor lubrificação entre grãos pelo ligante.

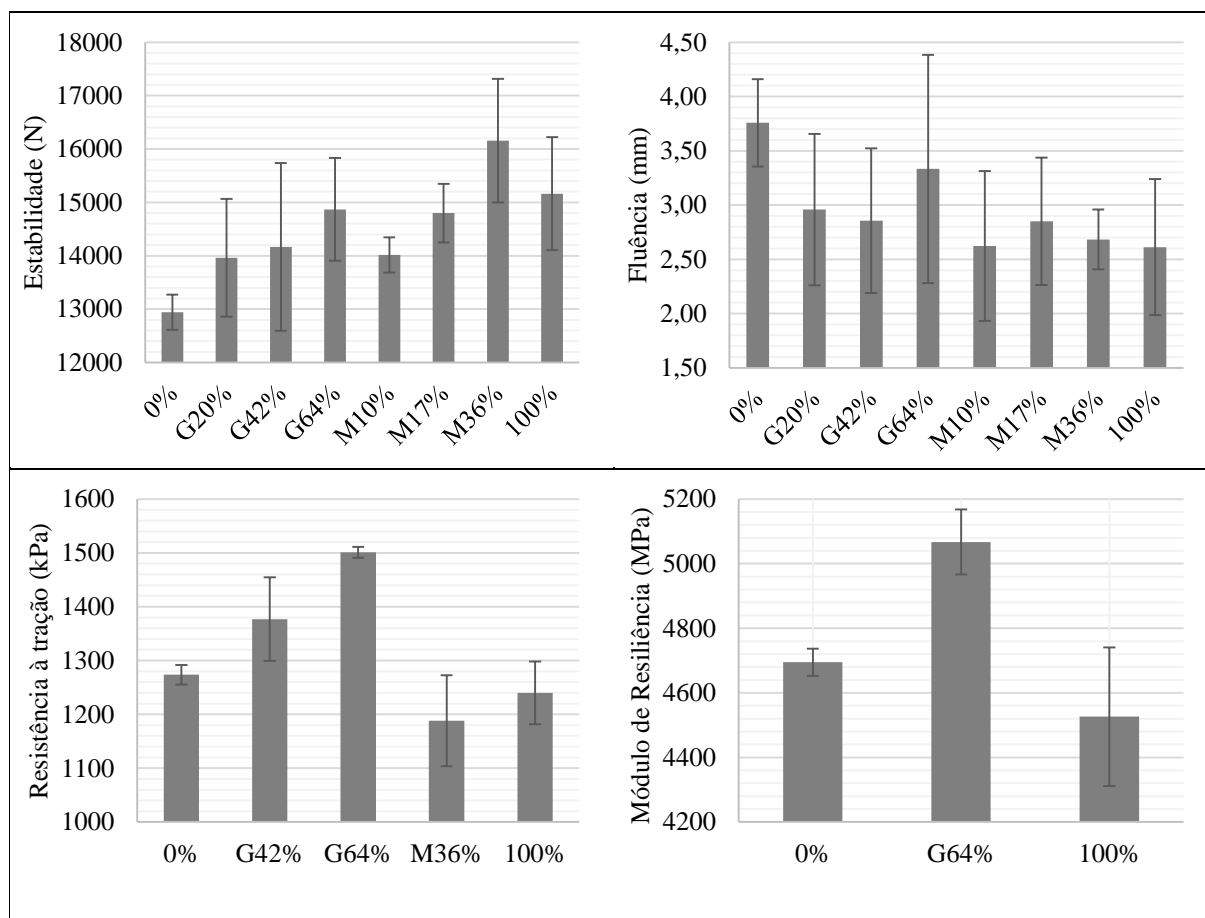


Figura 4.13 – Propriedades mecânicas de misturas com diferentes composições de agregados

Para o ensaio de resistência à tração, foram eliminadas as misturas G20%, M10% e M17%, tendo em vista que a primeira foi a que apresentou piores resultados dentre as substituições de grãos e que, dentre as misturas com substituições nos miúdos, a M36% se mostrou a mais interessante do ponto de vista de desempenho, segundo os parâmetros avaliados até aqui. Além disso, considerou-se que a M36% seria mais atrativa por empregar uma quantidade mais significativa de escória em relação à M10% e à M17%. Assim, quanto à resistência à tração, as misturas com substituições apenas nos agregados grãos apresentaram melhores resultados em comparação com as demais, sendo o maior valor correspondente à mistura em todas as frações grãos eram de escória (G64%). Por outro lado, as misturas M36% e 100% (composta exclusivamente de agregados de escória) apresentaram resistência menor do que a mistura de referência (somente com calcário). Portanto, percebe-se que, quanto à RT, ao contrário do que se observa na estabilidade Marshall, por apresentarem maior disponibilidade de asfalto (com maiores valores de RBV), as misturas com substituições nos grãos são mais resistentes do

que as com miúdos, já que, nesse caso, é mais importante a coesão da mistura conferida pelas películas de asfalto que envolvem as partículas de agregado e essas misturas são menos secas.

Com base nisso, foram escolhidas, para a realização do ensaio de módulo de resiliência (com uma carga de 30% da resistência à tração), além da mistura de referência (0%), as misturas G64% e 100%, pelos desempenhos mostrados até aqui e pelo que representam em termos de volume para o reaproveitamento da escória. Os resultados apontaram que os módulos das misturas não apresentaram grandes diferenças entre si, sendo pouco mais de 10% entre o maior e o menor módulo, que foram respectivamente das misturas G64% e 100%. O ensaio de módulo de resiliência fornece uma medida da rigidez elástica da mistura, a qual é um importante parâmetro para o dimensionamento mecânico de pavimentos. Assim, pode-se dizer que as misturas com agregados de escória de aciaria tendem a ser mais rígidas, o que pode ser bom para o revestimento asfáltico do ponto de vista de deformações permanentes.

Assim, com base nos parâmetros volumétricos e no desempenho apresentado quanto aos ensaios mecânicos realizados, a composição de agregados da mistura G64%, que resulta da combinação de agregados miúdos de calcário e grãos de escória de aciaria, foi escolhida para compor as misturas quentes e mornas produzidas para a fase posterior de avaliação mecânica.

### **4.3.3 ESTUDO DE COMPACTAÇÃO**

À medida que a mistura asfáltica esfria, a viscosidade do ligante aumenta e cresce a sua resistência aos esforços de compactação. Dessa forma, ao variar a temperatura de compactação de diversas misturas com o mesmo número de golpes do compactador, as misturas asfálticas com maior trabalhabilidade, apresentam maiores densidades e, portanto, menores volumes de vazios (BENNERT, 2012). Com base nisso, o estudo de compactação consistiu em uma análise na qual foram compactadas diversas misturas asfálticas, variando-se os teores de aditivo (HUSIL e Rediset<sup>®</sup> LQ) e a temperatura de trabalho, as quais foram, posteriormente, submetidas ao ensaio de resistência à tração para fornecer mais um parâmetro de comparação.

No entanto, para todas as misturas, foram mantidos, além da energia de compactação (75 golpes por face), o teor de asfalto (4,5%) e a composição de agregados (apenas calcário). Assim, o nome dado a elas consiste na porcentagem em massa do aditivo em relação ao ligante seguida da letra inicial do aditivo utilizado. Já os termos TR, TR-20 e TR-30 equivalem, respectivamente, às temperaturas de compactação de 140°C, 120°C e 110°C.

O objetivo dessa etapa da pesquisa era avaliar o efeito dos aditivos e da temperatura na compactação. Assim, são apresentados os resultados médios de volume de vazios (Vv) e

resistência à tração (RT), com os respectivos desvios-padrão, para cada mistura estudada. Além disso, foram realizadas análises de variância (ANOVA) para auxiliar a análise comparativa entre as diversas misturas. Então, as Tabelas 4.15 e 4.16 e as Figuras 4.14 e 4.15 apresentam, primeiramente, os valores de volume de vazios obtidos para os corpos-de-prova compactados nas diferentes condições.

Tabela 4.15 – Volume de vazios para misturas com HUSIL em diferentes proporções e temperaturas de trabalho

	Volume de vazios (%)							
	0%		0,5%H		1%H		1,5%H	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
TR	2,59	0,38	3,10	0,32	2,88	0,31	3,13	0,26
TR-20	3,38	0,12	3,93	0,13	3,78	0,13	3,18	0,10
TR-30	3,96	0,18	3,51	0,21	3,66	0,13	3,32	0,16

Tabela 4.16 - Volume de vazios para misturas com Rediset<sup>®</sup> LQ em diferentes proporções e temperaturas de trabalho

	Volume de vazios (%)							
	0%		0,3%R		0,5%R		0,75%R	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
TR	2,59	0,38	2,95	0,21	2,75	0,13	2,86	0,24
TR-20	3,38	0,12	3,46	0,11	3,23	0,15	3,38	0,24
TR-30	3,96	0,18	3,57	0,57	3,51	0,27	3,64	0,08

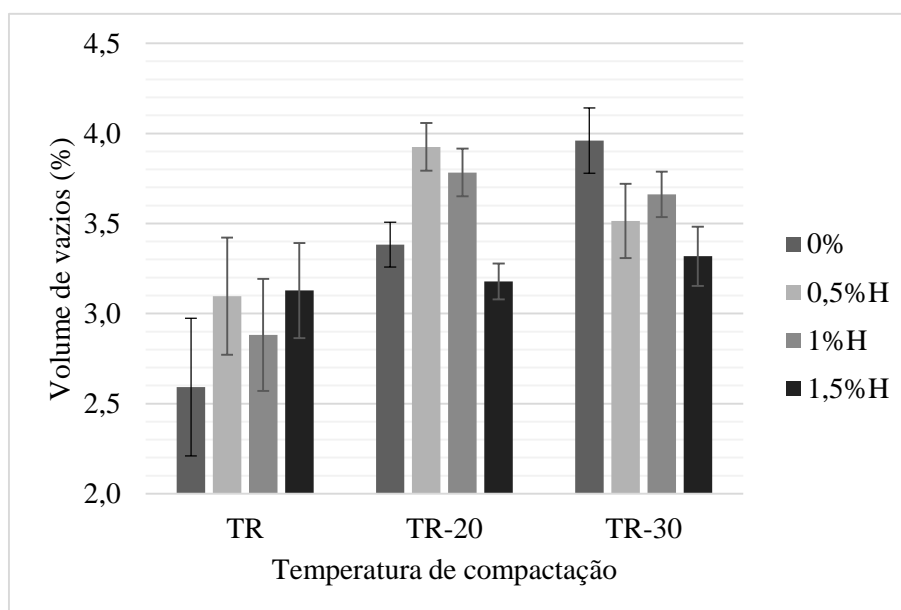


Figura 4.14 – Volume de vazios para diferentes temperaturas de compactação e porcentagens de HUSIL



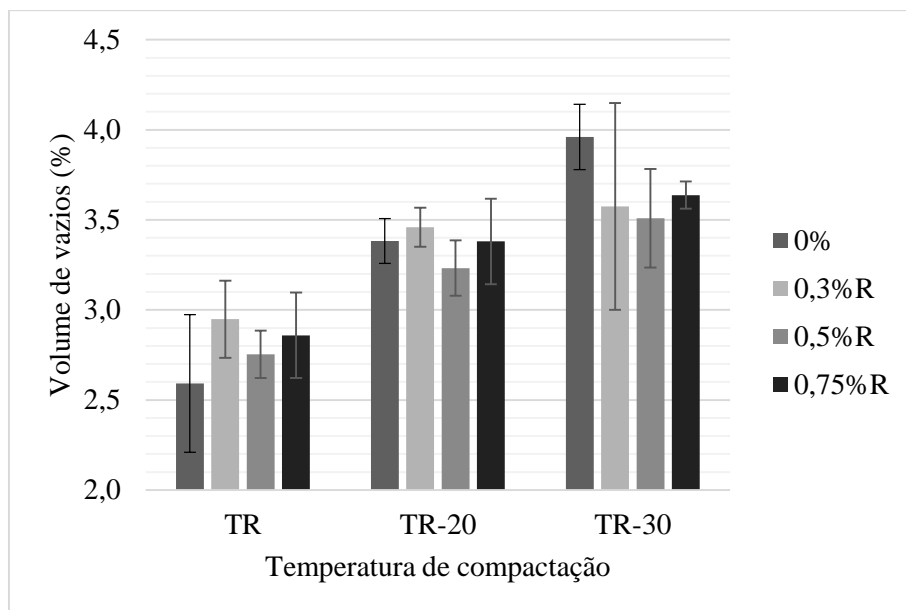


Figura 4.15 - Volume de vazios para diferentes temperaturas de compactação e porcentagens de Rediset<sup>®</sup> LQ

Como esperado, o volume de vazios tende a aumentar à medida em que a temperatura de trabalho diminui, devido à maior dificuldade de compactação. Isso foi observado em quase todas as misturas, com exceção de 0,5% H e 1% H, nas quais o maior Vv ocorreu na temperatura intermediária (TR-20). É interessante observar ainda que o efeito das adições de HUSIL e Rediset<sup>®</sup> LQ aumentou com a redução da temperatura, sendo TR-30 a condição em que as misturas com aditivos apresentaram menores volumes de vazios em relação à mistura 0%. No entanto, para verificar se essas variações foram realmente significativas, realizou-se a ANOVA para duas situações: na primeira, foi feita a análise para cada uma das misturas, tendo como objeto as médias de volume de vazios por temperatura; já na segunda, isso se inverteu e foram consideradas as médias por mistura, fazendo-se a análise para cada temperatura.

A ANOVA revelou que para uma mesma temperatura de compactação, não houve diferença estatística entre o volume de vazios médio das misturas com diferentes teores e tipos de aditivos. Isso não era esperado, uma vez que a incorporação de aditivo deveria favorecer a compactação. Já em relação à média de Vv por temperatura para cada mistura, a Figura 4.16 mostra quais grupos foram estatisticamente iguais (EI) e quais foram diferentes (ED).

Observa-se, na Figura 4.16, que para a mistura sem aditivo, os volumes de vazios para as três temperaturas de trabalho apresentaram valores significativamente diferentes entre si e, portanto, a temperatura realmente influenciou na compactação. Nas misturas 1,5% H e 0,3% R, as médias de Vv por temperatura foram estatisticamente iguais, indicando que as reduções de 20°C e 30°C

não foram importantes ao se compactarem as amostras, o que aponta para o fato de que o aumento da viscosidade do ligante devido à redução de temperatura foi compensado pela ação dos aditivos. As demais misturas exibiram diferenças relevantes entre a temperatura de referência e as temperaturas reduzidas, mostrando que as diminuições de temperatura foram significativas nesses casos.

<b>ANOVA para volume de vazios</b>			
<b>0%</b>	TR	TR-20	TR-30
	TR	ED	ED
	TR-20		ED
	TR-30		
<b>0,5%H</b>	TR	TR-20	TR-30
	TR	ED	EI
	TR-20		EI
	TR-30		
<b>0,3%R</b>	TR	TR-20	TR-30
	TR	EI	EI
	TR-20		EI
	TR-30		
<b>1%H</b>	TR	TR-20	TR-30
	TR	ED	ED
	TR-20		EI
	TR-30		
<b>0,5%R</b>	TR	TR-20	TR-30
	TR	ED	ED
	TR-20		EI
	TR-30		
<b>1,5%H</b>	TR	TR-20	TR-30
	TR	EI	EI
	TR-20		EI
	TR-30		
<b>0,75%R</b>	TR	TR-20	TR-30
	TR	ED	ED
	TR-20		EI
	TR-30		

Figura 4.16 – Resumo dos resultados das ANOVAs dos volumes de vazios por temperatura para cada mistura do estudo de compactação

Para complementar essa análise, foi determinada ainda a resistência à tração de todas as misturas, cujos resultados seguem nas Tabelas 4.17 e 4.18 e nas Figuras 4.17 e 4.18.

Tabela 4.17 – Resistência à tração para misturas com HUSIL em diferentes proporções e temperaturas de trabalho

	<b>Resistência à tração (MPa)</b>							
	<b>0%</b>		<b>0,5%H</b>		<b>1%H</b>		<b>1,5%H</b>	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
TR	1,25	0,05	1,32	0,04	1,25	0,04	1,24	0,02
TR-20	1,11	0,03	1,13	0,05	1,12	0,10	1,14	0,02
TR-30	1,11	0,10	1,10	0,07	1,11	0,06	1,10	0,10

Tabela 4.18 - Resistência à tração para misturas com Rediset<sup>®</sup> LQ em diferentes proporções e temperaturas de trabalho

	Resistência à tração (MPa)							
	0%		0,3%R		0,5%R		0,75%R	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
TR	1,25	0,05	1,25	0,04	1,27	0,06	1,25	0,03
TR-20	1,11	0,03	1,09	0,09	1,18	0,06	1,20	0,06
TR-30	1,11	0,10	1,10	0,06	1,10	0,06	1,08	0,06

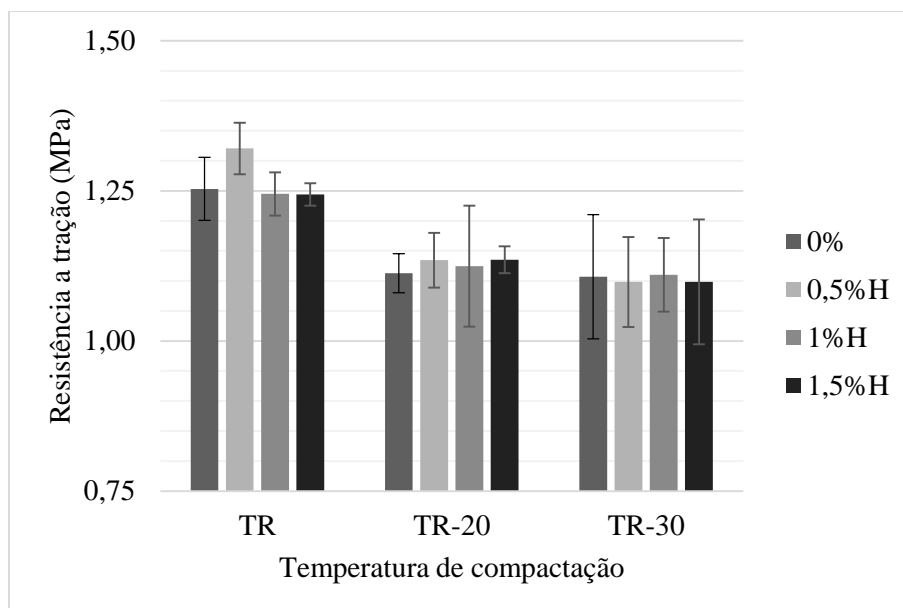


Figura 4.17 – Resistência à tração para diferentes temperaturas de trabalho e porcentagens de HUSIL

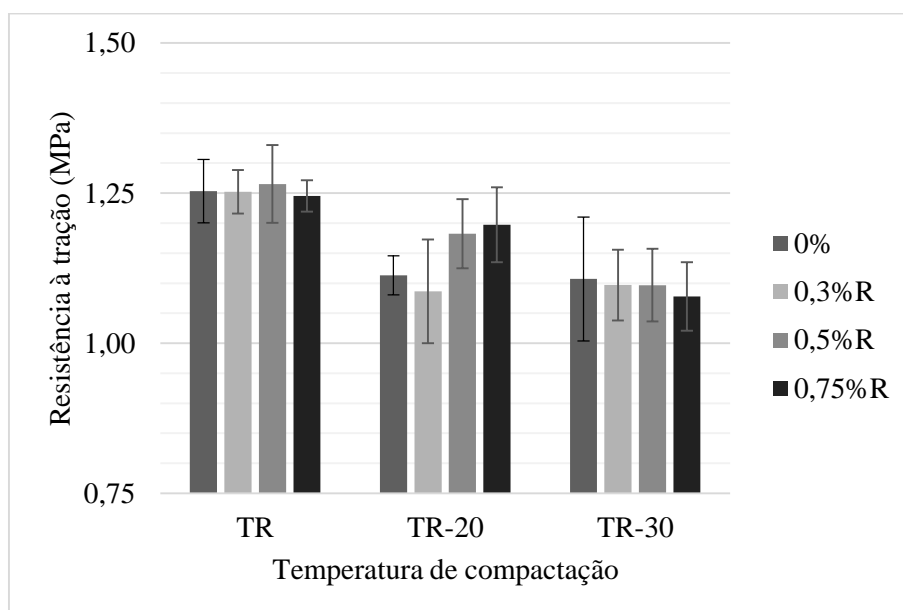


Figura 4.18 - Resistência à tração para diferentes temperaturas de compactação e porcentagens de Rediset<sup>®</sup> LQ

No geral, observa-se que a resistência à tração tende a diminuir à medida que se reduz a temperatura de compactação. Isso pode ter ocorrido, porque com temperaturas de trabalho mais baixas, o volume de vazios é maior e a mistura se torna menos estável e, conseqüentemente, menos resistente. A exceção a essa tendência foi a mistura 0,3%R, em que o menor valor de RT foi observado em TR-20. Quanto às análises de variância, que foram realizadas segundo os mesmos princípios do Vv, observou-se que os aditivos não resultaram em alterações significativas na resistência das misturas, ou seja, estatisticamente, todas elas são iguais quanto à RT para uma mesma temperatura. Já em relação, às análises por mistura, foram obtidos diversos resultados, como apresentado na Figura 4.19.

Dessa forma, segundo a ANOVA, para 1%H não houve distinção entre as resistências das misturas compactadas nas diferentes temperaturas, mesmo que os volumes de vazios das misturas em TR-20 e TR-30 tenham sido considerados diferentes do Vv para a temperatura de referência. As demais misturas, apresentaram resistências estatisticamente diferentes entre TR e uma ou duas das temperaturas reduzidas, sendo percebida ainda uma diferença importante entre TR-20 e TR-30 para a mistura 0,75%R.

<b>ANOVA para resistência à tração</b>			
<b>0%</b>	TR	TR-20	TR-30
	TR	ED	ED
	TR-20		EI
	TR-30		
<b>0,5%H</b>	TR	TR-20	TR-30
	TR	ED	ED
	TR-20		EI
	TR-30		
<b>0,3%R</b>	TR	TR-20	TR-30
	TR	ED	ED
	TR-20		EI
	TR-30		
<b>1%H</b>	TR	TR-20	TR-30
	TR	EI	EI
	TR-20		EI
	TR-30		
<b>0,5%R</b>	TR	TR-20	TR-30
	TR	EI	ED
	TR-20		EI
	TR-30		
<b>1,5%H</b>	TR	TR-20	TR-30
	TR	ED	EI
	TR-20		EI
	TR-30		
<b>0,75%R</b>	TR	TR-20	TR-30
	TR	EI	ED
	TR-20		ED
	TR-30		

Figura 4.19 - Resumos dos resultados das ANOVAs das resistências à tração por temperatura para cada mistura do estudo de compactação

Assim, os resultados dessa etapa da pesquisa, mesmo após análise estatística, não deixaram muito claro a influência das diferentes proporções de aditivos e das temperaturas na

compactação e conseqüente resistência das misturas. Diante disso, optou-se pela redução de 20°C na temperatura de trabalho para as misturas mornas da próxima fase, uma vez que, com a compactação na temperatura de 120°C, a maioria das misturas apresentaram resistência média ligeiramente maior do que para 110°C.

Por fim, em relação às porcentagens de aditivo, foram escolhidos 1% para o HUSIL e 0,5% para o Rediset<sup>®</sup> LQ. Essas opções foram feitas com base não só nos resultados obtidos nesta pesquisa para a caracterização dos ligantes modificados e o estudo de compactação, mas também em outros trabalhos. Para o HUSIL, os estudos de Rondón *et al.* (2014) e Rondón *et al.* (2016) indicaram um maior ganho de consistência no ligante para esse teor de aditivo. Já para o Rediset<sup>®</sup> LQ-1106, Leng *et al.* (2014) utilizaram 0,5% de aditivo em massa de ligantes em suas misturas mornas e obtiveram desempenho mecânico comparável à mistura a quente de referência.

#### 4.4 AMOSTRAS PARA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Para a caracterização mecânica, foram compactadas amostras de seis tipos de misturas diferentes, as quais são descritas na Figura 4.20.

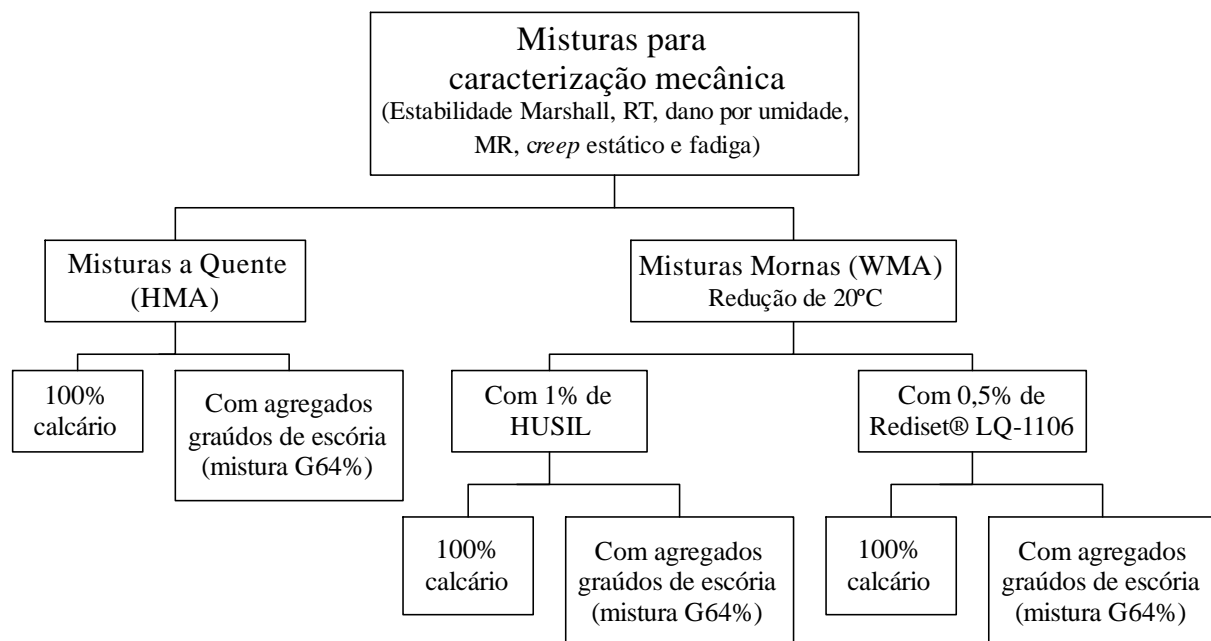


Figura 4.20 - Descrição das misturas asfálticas submetidas à caracterização mecânica

Essas misturas foram nomeadas da seguinte forma: HMA ou WMA, para misturas quentes e mornas, respectivamente, seguido da inicial do aditivo, caso utilizado, finalizando com a letra “E”, quando a composição de agregados possuir escória de aciaria. Portanto, a mistura HMA

pode ser considerada como a mistura de referência do estudo, correspondendo a um CBUQ usualmente empregado como revestimento em pavimentos urbanos.

Assim, a Tabela 4.19 mostra as características volumétricas dos corpos-de-prova moldados para cada mistura e a Figura 4.21 destaca em forma de gráfico os resultados de volume de vazios.

Tabela 4.19 – Parâmetros volumétricos das misturas submetidas à caracterização mecânica

	Gmb (g/cm <sup>3</sup> )		Vv (%)		VAM (%)		RBV (%)	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
HMA	2,457	0,009	2,64	0,35	13,49	0,31	80,48	2,10
WMA-H	2,444	0,005	3,15	0,21	13,94	0,19	77,44	1,23
WMA-R	2,445	0,008	3,10	0,32	13,90	0,29	77,72	1,87
HMA E	2,828	0,018	6,40	0,59	18,89	0,51	66,19	2,19
WMA-H E	2,814	0,022	6,88	0,73	19,30	0,64	64,46	2,71
WMA-R E	2,816	0,015	6,79	0,50	19,23	0,43	64,73	1,82

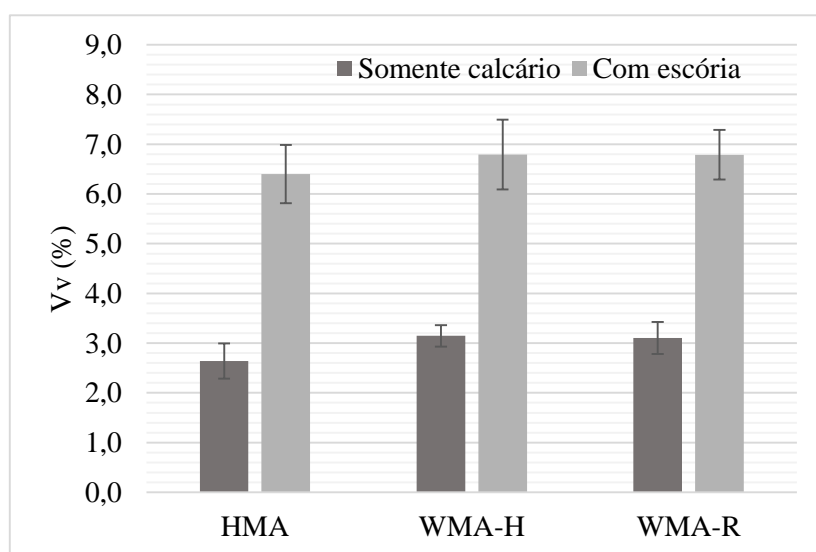


Figura 4.21 – Volume de vazios das misturas submetidas à caracterização mecânica

Percebe-se que, considerando uma mesma composição de agregados, as misturas mornas apresentaram volumetrias bastante parecidas entre si, indicando que, nas proporções usadas, ambos os aditivos (HUSIL e Rediset<sup>®</sup>) agiram de modos parecidos durante a compactação das amostras. Destaca-se ainda que enquanto as misturas somente com escória apresentaram VAM acima do mínimo exigido, as misturas somente com calcário respeitaram os limites especificados para o RBV e, portanto, todas estão de acordo com as especificações do DNIT (Tabela 4.11).

Já em relação ao Vv, a mistura HMA apresentou resultados um pouco abaixo do mínimo de 3% e as misturas com escória de aciaria, mais de 1% acima do máximo de 5%. Assim, as misturas quentes e mornas com escória exibiram maiores volumes de vazios do que as demais, o que já era esperado, uma vez que foi utilizado o mesmo teor de ligante em todas as misturas e os agregados siderúrgicos tendem a absorver mais o CAP, devido à sua porosidade, dificultando a compactação. Além disso, os desvios-padrão observados para essas misturas foram mais elevados do que para aquelas com composição de agregados somente de calcário, o que pode ser explicado pela heterogeneidade dos grãos de escória.

Foi feita então uma análise de variância dos dados de volume de vazios para verificar quais misturas apresentaram médias suficientemente próximas para serem consideradas de um mesmo grupo. Assim, como mostra a Figura 4.22, a ANOVA confirmou que as misturas mornas com mesma composição de agregados são estatisticamente iguais quanto a esse critério e indicou ainda que a diferença entre o Vv de HMA E e de WMA-R E não foi significativa.

	HMA	WMA-H	WMA-R	HMA E	WMA-H E	WMA-R E
HMA		EI	EI	ED	EI	EI
WMA-H			EI	ED	EI	EI
WMA-R				ED	EI	EI
HMA E					ED	EI
WMA-H E						EI
WMA-R E						

Figura 4.22 – Resumo da ANOVA para os resultados de volume de vazios

## 4.5 ENSAIOS MECÂNICOS

Nessa última etapa de trabalho, foi realizada a caracterização mecânica para os seis tipos de misturas descritas no item anterior. Assim, os ensaios aos quais as amostras foram submetidas buscaram investigar a resistência das misturas quanto a rupturas por cargas monotônicas (estabilidade e RT), à fadiga, a deformações permanentes (*creep*) e ao dano por umidade, além caracterizá-las quanto à sua rigidez elástica (módulo de resiliência). Então, a seguir são apresentados os resultados obtidos nessas análises, bem como as reflexões feitas com base neles.

### 4.5.1 ESTABILIDADE MARSHALL

O ensaio de estabilidade Marshall permite avaliar a resistência e deformabilidade da mistura diante de uma compressão diametral confinada a uma temperatura de 60°C. Assim, o valor da estabilidade (E) indica a força máxima a que a amostra é submetida nesse processo e o

deslocamento observado desde o início do carregamento até esse momento corresponde à fluência (F). Portanto, a razão entre esses dois valores (E/F) está relacionada à rigidez da mistura nessas condições de ensaio. Os resultados obtidos para esses parâmetros nos ensaios realizados com as seis misturas estudadas nessa etapa são mostrados na Tabela 4.20 e nas Figuras 4.23 e 4.24, onde se encontram a média e o desvio-padrão dos corpos-de-prova ensaiados para cada tipo de mistura.

Tabela 4.20 – Resultados do ensaio de estabilidade Marshall

Mistura	Estabilidade (kN)		Fluência (mm)		E/F (kN/mm)	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
HMA	13,247	0,55	3,38	0,76	4,14	1,24
WMA-H	13,879	0,62	2,95	0,83	5,05	1,57
WMA-R	13,898	0,76	3,39	0,35	4,12	0,39
HMA E	15,848	0,59	3,61	1,25	4,77	1,53
WMA-H E	14,288	0,51	3,76	0,40	3,83	0,36
WMA-R E	13,722	1,00	3,58	0,39	3,87	0,58

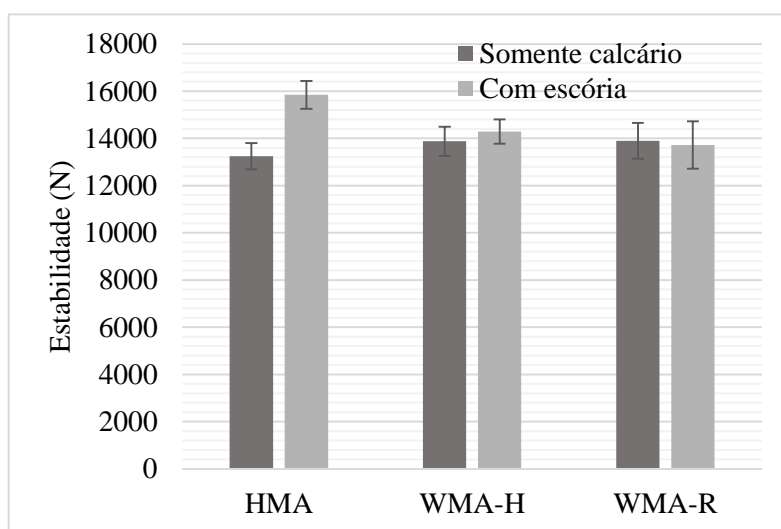


Figura 4.23 – Estabilidade Marshall para misturas quentes e mornas com e sem escória

Percebe-se que a mistura de referência (HMA) apresentou estabilidade inferior às demais, sendo a diferença entre ela e as misturas mornas somente com calcário bem pequena. Por outro lado, dentre as misturas com escória, a quente se destacou pela resistência elevada, que superou todas as outras. Além disso, como o ensaio de estabilidade Marshall mobiliza, principalmente, a resistência ao cisalhamento da mistura, para a qual o atrito é determinante, percebe-se que há uma tendência de ganho de estabilidade com o uso de escória de aciaria como agregado, uma



vez que se observa, nessas misturas, um melhor intertravamento do esqueleto pétreo devido aos grãos mais rugosos e com maior angularidade.

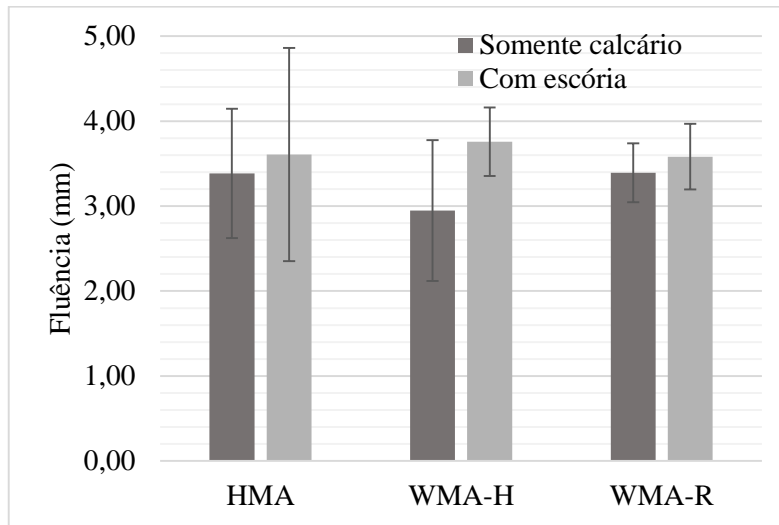


Figura 4.24 – Fluência Marshall para misturas quentes e mornas com e sem escória

Quanto à fluência, percebe-se que, no geral, as misturas com escória apresentaram maiores deslocamentos, mas parecidos entre si. No entanto, tanto em relação à fluência, como para a razão E/F, foram obtidos valores bastante próximos para todas as misturas, ainda mais considerando os desvios-padrão altos que algumas delas apresentaram. Assim, análises de variância foram feitas para determinar quais misturas realmente se destacaram quanto a esses parâmetros, obtendo-se, para a estabilidade, os resultados indicados na Figura 4.25.

	HMA	WMA-H	WMA-R	HMA E	WMA-H E	WMA-R E
HMA		EI	EI	ED	EI	EI
WMA-H			EI	ED	EI	EI
WMA-R				ED	EI	EI
HMA E					ED	ED
WMA-H E						EI
WMA-R E						

Figura 4.25 – Resumo da ANOVA para os resultados de estabilidade

Dessa forma, observa-se que a análise de variância dos resultados da estabilidade apontou que somente a mistura HMA E se destacou em relação às outras e sua resistência foi significativamente maior que as demais. Já em relação à fluência e à razão E/F, para os quais não foi apresentado um quadro resumo da ANOVA, concluiu-se que todas as misturas pertencem a um mesmo grupo, sendo as médias de todas as misturas estatisticamente iguais entre si.

## 4.5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

O ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral forneceu para cada amostra o valor de tensão de tração máximo admitido por ela. Assim, os resultados obtidos estão expressos na Tabela 4.21 e na Figura 4.26, onde podem ser observadas as médias e desvios-padrão para cada mistura.

Tabela 4.21 – Resultados do ensaio de resistência à tração indireta

Mistura	RT (MPa)	
	Média	DP
HMA	1,25	0,05
WMA-H	1,10	0,10
WMA-R	1,13	0,12
HMA E	1,40	0,11
WMA-H E	1,22	0,07
WMA-R E	1,28	0,07

O resultado do ensaio de tração indireta é influenciado, principalmente, pela coesão da mistura, que depende da quantidade de ligante e das forças interfaciais entre ligante e agregado. Assim, os dados mostram que, no geral, as misturas com escória apresentaram resistência mais alta que as respectivas somente com calcário. Isso pode ser explicado pelo fato de que, por serem mais porosas e possuírem superfície mais rugosa, as partículas de escória possuem maior adesividade passiva com o ligante em comparação com o calcário, o que contribui para a coesão da mistura. Além disso, novamente, a mistura com melhor desempenho foi a HMA E, quente e com agregados graúdos de escória, mas todas se mostraram satisfatórias com resistências bem acima do exigido pelo DNIT (Tabela 4.11).

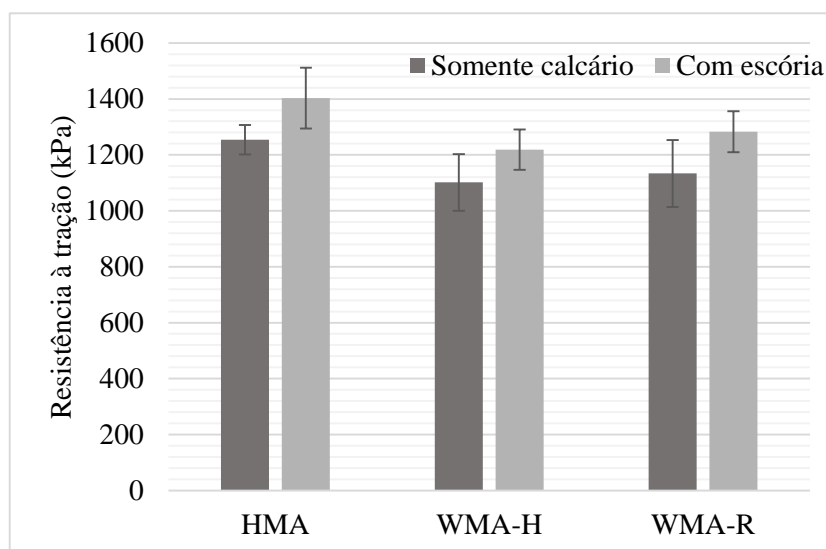


Figura 4.26 – Resistência à tração para misturas quentes e mornas com e sem escória

Comparando agora as misturas com mesma composição de agregados, percebe-se que, em ambas, a mistura a quente apresentou resistência ligeiramente superior às mornas, dentre as quais a diferença de desempenho foi ainda menor. A análise de variância, cujos resultados seguem na Figura 4.27, confirma parcialmente essas percepções, uma vez que aponta que a mistura a quente pertence a um grupo estatístico diferente apenas da morna com HUSIL, sendo sua resistência estatisticamente igual à da mistura com Rediset<sup>®</sup> LQ. Por outro lado, a ANOVA confirmou que a diferença de desempenho entre as misturas mornas de mesma composição de agregados foi insignificante.

	HMA	WMA-H	WMA-R	HMA E	WMA-H E	WMA-R E
HMA		ED	EI	ED	EI	EI
WMA-H			EI	ED	EI	ED
WMA-R				ED	EI	EI
HMA E					ED	EI
WMA-H E						EI
WMA-R E						

Figura 4.27 – Resumo da ANOVA para os resultados de resistência à tração

Além disso, a ANOVA revela que as misturas mornas com composições de agregados diferentes pertencem ao mesmo grupo quanto à média da resistência, enquanto que HMA E se difere estatisticamente de HMA. Além disso, HMA E teve desempenho superior a quase todas as misturas, sendo sua média significativamente diferente das demais, com exceção da WMA-R E. Por fim, pode-se dizer ainda que WMA-H e WMA-R E também apresentaram resultados consideravelmente diferentes entre si por essa análise.

### 4.5.3 DANO POR UMIDADE INDUZIDA

Os resultados mostrados no item anterior foram utilizados também na determinação da resistência ao dano por umidade induzida das misturas, correspondendo aos valores de RT na condição natural (seca). Outras amostras foram submetidas a um período de saturação de seis semanas e, então, determinaram-se as resistências à tração condicionadas. Os resultados obtidos, incluindo a razão de resistência à tração (RRT), que indica a perda de resistência pelo condicionamento, seguem na Tabela 4.22.

Tabela 4.22 – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida

Mistura	RT <sub>seca</sub> (MPa)		RT <sub>sat.</sub> (MPa)		RRT	Grau de saturação (%)
	Média	DP	Média	DP		
HMA	1,25	0,05	1,44	0,05	1,15	31,7
WMA-H	1,10	0,10	1,29	0,04	1,17	34,1
WMA-R	1,13	0,12	1,39	0,05	1,22	35,4
HMA E	1,40	0,11	1,30	0,20	0,93	54,7
WMA-H E	1,22	0,07	1,05	0,07	0,86	62,7
WMA-R E	1,28	0,07	1,26	0,15	0,98	61,5

O pequeno volume de vazios das amostras apenas com calcário dificultou a penetração da água, resultando em um grau de saturação médio menor do que 35%, o que é considerado baixo para esse tipo de análise. Além disso, observou-se que a RT sofreu um aumento após o condicionamento, levando a uma RRT acima de 100%. Assim, para maiores análises, foram levados em consideração apenas os resultados para as misturas com escória, os quais são apresentados na Figura 4.28.

Para os corpos-de-prova com escória na composição de agregados, o maior Vv permitiu que o grau de saturação médio chegasse a cerca de 60%. A resistência à tração das amostras saturadas, no geral, foi menor do que aquela que havia se obtido para a condição natural. Essa redução, porém, não foi tão significativa, sendo no máximo 14%, valor correspondente à mistura morna com HUSIL. Assim, todas as misturas com substituição dos agregados graúdos de calcário por escória apresentaram desempenho satisfatório quanto ao dano por umidade, com valores acima de 80%. A melhor entre elas, no entanto, foi a mistura com Rediset<sup>®</sup> LQ, o que pode ser explicado pela composição desse aditivo, que inclui agentes melhoradores de adesividade.

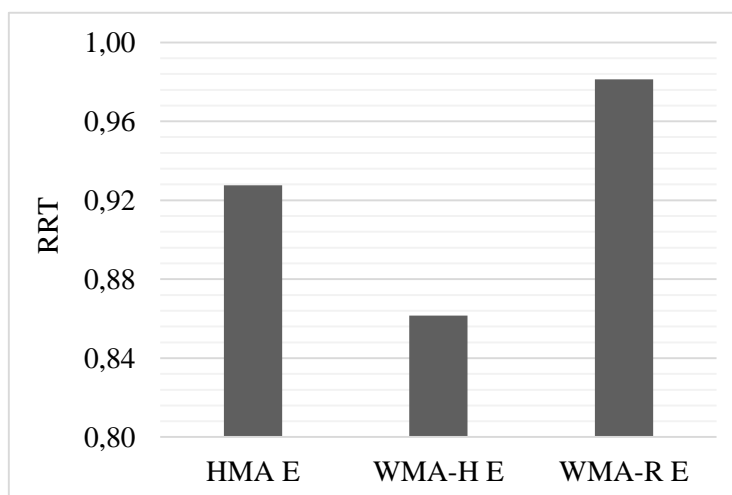


Figura 4.28 - Resultados do dano por umidade induzida para misturas com escória

Além disso, a saturação dos corpos-de-prova permitiu ainda observar o comportamento da escória de aciaria enquanto agregado em misturas asfálticas na presença da água. Com o intuito de avaliar, de certa forma, a expansão, determinou-se o volume das amostras, por meio das medições de altura e diâmetro, antes e depois do período de saturação. Foi constatada uma variabilidade grande nos resultados, com valores entre 0,80% e 3,15% de aumento de volume na amostra. A amostra que apresentou essa maior expansão era de mistura a quente e foi a única em que se observou trincamento, como está retratado na Figura 4.29. No entanto, fora esse corpo-de-prova, pode-se dizer que a mistura a quente apresentou variação de volume menor do que as mornas.



Figura 4.29 – Amostra com trinca devido à expansão

Como ilustrado na Figura 4.30, ao analisar o aspecto visual das amostras pós-condicionamento percebeu-se ainda mudanças de forma devido à expansão, além da presença de áreas esbranquiçadas, que indicam a ocorrência de alguma reação química, e de pequenos pontos vermelho-alaranjados, que são característicos da oxidação do ferro.

Com base nisso, é possível confirmar a presença de elementos expansivos nos agregados de escória de aciaria, o que reforça a necessidade de uma avaliação específica acerca da expansibilidade desse material e de ações de estabilização preliminares a seu uso, como a cura por hidratação. Infelizmente, não foi possível realizar testes específicos de expansibilidade nesta pesquisa, uma vez que inicialmente acreditava-se que a escória já estaria volumetricamente estabilizada pelo tempo de exposição a intempéries e a descoberta desse potencial expansivo ainda importante só foi feita após o fechamento do cronograma de ensaios. Por outro lado, pode-se dizer também que a adesividade entre a escória e o ligante foi satisfatória, uma vez que a RRT foi bastante alta para todas as misturas.

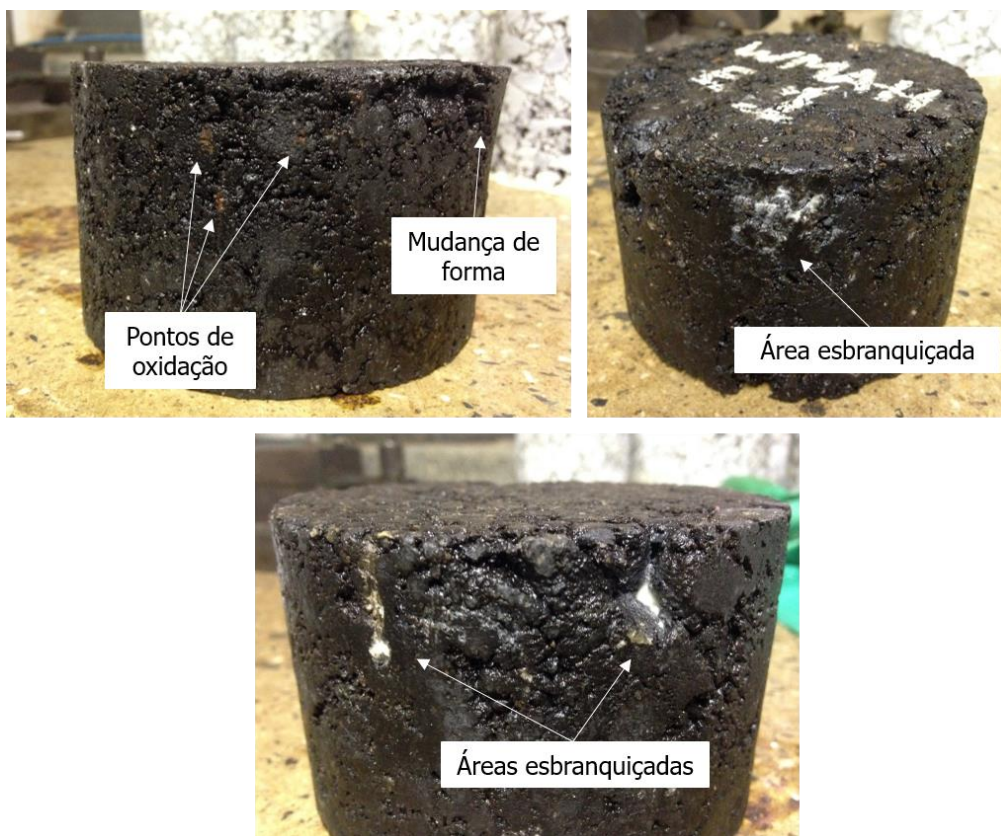


Figura 4.30 – Amostras pós-condicionamento: observações superficiais

#### 4.5.4 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O módulo de resiliência é uma medida da rigidez elástica sob cargas repetidas e sua determinação foi feita aqui por meio do ensaio de compressão diametral com cargas iguais a 30% da RT de cada mistura. Assim, foram obtidos os resultados da Tabela 4.23 para as misturas quentes e mornas com composições de agregado com e sem escória de aciaria, os quais são apresentados ainda em forma de gráfico na Figura 4.31.

Tabela 4.23 – Resultados do ensaio de módulo de resiliência

Mistura	MR (MPa)	
	Média	DP
HMA	4669	448
WMA-H	4196	364
WMA-R	3993	367
HMA E	5347	327
WMA-H E	4951	545
WMA-R E	4743	428

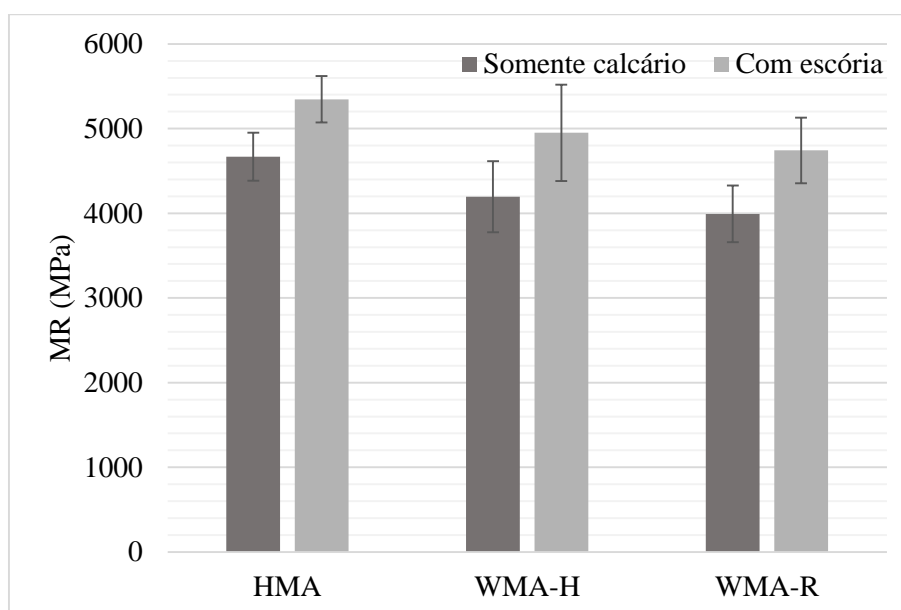


Figura 4.31 – Módulo de resiliência para misturas quentes e mornas com e sem escória

Observa-se que as misturas com agregados graúdos de escória apresentaram módulo superior às constituídas só de calcário, sendo HMA E a mistura mais rígida. Ao compararmos as misturas com mesma composição de agregados, percebe-se que a mistura a quente tem o maior MR e a morna com Rediset<sup>®</sup> o menor. No entanto, as análises de variância feitas indicaram que HMA e HMA E fazem parte do mesmo grupo em relação à média do módulo e apenas para as misturas mornas as amostras com escória foram realmente mais rígidas, como mostra a Figura 4.32.

	HMA	WMA-H	WMA-R	HMA E	WMA-H E	WMA-R E
HMA		EI	ED	EI	EI	EI
WMA-H			EI	ED	ED	EI
WMA-R				ED	ED	ED
HMA E					EI	EI
WMA-H E						EI
WMA-R E						

Figura 4.32 – Resumo da ANOVA para os resultados de módulo de resiliência

Além disso, observa-se ainda que dentre as misturas com escória, não houve diferença estatística entre os grupos, mas considerando as misturas somente com calcário, a média para HMA foi significativamente maior do que para WMA-R. Destaca-se ainda que o módulo de WMA-R foi diferente e inferior a todas as misturas, exceto WMA-H, e, por fim, houve diferença também entre HMA E e WMA-H.

Apesar disso, um MR mais alto não significa necessariamente um melhor desempenho, pois é importante que a mistura apresente boa flexibilidade para absorver as tensões e boa resistência para não sofrer deformações e fissurações excessivos. O módulo é, portanto, um parâmetro importantíssimo no dimensionamento otimizado de uma estrutura de pavimento, no qual são determinadas as tensões e deformações geradas pela solicitação do tráfego nas camadas que a compõem.

#### 4.5.5 CREEP ESTÁTICO

O ensaio de *creep* estático estima a resistência à deformação permanente de uma mistura asfáltica, nesse caso, a 25°C submetida a uma carga de compressão axial constante de cerca de 100 kPa por uma hora. Após o tempo de carregamento, as deformações na amostra continuam sendo medidas durante 15 min, o que permite o cálculo da recuperação ou retorno elástico da mistura. Os valores das deformações acumuladas durante carregamento (deformações totais) e das deformações finais após o encerramento do ensaio (deformações plásticas), bem como a recuperação elástica resultante para cada mistura podem ser vistos na Tabela 4.24.

Tabela 4.24 – Resultados do ensaio de *creep* estático para misturas quentes e mornas com e sem escória de aciaria

Mistura	Deformação total (%)		Deformação plástica (%)		Recuperação elástica (%)	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
HMA	0,286	0,013	0,208	0,006	27,4	1,4
WMA-H	0,406	0,054	0,317	0,062	22,3	6,9
WMA-R	0,345	0,010	0,261	0,009	24,1	0,5
HMA E	0,200	0,049	0,155	0,041	23,0	2,4
WMA-H E	0,242	0,024	0,192	0,024	20,7	3,5
WMA-R E	0,230	0,028	0,177	0,028	23,1	2,9

Percebe-se que as misturas mornas tenderam a apresentar maiores deformações em relação às misturas quentes com mesma composição de agregado, sendo os maiores resultados correspondentes às misturas com HUSIL. Além disso, no geral, as misturas com escória exibiram maior resistência à deformação do que as constituídas somente de calcário. Já quanto à recuperação elástica, observa-se que a mistura de referência (HMA) apresentou o maior resultado e o menor valor correspondeu à mistura WMA-H E. Esses resultados podem ser observados de forma mais clara na Figura 4.33, em que são apresentadas as curvas de



deformação ao longo do tempo para as misturas, e na Figura 4.34, em que se destaca a recuperação elástica.

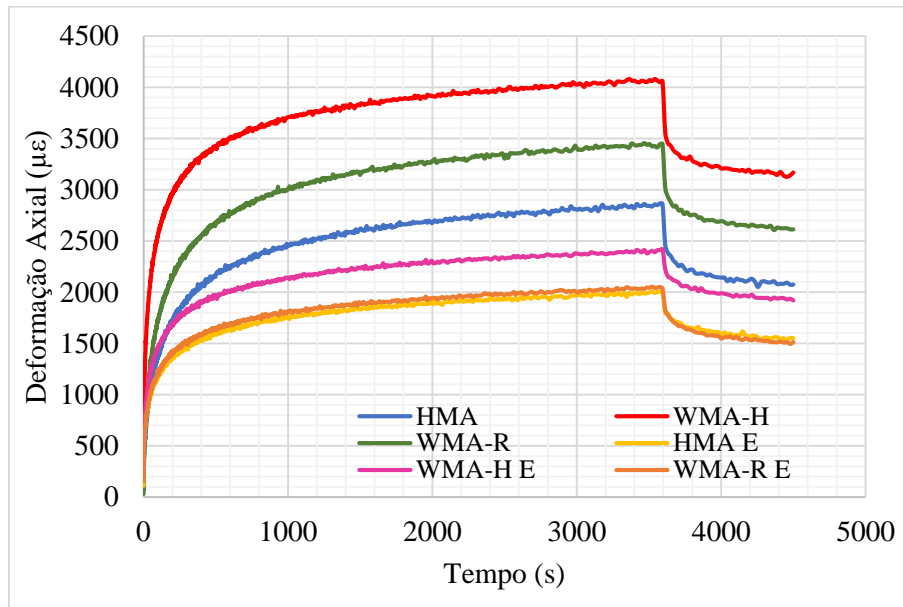


Figura 4.33 – Curvas de deformação em função do tempo resultantes do ensaio de *creep* estático para misturas quentes e mornas com e sem escória

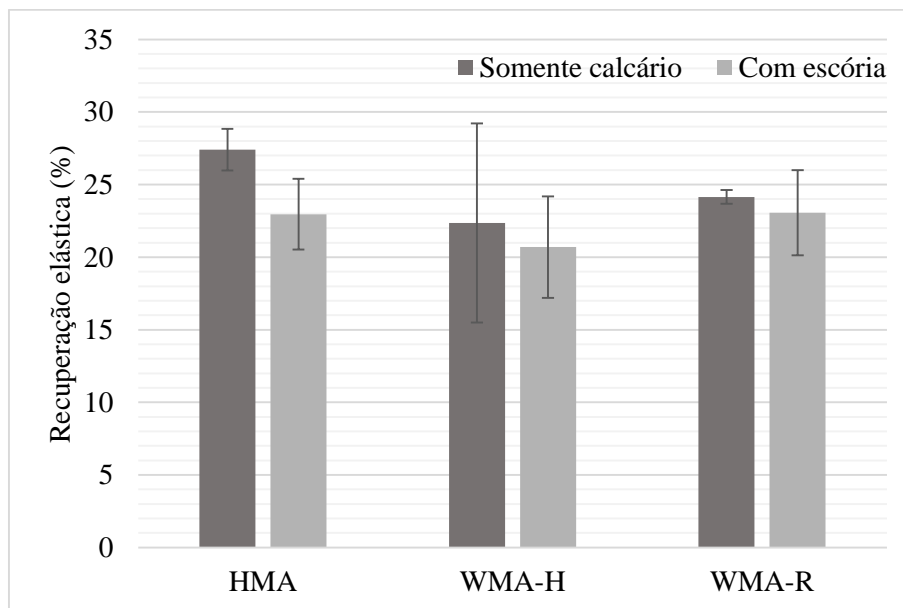


Figura 4.34 – Recuperação elástica das misturas medida no ensaio de *creep* estático

Assim, pode-se dizer que o esqueleto de agregados com escória permitiu um maior intertravamento das partículas, proporcionando melhor desempenho quanto à deformação permanente. Sendo assim, as misturas com escória apresentaram deformações menores do que as misturas somente com calcário. Por outro lado, a menor quantidade de ligante disponível para o recobrimento das partículas nessas misturas, devido à alta porosidade da escória, resultou

em menores porcentagens de retorno elástico. Percebe-se ainda que as misturas mornas com HUSIL apresentaram desempenho um pouco inferior às misturas mornas com Rediset<sup>®</sup>LQ, sofrendo maiores deformações permanentes ao longo de todo o ensaio para as duas composições de agregados. Nota-se ainda que as misturas HMA E e WMA-R E apresentaram curvas bastante similares entre si e foram as misturas mais resistentes a deformações permanentes.

A Figura 4.35 apresenta um resumo das análises de variância feitas com os resultados de deformações totais e deformações plásticas. Assim, estatisticamente falando, existem três grupos de misturas, considerando as médias obtidas para as deformações acumuladas durante o carregamento: o primeiro é composto apenas pela mistura HMA, o segundo, por WMA-H e WMA-R e o terceiro é formado pelas três misturas com escória. Já quanto às deformações observadas após o período de recuperação, são observados apenas dois grupos, uma vez que a HMA passa a fazer parte do último grupo. Além disso, realizou-se ANOVA também para os dados de recuperação elástica e concluiu-se que todas as misturas apresentaram médias suficientemente próximas, podendo ser consideradas de um mesmo grupo estatístico.

DEFORMAÇÕES TOTAIS		HMA	WMA-H	WMA-R	HMA E	WMA-H E	WMA-R E
	HMA		ED	ED	ED	ED	ED
	WMA-H			EI	ED	ED	ED
	WMA-R				ED	ED	ED
	HMA E					EI	EI
	WMA-H E						EI
	WMA-R E						

DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS		HMA	WMA-H	WMA-R	HMA E	WMA-H E	WMA-R E
	HMA		ED	ED	EI	EI	EI
	WMA-H			EI	ED	ED	ED
	WMA-R				ED	ED	ED
	HMA E					EI	EI
	WMA-H E						EI
	WMA-R E						

Figura 4.35 – Resumo das ANOVAs para os resultados de deformações no ensaio de *creep*

#### 4.5.6 FADIGA

Os trincamentos por fadiga são um dos grandes problemas dos pavimentos brasileiros, se não o maior, de forma que os ensaios de previsão de vida de fadiga são de muita importância na avaliação de misturas asfálticas. Nesta pesquisa, esses ensaios foram feitos a compressão diametral a 25°C para três níveis de tensão de tração (aproximadamente 250 kPa, 330 kPa e 400kPa). Para cada mistura, determinou-se a relação entre o número de repetições de carga até a ruptura e o nível de tensões atuantes, a qual pode ser descrita seguinte equação:

$$N_f = k \left( \frac{1}{\sigma_t} \right)^n \quad (4.1)$$

onde  $N_f$  é a vida de fadiga, expressa em número de solicitações,  $\sigma_t$  é a tensão de tração aplicada repetidamente e  $k$  e  $n$  são constantes da regressão linear dos dados experimentais. Assim, as curvas obtidas e os valores dos parâmetro do modelo são apresentados, respectivamente, na Figura 4.36 e na Tabela 4.25.

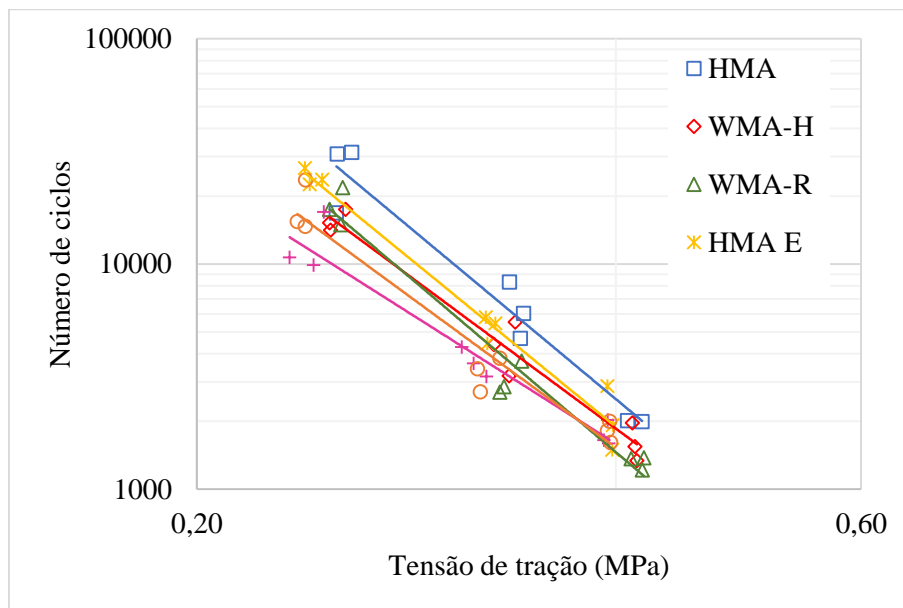


Figura 4.36 – Curvas de fadiga para misturas quentes e mornas com e sem escória

Tabela 4.25 – Parâmetros das curvas de fadiga

Mistura	k	n	R <sup>2</sup>
HMA	22,424	5,149	0,945
WMA-H	28,191	4,570	0,962
WMA-R	11,927	5,246	0,961
HMA E	18,456	5,051	0,974
WMA-H E	43,968	3,916	0,940
WMA-R E	23,984	4,533	0,942

Observa-se que, quanto aos parâmetros do modelo, a mistura WMA-H E apresentou o maior  $k$ , enquanto a WMA-R, o maior  $n$ , possuindo a curva de maior inclinação. Essa maior inclinação é ainda mais interessante que um posicionamento superior da curva, segundo Castelo Branco (2004), uma vez que, em campo, o número de solicitações é muito maior do que no ensaio. Percebe-se ainda que a variação em  $k$  para as diversas misturas foi grande, o que não se observou para  $n$ , para o qual os valores variaram de forma mais sutil. Além disso, considerando esses dois parâmetros ao mesmo tempo, pode-se dizer que as curvas de HMA e HMA E são parecidas e quase paralelas. Da mesma forma, essa proximidade e paralelismo também são percebidos entre WMA-H e WMA-R E.

No entanto, só é viável estabelecer uma relação direta entre o resultado do ensaio de fadiga para uma dada tensão e a previsão de desempenho em serviço na comparação entre duas ou mais misturas quando elas possuem módulos de resiliência semelhantes. Isso ocorre porque, considerando uma mesma estrutura de pavimento e mesmas condições de carregamento, camadas de revestimento asfáltico compostas por misturas com módulos distintos desenvolverão também tensões distintas. Assim, para avaliar o desempenho relativo entre misturas, é fundamental associar uma análise estrutural aos resultados experimentais (MEDINA E MOTTA, 2005).

Desse modo, serão destacadas aqui as comparações feitas entre misturas com módulos estatisticamente iguais segundo a ANOVA para os resultados de MR apresentada anteriormente. Para proporcionar melhor visualização e auxiliar nessas comparações, as Figuras 4.37 e 4.38 apresentam, a seguir, as curvas das misturas separadas em grupos menores.

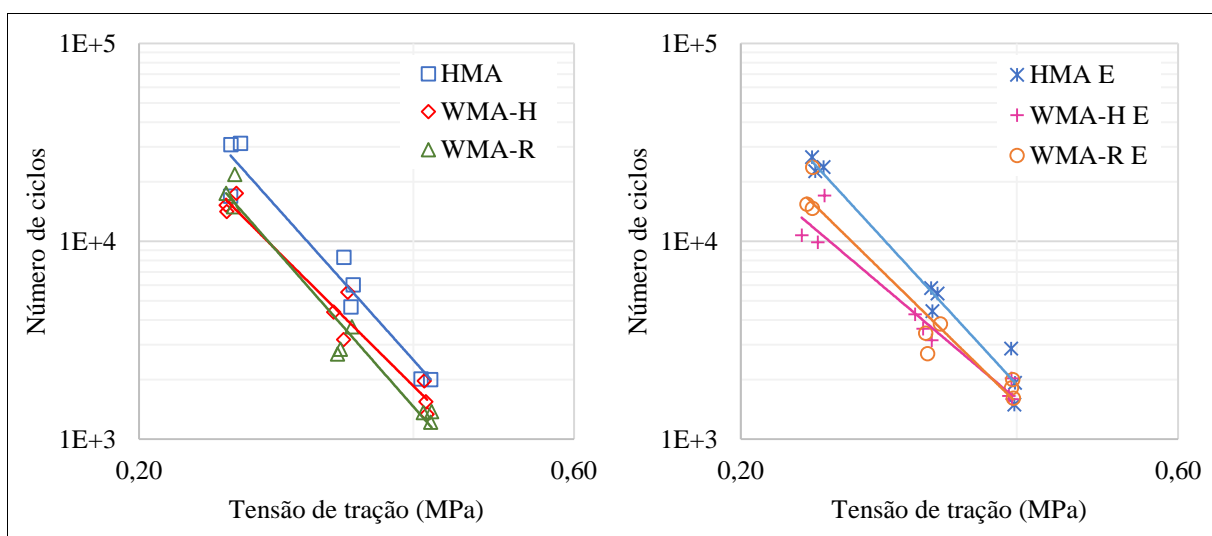


Figura 4.37 – Comparação entre as curvas de fadiga para misturas a quente e mornas com a mesma composição de agregados

Como as misturas com escória apresentaram módulos semelhantes, pode-se dizer que, dentre elas, as misturas quentes apresentaram maior vida de fadiga (resistiram a maiores números de ciclos) e que, a tensões mais altas, as três misturas tenderam a resistir a números próximos de repetições de carga, em especial, as mornas, enquanto que, a tensões mais baixas, a diferença entre elas tende a aumentar. Para as misturas somente com calcário, uma tendência parecida é observada, mas as curvas de WMA-H e WMA-R se aproximaram, dessa vez, em tensões mais baixas. Contudo, na Figura 4.37 observa-se que o distanciamento entre as curvas não é tão grande, o que significa que a diminuição da temperatura de trabalho e a incorporação de aditivos nas misturas mornas não reduziu de forma expressiva sua resistência à fadiga.

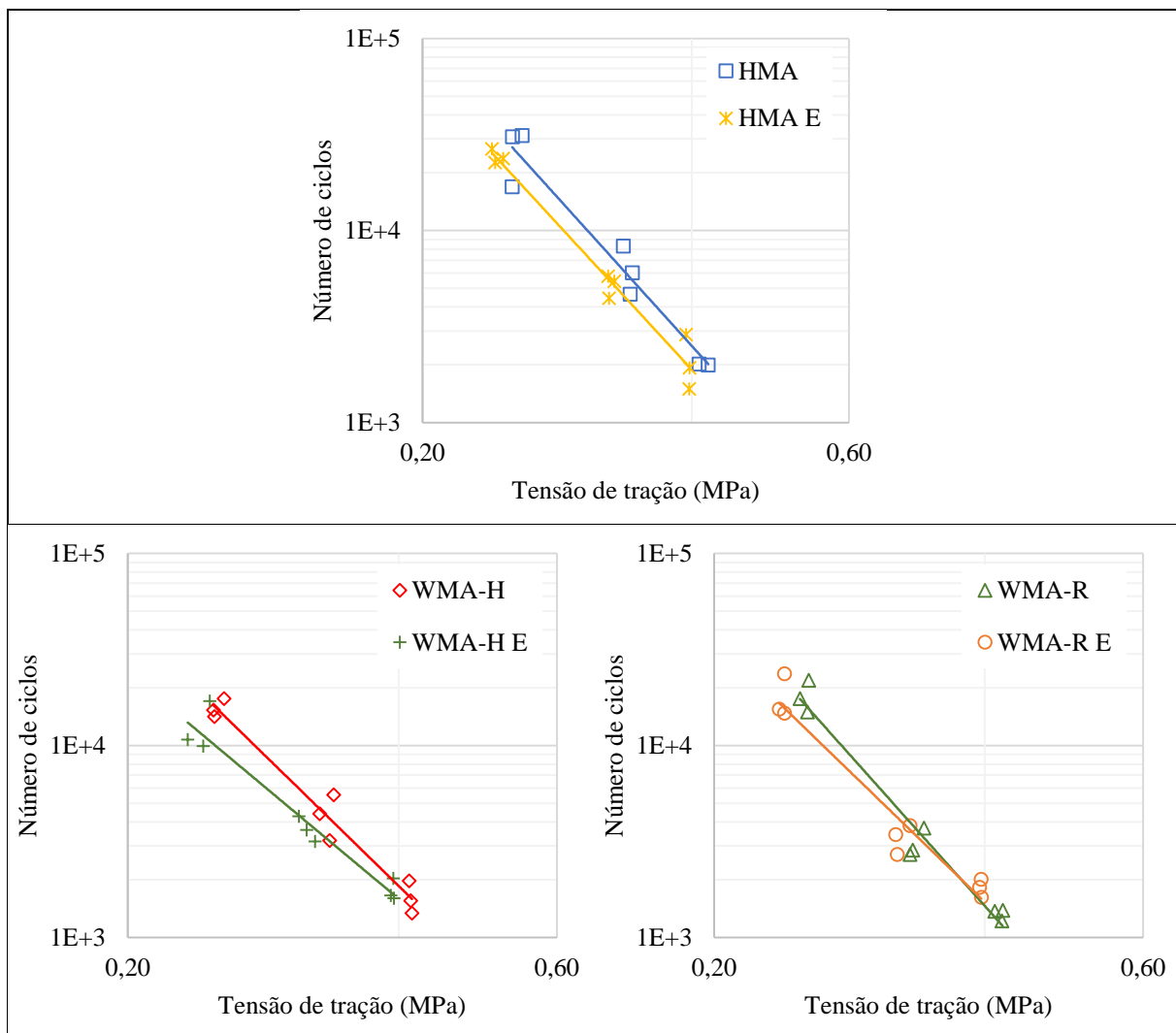


Figura 4.38 – Comparação entre as curvas de fadiga de misturas iguais com composições de agregados diferentes

Já em relação a misturas apenas com composição de agregados distintas, como HMA e HMA E pertencem a um mesmo grupo quanto ao MR, pode-se prever que a mistura somente com calcário apresentaria um melhor desempenho quanto à fadiga para qualquer nível de tensão, já

que ela resistiu a maiores números de ciclos do que as misturas com escória. No entanto, novamente, essa diferença não se mostra significativa a ponto de indicar uma queda relevante de desempenho ao se substituir os agregados graúdos de calcário por escória. Quanto às misturas mornas, a Figura 4.38 indica que há uma tendência de aproximação das curvas a tensões mais altas e de afastamento a tensões mais baixas, além de as misturas com escória se mostrarem um pouco menos resistentes (menores números de ciclos) do que as somente com calcário. No entanto, por essas misturas possuírem módulos diferentes, não devem ser feitas análises de desempenho baseadas apenas nesses dados.

## 5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa visou a analisar o comportamento de misturas asfálticas quentes e mornas produzidas em laboratório com substituições de agregados de calcário por escória de aciaria. Para as misturas mornas foram utilizados dois tipos de aditivos: o HUSIL, que provoca a formação de espuma no asfalto, e o Rediset<sup>®</sup>LQ, que é considerado um produto surfactante. Por meio de ensaios de caracterização dos materiais e análises de propriedades volumétricas e mecânicas das misturas, buscou-se verificar a adequabilidade das mesmas ao uso em revestimentos asfálticos, de modo a incentivar a aplicação das tecnologias WMA e de agregados siderúrgicos na indústria da pavimentação, tornando-a mais compatível com os princípios do desenvolvimento sustentável. A seguir, são apresentadas as principais conclusões decorrentes dos resultados obtidos nesse estudo.

- Os agregados de escória de aciaria LD apresentaram propriedades equivalentes ou superiores ao calcário britado, destacando-se quanto à adesividade ao ligante e à resistência, a forma e a textura dos grãos. Além disso, as partículas de escória exibiram densidade, absorção e porosidade bastante elevadas.
- A escória estudada mostrou-se volumetricamente instável, o que apontou para a necessidade de um processo de cura por hidratação mais controlado e a realização de ensaios específicos de expansibilidade.
- Os aditivos HUSIL e Rediset<sup>®</sup> em diferentes proporções não promoveram alterações expressivas nas propriedades do CAP 50/70. Apesar disso, foi possível perceber que o HUSIL provocou um certo ganho de rigidez e consistência no ligante.
- As curvas de viscosidade do CAP 50/70 puro e com adições de diferentes proporções dos aditivos ficaram bastante próximas umas às outras. No entanto, percebeu-se que o emprego do Rediset<sup>®</sup> provocou uma ligeira redução na viscosidade do ligante. Já em relação ao HUSIL, pode-se considerar que o efeito da formação de espuma devido à incorporação desse aditivo no asfalto não pôde ser medido apropriadamente pelo ensaio de viscosidade.
- Sendo mantido o teor de asfalto, quanto maior a porcentagem de escória introduzida na composição de agregados no lugar do calcário, maior o volume de vazios da mistura, sendo esse efeito ainda mais importante para as substituições nas frações miúdas.
- A mistura quente com agregados graúdos de escória e miúdos de calcário (G64%) mostrou-se interessante por apresentar volumetria adequada, boa estabilidade Marshall, elevada

resistência à tração e alto módulo de resiliência em comparação com a mistura somente com calcário.

- O uso da escória de aciaria nas misturas asfálticas permite a formação de um esqueleto de agregados com melhor intertravamento entre as partículas, o que proporciona às misturas melhor resistência a esforços de cisalhamento.
- As partículas de escória têm maior adesividade passiva ao ligante em comparação com o calcário, resultando em misturas com melhor coesão.
- A incorporação de aditivos fez com que as misturas mantivessem sua compactabilidade mesmo a temperaturas reduzidas.
- Os resultados do estudo de compactação não foram conclusivos quanto à influência de cada uma das diferentes proporções de aditivos e temperaturas de trabalho na compactação e, conseqüentemente, na resistência das misturas. Possivelmente, o uso de uma energia de compactação menor e/ou do compactador giratório permitiria uma melhor distinção entre as misturas.
- Com base não só no que foi verificado na caracterização dos ligantes e no estudo de compactação, mas principalmente em dados da literatura consultada, optou-se por produzir misturas mornas com reduções de 20°C e com adições de 1% de HUSIL e 0,5% de Rediset<sup>®</sup>LQ.
- O ensaio de estabilidade Marshall indicou que as misturas se comportaram de forma semelhante, resistindo a cargas similares. A exceção foi a mistura a quente com agregados graúdos de escória (HMA E), cuja resistência foi significativamente superior às demais.
- Quanto à resistência à tração, as misturas com escória mostraram-se mais resistentes do que as somente com calcário. Já para as misturas mornas foram obtidos menores resultados em comparação com as misturas a quente. A mistura morna com Rediset<sup>®</sup> exibiu resistência ligeiramente maior do que a com HUSIL, mas o desempenho de ambas foi ainda bastante próximo.
- O uso de agregados graúdos de escória aumentou o módulo de resiliência das misturas, especialmente nas mornas. Em comparação com as misturas a quente, as mornas exibiram menor módulo, sendo as misturas com HUSIL um pouco mais rígidas do que as com Rediset<sup>®</sup>.
- O método utilizado para a determinação do dano por umidade induzida foi inadequado para a avaliação das misturas somente com calcário, uma vez que o grau de saturação obtido foi insuficiente. Já para as misturas com escória, foi possível atingir grau de saturação



satisfatório e os resultados indicaram que a mistura quente e ambas as mornas exibiram boa adesividade. O melhor resultado, no entanto, foi observado para a mistura morna com Rediset<sup>®</sup>.

- No ensaio de *creep* estático, verificou-se que as misturas com escória foram mais resistentes a deformações permanentes do que as misturas somente com calcário. Percebeu-se ainda uma tendência de que as misturas mornas sofressem maiores deformações do que as quentes, sendo as diferenças mais expressivas quando a composição de agregados era apenas de calcário. Comparando-se as misturas mornas entre si, pode-se dizer que as misturas com HUSIL foram menos resistentes do que as com Rediset<sup>®</sup>.
- Em relação à fadiga, observou-se que as misturas com escória tenderam a ser menos resistentes do que as misturas com agregados somente de calcário. As misturas mornas tiveram desempenhos similares entre si e resistiram a menores números de ciclos de carregamento do que as quentes.

Apesar de as misturas mornas terem apresentado, no geral, desempenho ligeiramente inferior às quentes, as diferenças entre os resultados exibidos por todas as misturas foram pouco significativas. Isso tornou difícil a indicação de uma mistura que tenha se destacado em relação às outras. Apesar disso, levando em consideração também a questão ambiental, pode-se dizer que a mistura morna com Rediset<sup>®</sup>LQ e agregados de escória de aciaria se mostrou particularmente interessante, uma vez que apresentou desempenho mecânico levemente superior àquelas em que foi utilizado o HUSIL e comparável às misturas à quente. Além disso, o Rediset<sup>®</sup>LQ é um aditivo bastante difundido, de fácil incorporação ao ligante e que proporciona não só uma melhor trabalhabilidade à mistura, mas também uma boa adesividade. No entanto, são necessários estudos mais aprofundados e abrangentes para que as conclusões resultantes dessa pesquisa sejam confirmadas e estendidas a outros tipos de misturas, com diferentes técnicas de WMA e granulometrias, por exemplo, saindo inclusive do âmbito do laboratório e chegando às usinas para aplicações reais em projetos.

## 5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Realizar mais ensaios de caráter reológico, com o uso do DSR, em ligantes com adições de HUSIL e Rediset<sup>®</sup>, e em mástiques compostos por eles e fileres de calcário e escória de aciaria, para o melhor entendimento do mecanismo de funcionamento desses aditivos;
- Estudar a interação química entre os agregados de escória, os aditivos para misturas mornas e o ligante asfáltico;

- Realizar ensaios de expansibilidade na escória de aciaria, pelo método PTM, por exemplo, e, caso necessário, promover a hidratação prévia dos compostos expansivos da escória de aciaria por meio de um período adequado de cura;
- Utilizar o compactador giratório na confecção das amostras e realizar a dosagem das misturas pela metodologia *Superpave*, inclusive para as misturas com escória;
- Estudar de forma mais abrangente as propriedades mecânicas das misturas asfálticas com diferentes frações de escória de aciaria, por meio de ensaios de fadiga e deformação permanente, por exemplo;
- Realizar um estudo de compactação para uma menor energia de compactação ou com o uso do compactador giratório, a fim de verificar mais claramente a influência da temperatura e dos aditivos na trabalhabilidade e compactabilidade da massa asfáltica;
- Promover o envelhecimento a curto prazo das misturas antes da compactação;
- Estudar de forma mais aprofundada o comportamento mecânico das diversas misturas, por meio de outros tipos de ensaios, além da determinação de seus parâmetros reológicos e curvas-mestras;
- Realizar o ensaio de *Flow Number* para a avaliação da resistência a deformações permanentes;
- Analisar o dano por umidade das misturas por meio de métodos já consolidados e normatizados, como o *Lottman* modificado;
- Avaliar as misturas mornas segundo os critérios de recobrimento, compactabilidade, resistência ao dano por umidade e resistência a deformações permanentes da norma AASHTO R 35;
- Realizar análises estruturais para avaliar o desempenho relativo entre misturas quanto à vida de fadiga;
- Desenvolver uma análise de ciclo de vida para misturas mornas com agregados de escória de aciaria, de forma a estabelecer os custos econômicos e ambientais relacionados a essa solução, em comparação com as misturas convencionais, e verificar sua viabilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). NBR 15184: Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2006). NBR 15235: Materiais asfálticos- Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010). NBR 11341: Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. Rio de Janeiro, RJ.
- AHMEDZADE, P. & SENGOZ, B. (2009). Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1–3): 300–305.
- AIREY, G.D. (1997). *Rheological Characteristics of Polymer Modified and Aged Bitumens*. PhD Thesis, University of Nottingham, Nottingham, UK, 256 p.
- AMELIAN, S., MANIAN, M., ABTAHI, S.M. & GOLI, A. (2018). Moisture sensitivity and mechanical performance assessment of warm mix asphalt containing by-product steel slag. *Journal of Cleaner Production*, 176: 329–337.
- AMERI, M., HESAMI, S. & GOLI, H. (2013). Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag. *Construction and Building Materials*, 49: 611–617.
- ANDERSON, R.M., BAUMGARDNER, G., MAY, R. & REINKE, G. (2008). *Engineering Properties, Emissions, and Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies*. Interim Report, NCHRP, USA, 60 p.
- ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2005). Resolução ANP N° 19.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. (2015). ASTM D 7175: Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. USA.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. (2015). ASTM C 128: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. USA.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. (2015). ASTM D 6925: Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Giratory Compactor. USA.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. (2010). ASTM D 4791: Standard Test Method for Flat Particles, Enlarged Particles, or Flat and Enlarged Particles in Coarse Aggregate. USA.

- ASTM - American Society for Testing and Materials. (2011). ASTM D 2041: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. USA.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. (2003). ASTM C 1252: Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading). USA.
- BARTHEL, W., MERCHAND, J.-P. & DEVIVERE. (2003). Warm asphalt mixes by adding Aspha-Min<sup>®</sup> a synthetic zeolite. XXII PIARC World Road Congress, Durban, South Africa, 12 p.
- BENNERT, T. (2012). Workability / Compactability of Different Akzo Nobel Chemical Additives and Dosage Rates. Submitted to: Akzo Nobel Surface Chemistry LLC, Chicago, USA.
- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATI, J. A. P. e SOARES, J. B. (2008). Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. PETROBRAS. ABEDA. Rio de Janeiro, 504 p.
- BUDNY, J. (2012). Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas. Dissertação de Mestrado, UFRJ/ COPPE, Rio de Janeiro, RJ. 137 p.
- CAPITÃO, S.D., PICADO-SANTOS, L.G. & MARTINHO, F. (2012). Pavement engineering materials: review on the use of warm-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 36: 1016–1024.
- CASTELO BRANCO, V.T. (2004). Caracterização de Misturas Asfálticas com uso de Escória de Aciaria como Agregado. Dissertação de Mestrado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 135 p.
- CAVALCANTI, L. S. (2010). Efeito de Alguns Modificadores de Ligantes na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas. Dissertação de mestrado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 196 p.
- CHEN, J.S. & WEI, S.H. (2016). Engineering properties and performance of asphalt mixtures incorporating steel slag. *Construction and Building Materials*, 128: 148–153.
- CHOWDHURY, A. & BUTTON, J.W. (2008). A Review of Warm Mix Asphalt. Technical Report, Texas Transportation Institute, Texas, USA, 75 p.
- CNT. (2016). Anuário CNT do Transporte - Estatísticas consolidadas. Confederação Nacional do Transporte, Brasília, DF, 11 p.
- CROTEAU, J.-M. & TESSIER, B. (2008). Warm mix asphalt paving technologies: a road builder's perspective. Proceedings, 2008 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, 12 p.
- D'ANGELO, J., HARM, E., BARTOSZEK, J., BAUMGARDNER, G., CORRIGAN, M., COWSERT, J., HARMAN, T., JAMSHIDI, M., JONES, W., NEWCOMB, D.,

- PROWELL, B., SINES, R. & YEATON, B. (2008). Warm-Mix Asphalt: European Practice. Technical Report, FHWA, Washington, USA, 68 p.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1994). DNER-ME 089: Agregados - avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, RJ.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1994). DNER-ME 078: Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, RJ.
- DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1994). DNER-ME 117: Mistura betuminosa - determinação da densidade aparente. Rio de Janeiro, RJ.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1995). DNER-ME 043: Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall. Rio de Janeiro, RJ.
- DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1996). DNER-ME 193: Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos - determinação da densidade e massa específica. Rio de Janeiro, RJ.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1998). DNER-ME 035: Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, RJ.
- DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1998). DNER-ME 081: Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, RJ.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1998). DNER-ME 163: Materiais betuminosos - determinação da ductilidade. Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT. (2013). Relatório dos Levantamentos Funcionais das Rodovias Federais. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília, DF, 26 p.
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2006). DNIT 031- ES: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico. Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2010). DNIT 131 - ME: Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola. Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2010). DNIT 135 - ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2010). DNIT 136 - ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2010). DNIT 155 - ME: Material asfáltico – Determinação da penetração. Rio de Janeiro, RJ.

- EAPA. (2014). The Use of Warm Mix Asphalt. Position Paper, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium, 23 p.
- EMERY, J. (1984). Steel slag utilization in asphalt mixes. Canadian Technical Asphalt Association Proceedings, Brampton, Canada, 11 p.
- FAKHRI, M. & AHMADI, A. (2017). Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: a performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 147: 630–638.
- FEITOSA, J.P.M. (2015). Avaliação do Uso de Diferentes Tipos de Cera de Carnaúba como Aditivo para Misturas Mornas. Tese de Doutorado, UFC, Fortaleza, CE, 108 p.
- FERNANDES, D.P. (2010). Estudo de Estabilização Química, Geo-Mecânica e Ambiental das Escórias de Aciaria LD para fins de Lastro Ferroviário em Vias Sinalizados. Dissertação de Mestrado, UFOP, Ouro Preto, MG, 142 p.
- FERREIRA, C.I.G., SILVA, H.M.R.D. & OLIVEIRA, J.R.M. (2009). Avaliação do desempenho de misturas betuminosas temperadas. XV Congresso Ibero-Latino-Americano de Asfalto, CILA, Lisboa, Portugal, 10 p.
- FREITAS, H.B. (2007). Misturas Asfálticas de Módulo Elevado com Uso de Escória de Aciaria como Agregado. Dissertação de Mestrado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 170 p.
- FREITAS, H.B. & MOTTA, L.M.G. (2008). Uso de escória de aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado. *Revista Transportes*, XVI(2): 5–12.
- GEISELER, J. (1996). Use of steelworks slags in Europe. *Waste Management*, 16(1–3): 59–63.
- GOLI, H., HESAMI, S. & AMERI, M. (2017). Laboratory evaluation of damage behavior of warm mix asphalt containing steel slag aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(6): 1–9.
- GONÇALVES, W.M. (2005). Adequação do Processo de Fabricação de Aço LD, Utilizando Ferro-Gusa Líquido com Baixo Teor de Silício. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG, 86 p.
- GOUVEIA, L. T. (2016). Contribuições ao Estudo da Influência de Propriedades de Agregados no Comportamento de Misturas Asfálticas Densas. Tese de Doutorado, USP-EESC, São Carlos, SP, 290 p.
- GROENNINGER, J. & WISTUBA, M.P. (2017). Performance properties of asphalt mixture containing Linz-Donawitz (LD) steel slag. The 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, 319–325.
- GUMIERI, A.G. (2002). Estudo de Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD como Adição em Cimentos. Porto Alegre, RS, 226 p.

- HESAMI, S., AMERI, M., GOLI, H. & AKBARI, A. (2014). Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(8): 745–759.
- HUNT, L. & BOYLE, G.E. (2000). *Steel Slag in Hot Mix Asphalt Concrete*. Report, Oregon Department of Transportation, Salem, USA, 19 p.
- IABr. (2014). *Relatório de Sustentabilidade 2014*. Instituto Aço Brasil, Rio de Janeiro, RJ, 93p.
- IABr. (2016). *Relatório de Sustentabilidade 2016*. Instituto Aço Brasil. Disponível em <<http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>>. Acesso em: março de 2018.
- IABr. (2017). *Anuário Estatístico 2017*. Instituto Aço Brasil, Rio de Janeiro, RJ, 94 p.
- JUCKES, L.M. (2003). The volume stability of modern steelmaking slags. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 112(3): 177–197.
- KANDHAL, P.S. & HOFFMAN, G.L. (1997). Evaluation of steel slag fine aggregate in hot-mix asphalt mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1583: 28–36.
- KRISTJANSDOTTIR, O. (2006). *Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving*. PhD Thesis, University of Washington, Washington, USA, 92.
- LENG, Z., GAMEZ, A. & AL-QADI, I.L. (2014). Mechanical property characterization of warm-mix asphalt prepared with chemical additives. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26: 304–311.
- LUCENA, A.E.F.L., CARVALHO, J.R., MENDONÇA, A.M.G.D., SILVA, J.F.A. & SAMPAIO. (2017). Utilização do óleo de girassol como aditivo redutor de viscosidade de cimentos asfálticos de petróleo. XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transportes da ANPET, Recife, PE, 12 p.
- MACHADO, A.T. (2000). *Estudo Comparativo dos Métodos de Ensaio para Avaliação da Expansibilidade das Escórias de Aciaria*. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, 135 p.
- MARTINI, M. (2015). *Avaliação do Potencial de Expansão de Agregados Siderúrgicos através da Difractometria de Raios X e Método de Rietveld*. Dissertação de Mestrado, EEL-USP, Lorena, SP, 175 p.
- MASOUDI, S., ABTAHI, S.M. & GOLI, A. (2017). Evaluation of electric arc furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging. *Construction and Building Materials*, 135: 260–266.
- MEDINA, J. & MOTTA, L.M.G. (2005). *Mecânica dos Pavimentos*. Editora UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 574 p.

- MELLO, D. (2012). Avaliação da Adição de Evotherm no Comportamento de Misturas Asfálticas em Laboratório e no Desempenho em Campo. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, 261 p.
- MELLO, L.G. (2008). A Teoria do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas. Tese de Doutorado, UnB, Brasília, DF, 263 p.
- MERIGHI, C.F. & SUZUKI, C.Y. (2017). Estudo do comportamento do revestimento de pavimento utilizando mistura asfáltica morna com adição de borracha moída de pneu na SPA-248/055. Revista Transportes, 25(4): 136–146.
- MOTTA, L.M.G., MANSO, G.A., FRITZEN, M.A., VIANNA, Á.A.D., BUDNY, J., MANNARINO, M.C.B. & GUIMARÃES, S. (2012). Avaliação do Comportamento de Dois Tipos de Revestimentos Asfálticos, Dosados Pelo Método SUPERPAVE, Sob Ação de Tráfego Real na Rodovia BR040 – Trecho da Concessionária CONCER. Relatório, Fundação COPPETEC, Rio de Janeiro, RJ, 183 p.
- MOTTA, R.S. (2011). Estudo de Misturas Asfálticas Mornas em Revestimentos de Pavimentos para Redução de Emissão de Poluentes e de Consumo Energético. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, SP, 229 p.
- MOTZ, H. & GEISELER, J. (2001). Products of steel slags an opportunity to save natural resources. Waste Management, 21: 285–293.
- NEWCOMB, D. (2006). An Introduction to Warm-mix Asphalt. Report, National Asphalt Pavement Association, Lanham, USA, 7 p.
- OLIVEIRA, J.A. (2013). Avaliação do Desempenho de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas em Laboratório e em Campo. Dissertação de Mestrado, UFC, Fortaleza, CE, 139 p.
- OTTO, G.G. (2009). Misturas Asfálticas Mornas - Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, 179 p.
- PASSETO, M., BALIELLO, A., GIACOMELLO, G. & PASQUINI, E. (2017). Sustainable solutions for road pavements: a multi-scale characterization of warm mix asphalts containing steel slags. Journal of Cleaner Production, 166: 835–843.
- PASSETO, M. & BALDO, N. (2012). Performance comparative analysis of stone mastic asphalts with electric arc furnace steel slag: a laboratory evaluation. Materials and Structures, 45: 411–424.
- PEDROSA, R.A.A. (2010). Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica do Uso de Agregados de Escória de Aciaria em Concreto Betuminoso Usinado a Quente. Dissertação de Mestrado, UFOP, Ouro Preto, MG, 113 p.
- PROWELL, B.D., HURLEY, G.C. & FRANK, B. (2012). Warm-Mix Asphalt: Best Practices. National Asphalt Pavement Association- NAPA, Lanham, USA, 66p.
- RIVOIRE JR., L. (2014). Avaliação de Misturas Mornas com Emprego de Simulador de Tráfego Linear. Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, RS, 249 p.



- ROHDE, L. (2002). Escória de Aciaria Elétrica em Camadas Granulares de Pavimentos - Estudo Laboratorial. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS, 101 p.
- ROHDE, L., NÚÑEZ, W.P. & CERATTI, J.A.P. (2003). Escória de aciaria elétrica: uma alternativa aos materiais granulares tradicionais. *Revista Transportes*, XI: 13–18.
- RONDÓN, H.A., FERNÁNDEZ, W.D. & VERGARA, O.I. (2014). Mechanical resistance of a chemically-modified warm mix. *Revista Tecnura*, 18: 97–108.
- RONDÓN, H.A., FERNÁNDEZ, W.D. & ZAFRA, C.A. (2016). Behavior of a warm mix asphalt using a chemical additive to foam the asphalt binder. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, (78): 129–138.
- RONDÓN, H.A., HERNÁNDEZ, J.A. & REYES, F.A. (2015). A review of warm mix asphalt technology: technical, economical and environmental aspects. *Ingeniería e Investigación*, 35(3): 5–18.
- RONDÓN, H.A., VERGARA, O.I. & FERNÁNDEZ, W.D. (2017). Comportamiento de una mezcla asfáltica tibia fabricada en una planta de asfalto behavior of a warm mix asphalt made in an asphalt plant. *Ingeniería y Desarrollo. Universidad del Norte*, 35(1): 152–173.
- RUBIO, M.C., MARTÍNEZ, G., BAENA, L. & MORENO, F. (2012). Warm mix asphalt: an overview. *Journal of Cleaner Production*, 24: 76–84.
- SHI, C. (2004). Steel slag - its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16: 230–236.
- SILVEIRA, L.E.M., FILHO SOUSA, A.C., SOARES, J.B. & SANT’ANA, H.B. (2007). Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas pela inserção de zeólitas utilizando cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero. IV PDPETRO, Campinas, SP, 10 p.
- SORLINI, S., SANZENI, A. & RONDI, L. (2012). Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures. *Journal of Hazardous Materials*, 209–210: 84–91.
- SOUZA, E.O. (2007). Escórias de Aciaria e Resíduos de Concretos Refratários em Componentes de Pavimentação. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG, 111 p.
- SOUZA, L.J.S. (2012). Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado com Óleo de Mamona. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, PB, 123 p.
- STROUP-GARDINER, M. & WATTENBERG-KOMAS, T. (2013). Recycled Materials and Byproducts in Highway Applications - Slag Byproducts. NCHRP Synthesis 435, National Academy of Sciences, Washington, USA, 5 vol., 33 p.
- TAVARES, D.S. (2012). Avaliação Laboratorial de Mistura Asfáltica do Tipo SMA com Agregado Siderúrgico. Dissertação de Mestrado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 138p.

- WACHSMUTH, F., GEISELER, J., FIX, W., KOCH, K. & SCHWERDTFEGGER, K. (1981). Contribution to the structure of BOF-slugs and its influence on their volume stability. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 20(3): 279–284.
- WANG, G., WANG, Y. & GAO, Z. (2010). Use of steel slag as a granular material: volume expansion prediction and usability criteria. *Journal of Hazardous Materials*, 184: 555–560.
- WARGHA FILHO, N. (2013). Avaliação da Influência da Redução das Temperaturas de Usinagem e de Compactação no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas. Dissertação de Mestrado, UFC, Fortaleza, CE, 110 p.
- WSDOT. (2015). WSDOT Strategies Regarding Use of Steel Slag Aggregate in Pavements. Report, Washington State Department of Transportation, Washington, USA, 19 p.
- WU, S., XUE, Y., YE, Q. & CHEN, Y. (2007). Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Building and Environment*, 42: 2580–2585.
- YILDIRIM, I.Z. & PREZZI, M. (2011). Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in Civil Engineering*, 2011: 13 p.
- YOUSOFF, N.I.M. (2012). Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Base Bitumens. PhD Thesis, University of Nottingham, Nottingham, UK, 232 p.
- ZEINODDIN, H.S., ABTAHI, S.M., HEJAZI, S.M., BABAMOHAMMADI, S., GOLI, A. & AMUCHI, M. (2016). Design and production of steel slag warm mix asphalt (SSWMA) using an amino-based resin. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 3(3–4): 91–108.
- ZUBARAN, M. & MOTTA, L.M.G. (2015). Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto. 42<sup>a</sup> RAPv - Reunião Anual de Pavimentação e 18<sup>o</sup> ENACOR, Foz do Iguaçu, PR, 18 p.