

**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Centro Tecnológico**  
**Departamento de Engenharia Civil**  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Estudo Reológico de Mástiques com Fíler de Resíduo de Beneficiamento de  
Rochas Ornamentais (RBRO) e Escória de Aciaria (EMA)**

**Renée Lauret Cosme**

Vitória – ES  
Novembro de 2015

**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Centro Tecnológico**  
**Departamento de Engenharia Civil**  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**RENÉE LAURET COSME**

**Estudo Reológico de Mástiques com Fíler de Resíduo de  
Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) e Escória Moída de  
Aciaria (EMA)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Ph.D Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira**

Vitória – ES  
Novembro de 2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)

(Biblioteca Setorial Tecnológica,

Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

Cosme, Renée Lauret, 1986-

C834e      Estudo reológico de mástiques com fíler de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) e escória moída de aciaria (EMA) / Renée Lauret Cosme. – 2015.

119 f. : il.

Orientador: Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Rochas ornamentais – Reaproveitamento. 2. Reologia. 3. Pavimentos de asfalto. 4. Resíduos industriais. 5. Escória. I. Teixeira, Jamilla Emi Sudo Lutif. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

---

**RENÉE LAURET COSME**

**Estudo Reológico de Mástiques com Fíler de Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) e Escória Moída de Aciaria (EMA).**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, Área de Concentração Construção Civil, aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo.

Vitória, 23 de novembro de 2015.

**Prof<sup>a</sup>. Ph.D Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Professora Orientadora

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelos obstáculos enfrentados, pois sabemos que são através deles que seremos moldados e nos tornaremos pessoas melhores. Pela capacitação para superar os desafios nesta jornada. A Ele toda honra, glória e louvor. Pois é só por Ele que toda criação subsiste. Nada tem sentido sem a doce companhia do Pai. É essa a verdadeira lição.

A orientadora Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira, muito obrigado! Acolheu-me como orientando e guiou-me nesta jornada me desafiando a buscar sempre o melhor de mim. Agradeço por todo apoio e confiança depositada. Serei sempre grato.

Agradeço aos professores aos meus professores de pós-graduação, em especial os professores Calmon, Patrício e Geilma, que através de suas aulas de alguma forma auxiliaram no meu amadurecimento e na construção deste trabalho.

Ao departamento de pós-graduação da UFSC, ao prof. Roberto C A Pinto pela aceitação em me receber como aluno especial. Aos professores durante essa minha passagem, Profs Marcos Noronha, Liseane Thives, Eunice Passaglia e Amir Mattar Valente. E aos amigos Marilan, Rafael e José.

Ao Departamento de Engenharia de Transportes pelo convite visita técnica ao grupo de Pesquisa de MisturasAsfálticas do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Em especial ao Professor Jorge Soares e a Professora Sandra Soares Aguiar, e aos amigos feitos no laboratório de ligantes, Janaína e Régis, que em muito contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos de trabalho da Secretaria de Estado de Agricultura do Espírito Santo e da Faculdade Multivix, também os agradeço pelo apoio de sempre.

Aos meus pais que sempre estiveram do meu lado me apoiando. E também meus familiares e amigos.

## RESUMO

São inúmeras as pesquisas fundamentadas nas possibilidades de utilização de subprodutos industriais como materiais alternativos na pavimentação, objetivando assim o desenvolvimento sustentável e redução de custos nas obras rodoviárias.

É conhecido o destaque mundial do Brasil no beneficiamento de rochas ornamentais e da produção de aço, e com essa grande produção há a geração de um volume significativo de resíduos, denominados neste estudo de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) e escória moída de aciaria (EMA).

Esta pesquisa trata da aplicação destes resíduos na pavimentação, mais especificamente como fíler nas misturas asfálticas através do estudo reológico de mástiques produzidos com estes resíduos (RBRO, EMA e 50%EMA+50%RBRO) em diferentes proporções em massa de fíler/betume (0,36, 0,54 e 0,72). Para isto, os materiais foram inicialmente caracterizados físico, químico e mineralogicamente, assim como análise de imagem através de microscopia eletrônica de varredura.

As amostras de mástiques estudadas foram avaliadas reologicamente através de ensaios de varredura de deformação, varredura de frequência (FS) e fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR) e os resultados obtidos foram comparados com resultados de amostras de referência produzidas com o cimento asfáltico de petróleo puro (CAP 50/70).

Pode-se concluir que a utilização dos resíduos melhorou o comportamento reológico do CAP. De uma maneira geral, a adição de resíduos contribuiu para o aumento da rigidez do ligante asfáltico e aferiu maior elasticidade quando comparado ao ligante puro, como observados pelo incremento do módulo de cisalhamento dinâmico e decréscimo do ângulo de fase, obtidos nos ensaios de FS. No ensaio de MSCR foi observado melhores resultados de recuperação e da compliância não-recuperável para a maior parte dos mástiques estudado e das menores sensibilidades à tensão quando comparados como o ligante puro.

**Palavras-chaves:** Comportamento reológico, ligantes asfálticos, resíduo de rochas ornamentais, escória moída de aciaria.

## ABSTRACT

There are numerous research based on the possibilities of use of industrial by-products as alternative materials for paving, thus aiming at sustainable development and cost reduction of roadway constructions.

Brazil is worldly known as an ornamental rock and steel productor, and this great production generates a significant amount of waste, called in this study as ornamental stone residue (OSR) and steel slag residue (SLR).

This research deals with the application of these waste materials in pavement, specifically as filler in hot mix asphalt mixtures by performing a rheological study of mastics produced with these residues (OSR, SLR, and 50%OSR+50%SLR) in different filler/binder proportions (0.36, 0.54 and 0.72). For this, the materials were initially characterized physical, chemical and mineralogically as well as image analysis using scanning electron microscopia.

The studied mastics were evaluated by strain sweep, frequency sweep (FS), and multiple stress creep and recovery (MSCR) tests and the results were compared with the ones obtained for the reference sample produced with pure binder (CAP 50/70).

It can be concluded that the use of waste improved the rheological behavior of asphalt cement material. In general, it was observed that the addition of residues contributed to the increase in the material stiffness as well as provided greater elasticity as compared to pure binder, as observed by the increment in dynamic shear modulus and decrease of phase angle obtained at FS tests. From MSCR testing results, it was observed better results of recovery and creep compliance and a smaller sensitivity to tension to the majority of the studied mastics when compared to pure binder.

**Keywords:** Rheological behavior, Binder, Ornamental stone residue, Steel slag.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Principais estados produtores de rochas ornamentais no Brasil.</i>	21
<i>Figura 2 - Transformações Técnicas e Principais Produtos da Indústria de Rochas.</i>	22
<i>Figura 3 - Tipo de teares utilizados para o desdobramento de blocos em chapas.</i>	22
<i>Figura 4 - Microscopia do resíduo de rochas ornamentais.</i>	25
<i>Figura 5 - Difratogramas de raios X dos resíduos LBRO G e LBRO D.</i>	26
<i>Figura 6 - Micrografias com ampliação de 1000 vezes do (a) LBRO G e (b) LBRO D.</i>	26
<i>Figura 7 - Exemplos de agregados de escória de aciaria de forno elétrico (EAF) e básico a oxigênio (LD).</i>	28
<i>Figura 8 - Resfriamento brusco da escória.</i>	29
<i>Figura 9 - Classificação e separação magnética da escória e partes metálicas.</i>	30
<i>Figura 10 - Picos dos elementos existentes na escória, obtidos com a utilização do Microscópio de Varredura Eletrônica.</i>	32
<i>Figura 11 - Fotos dos grãos da escória, escalas variadas (a) 50 <math>\mu\text{m}</math>, (b) 100 <math>\mu\text{m}</math> e (c) 500 <math>\mu\text{m}</math>.</i>	32
<i>Figura 12 - Difratograma da escória.</i>	33
<i>Figura 13 - Estufa RTFOT.</i>	38
<i>Figura 14 - Vaso de pressão (PAV).</i>	38
<i>Figura 15 - Funcionamento Reômetro de Cisalhamento Dinâmico.</i>	45
<i>Figura 16 - Cálculo do módulo de cisalhamento dinâmico e do ângulo de fase <math>\delta</math> medidos no DSR.</i>	45
<i>Figura 17 - Construção da Curva Mestra.</i>	47
<i>Figura 18 - Curva Mestra do CAPREDUC, com a temperatura de referência em 25 °C.</i>	48
<i>Figura 19 - Representação das tensões e deformações durante a realização do ensaio MSCR.</i>	49
<i>Figura 20 - Localização das deformações <math>\epsilon_0</math>, <math>\epsilon_c</math> e <math>\epsilon_r</math> em um ciclo de fluência e recuperação do ensaio MSCR.</i>	50
<i>Figura 21 - Relação entre as compliâncias não-recuperáveis e os percentuais de recuperação a 3.200 Pa.</i>	52
<i>Figura 22 - Desenho esquemático para comparação entre microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura.</i>	53
<i>Figura 23 - Etapas do Programa Experimental.</i>	55
<i>Figura 24 - Caracterização dos resíduos.</i>	56
<i>Figura 25 - Ensaio de massa específica dos resíduos.</i>	57
<i>Figura 26 - Ensaio de finura pela peneira 200.</i>	57
<i>Figura 27 - Amostra do Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais.</i>	61
<i>Figura 28 - Diâmetro das partículas de RBRO.</i>	61
<i>Figura 29 - Características químicas das partículas de RBRO.</i>	62
<i>Figura 30 - Micrografias do RBRO.</i>	63
<i>Figura 31 - Pontos e regiões analisadas no EDS para o RBRO.</i>	64
<i>Figura 32 - Amostra da Escória de Aciaria.</i>	66
<i>Figura 33 - Diâmetro das partículas de Escória Moída de Aciaria.</i>	66
<i>Figura 34 - Características químicas das partículas de Escória Moída de Aciaria.</i>	67
<i>Figura 35 - Micrografias do EMA.</i>	68
<i>Figura 36 - Pontos e região analisados no EDS para o EMA.</i>	69

Figura 37 - Agitador mecânico de baixo cisalhamento. ....	72
Figura 38 - Dimensões amostras dos mástiques, 25 e 8mm de diâmetro. ....	72
Figura 39- Reômetro rotacional AR 2000ex. ....	73
Figura 40 - Geometria de placas paralelas com peltier. ....	74
Figura 41 - Grau de desempenho sugerido para ligantes asfálticos no Brasil. ....	77
Figura 42 - Curva mestra do $G^*$ a temperatura de referência de 40°C das amostras $f/b = 0,36$ após envelhecimento RTFOT. ....	78
Figura 43 - Curva mestra do $G^*$ a temperatura de referência de 40°C das amostras $f/b = 0,54$ após envelhecimento RTFOT. ....	78
Figura 44 - Curva mestra do $G^*$ a temperatura de referência de 40°C das amostras $f/b = 0,72$ após envelhecimento RTFOT. ....	79
Figura 45 - Curva mestra do $\delta$ a temperatura de referência de 40°C das amostras $f/b = 0,36$ após envelhecimento RTFOT. ....	80
Figura 46 - Curva mestra do $\delta$ a temperatura de referência de 40°C das amostras $f/b = 0,54$ após envelhecimento RTFOT. ....	80
Figura 47 - Curva mestra do $\delta$ a temperatura de referência de 40°C das amostras $f/b = 0,72$ após envelhecimento RTFOT. ....	81
Figura 48 - Curva mestras do $G^*$ a temperatura de referência de 40°C das amostras $f/b = 0,36$ após envelhecimento PAV. ....	83
Figura 49 - Curva mestras do $G^*$ a temperatura de referência de 40°C das amostras $f/b = 0,54$ após envelhecimento PAV. ....	83
Figura 50 - Curva mestras do $G^*$ a temperatura de referência de 40°C das amostras $f/b = 0,72$ após envelhecimento PAV. ....	84
Figura 51 - Curva mestra do $\delta$ a temperatura de referência de 40°C das amostras $f/b = 0,36$ após envelhecimento PAV. ....	84
Figura 52 - Curva mestra do $\delta$ a temperatura de referência de 20°C das amostras $f/b = 0,54$ após envelhecimento PAV. ....	85
Figura 53 - Curva mestra do $\delta$ a temperatura de referência de 40°C das amostras $f/b = 0,72$ após envelhecimento PAV. ....	85
Figura 54 - Módulo cisalhamento dinâmico à 40°C, 0,1Hz após RTFOT. ....	87
Figura 55 - Ângulo de fase 40°C, 0,1Hz após RTFOT. ....	87
Figura 56 - Módulo cisalhamento dinâmico à 40°C, 1Hz após RTFOT. ....	88
Figura 57 - Ângulo de fase à 40°C, 1Hz após RTFOT. ....	88
Figura 58 - Módulo cisalhamento dinâmico à 40°C, 10Hz após RTFOT. ....	89
Figura 59 - Ângulo de fase à 40°C, 10Hz após RTFOT. ....	89
Figura 60 – Percentuais de Recuperação do CAP 50/70 e resíduos para $f/b = 0,36$ . ....	91
Figura 61 – Compliância não-recuperáveis ( $J_{nr}$ ) do CAP 50/70 e dos mástiques para $f/b = 0,36$ . ....	92
Figura 62 - Percentuais de Recuperação do CAP 50/70 e mástiques com $f/b = 0,54$ . ....	94
Figura 63 - Compliância não-recuperáveis ( $J_{nr}$ ) do CAP 50/70 e dos mástiques com $f/b = 0,54$ . ....	96
Figura 64 - Percentuais de Recuperação do CAP 50/70 e mástiques com $f/b = 0,72$ . ....	98
Figura 65 - Compliância não-recuperáveis ( $J_{nr}$ ) do CAP 50/70 e dos mástiques com $f/b = 0,72$ . ....	100

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Principais destinos das exportações brasileiras de rochas (acima de US\$ 10 milhões).</i> .....	20
<i>Tabela 2 - Caracterização química do Resíduo de Corte de Granito (RCG) e Resíduo do Corte de Mármore (RCM) por diversos autores.</i> .....	24
<i>Tabela 3 - Valores médios de Massa Específica Fileres Naturais</i> .....	25
<i>Tabela 4 - Produção brasileira de aço por processo.</i> .....	28
<i>Tabela 5 - Composição da escória produzida pelo processo LD no Brasil.</i> .....	31
<i>Tabela 6 - Comparação entre escória de aciaria, basalto e granito.</i> .....	31
<i>Tabela 7 - Classificação dos ligantes asfálticos quanto ao valor de Jnr de acordo com o critério proposto pelo FHWA.</i> .....	51
<i>Tabela 8 - Valores recomendados para o percentual de recuperação de acordo com o critério proposto pelo FHWA.</i> .....	52
<i>Tabela 9 - Métodos de ensaios para a caracterização física.</i> .....	56
<i>Tabela 10 - Características do CAP 50/70.</i> .....	60
<i>Tabela 11 - Distribuição granulométrica RBRO.</i> .....	61
<i>Tabela 12 - Resultado da análise química semiquantitativa da amostra RBRO.</i> .....	62
<i>Tabela 13 - Resultado da análise química do EDS para o RBRO.</i> .....	65
<i>Tabela 14 - Distribuição granulométrica EMA.</i> .....	66
<i>Tabela 15 - Resultado da análise química semiquantitativa da amostra EMA.</i> .....	67
<i>Tabela 16 - Resultado da análise química do EDS para o EMA.</i> .....	69
<i>Tabela 17 - Percentual de material para formação do mástique.</i> .....	71
<i>Tabela 18 - Composição de material para amostra de 350g.</i> .....	71
<i>Tabela 19 - Características do reômetro rotacional AR 2000ex.</i> .....	73
<i>Tabela 20 - Classificações PG das amostras em estudo.</i> .....	76
<i>Tabela 21 - Valores de módulo cisalhamento complexo (<math>G^*</math>) e ângulo de fase (<math>\delta</math>) para frequências de 0,1, 1,0 e 10Hz a 40°C após envelhecimento RTFOT</i> .....	86
<i>Tabela 22 - Percentuais de Recuperação (R) das amostras com <math>f/b=0,36</math>.</i> .....	90
<i>Tabela 23 - Compliâncias não recuperáveis (Jnr) das amostras com <math>f/b=0,36</math>.</i> .....	91
<i>Tabela 24 - Diferenças percentuais entre as compliâncias não recuperáveis (Jnr,diff) das amostras com <math>f/b=0,36</math>.</i> .....	93
<i>Tabela 25 - Níveis adequados de tráfego ao CAP 50/70 e às formulações com <math>f/b=0,36</math> em função da compliância não-recuperável (Jnr).</i> .....	93
<i>Tabela 26 - Percentuais de Recuperação (R) das amostras com <math>f/b=0,54</math>.</i> .....	94
<i>Tabela 27 - Compliâncias não recuperáveis (Jnr) de amostras com <math>f/b=0,54</math>.</i> .....	95
<i>Tabela 28 - Diferenças percentuais entre as compliâncias não recuperáveis (Jnr,diff) de amostras com <math>f/b=0,54</math>.</i> .....	97
<i>Tabela 29 - Níveis adequados de tráfego ao CAP 50/70 e às formulações com <math>f/b=0,54</math> em função da compliância não-recuperável (Jnr).</i> .....	97
<i>Tabela 30 - Percentuais de Recuperação (R) das amostras com <math>f/b=0,72</math>.</i> .....	98
<i>Tabela 31 - Compliâncias não recuperáveis (Jnr) para amostras com <math>f/b=0,72</math>.</i> .....	99
<i>Tabela 32 - Diferenças percentuais entre as compliâncias não recuperáveis (Jnr,diff) de amostras com <math>f/b=0,72</math>.</i> .....	101

*Tabela 33 - Níveis adequados de tráfego ao CAP 50/70 e às formulações com  $f/b=0,72$  em função da  
compliance não-recuperável ( $J_{nr}$ ) ..... 101*

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ABIROCHAS - Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais  
CA - Concreto Asfáltico  
CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo  
DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagens  
DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes  
DRX - Difração de raios X  
DSR - Dynamic Shear Rheometer  
EDS - Energia dispersiva de raios X  
IEMA - Instituto Estadual de meio ambiente e recursos hídricos  
LD - Linz-Donawitz  
LEMAC - Laboratório de ensaios em materiais de construção  
MEV - Microscópio eletrônico de varredura  
MSCR - Multiple Stress Creep and Recovery  
PSST - Princípio da Superposição Tempo-Temperatura  
RT- Resistência a tração  
SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial  
TC - Temperatura de Compactação  
TU - Temperatura de Usinagem  
UFES – Universidade Federal do Espírito Santo  
WLF - Williams-Landel-Ferry

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>16</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 HIPÓTESE .....	17
1.2 OBJETIVOS .....	18
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	18
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	18
1.3 <i>Estrutura do trabalho</i> .....	18
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>20</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>20</b>
2.1 RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS (RBRO) .....	20
2.2.1 <i>Contextualização e produção do RBRO</i> .....	20
2.1.2. <i>Características químicas, físicas e mineralógicas do RBRO</i> .....	23
2.1.3 <i>Estudos e aplicações do RBRO</i> .....	27
2.2 CONTEXTUALIZAÇÃO E PRODUÇÃO DA ESCÓRIA .....	27
2.2.1. <i>Características químicas, físicas e mineralógicas de Escórias de Aciaria</i> ..	30
2.2.2 <i>Estudos e aplicações das escórias</i> .....	33
2.2.3. <i>Expansibilidade da escória</i> .....	35
2.3 MÁSTIQUES ASFÁLTICOS .....	36
2.3.1 <i>Cimento Asfáltico de Petróleo</i> .....	36
2.3.2 <i>Fíler em Concreto Asfáltico</i> .....	39
2.3.3 <i>Características dos Mástiques</i> .....	39
2.3.4. <i>Influência do fíler no comportamento reológico de mástiques</i> .....	42
2.4 CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE MASTÍQUES .....	43
2.4.1 <i>Ensaio de Cisalhamento Dinâmico</i> .....	44
2.4.2 <i>Curva Mestra</i> .....	46
2.4.3 <i>Fluência e Recuperação sob Tensão Múltipla (MSCR)</i> .....	49
2.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL UTILIZANDO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV) .....	52
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>55</b>
<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>55</b>
3.1 MATRIZ EXPERIMENTAL E VARIÁVEIS DA PESQUISA .....	55
3.1.1. <i>Caracterização dos Resíduos</i> .....	55
3.1.2 <i>Variáveis da pesquisa</i> .....	59

3.2 MATERIAIS .....	59
3.2.1 Cimento asfáltico de petróleo (CAP) .....	59
3.2.2 Resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) .....	60
3.2.3 Escória moída de aciaria (EMA) .....	65
3.3. MÉTODOS .....	70
3.3.1 Metodologia de mistura para a fabricação dos mastiques .....	70
3.3.2 Envelhecimento dos Mástique .....	72
3.3.3 Ensaios Reológicos .....	73
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>76</b>
<b>RESULTADOS .....</b>	<b>76</b>
4.1. DETERMINAÇÃO DO GRAU DE DESEMPENHO DAS AMOSTRAS (PG) .....	76
4.2. CURVAS MESTRAS DO MÓDULO DE CISALHAMENTO DINÂMICO ( $G^*$ ) E ÂNGULO DE FASE ( $\Delta$ ) .....	77
4.2.1 Comportamento reológico após envelhecimento RTFOT .....	77
4.2.2 Comportamento reológico após envelhecimento PAV .....	82
4.2.3 Análise Pontual dos Parâmetros Reológicos nas Frequências relacionadas ao Tráfego Lento (0,1 Hz), Médio (1 Hz) e Rápido (10Hz) .....	86
4.3 RESULTADOS DE FLUÊNCIA E RECUPERAÇÃO (MSCR) .....	90
4.3.1 Resultados de fluência e recuperação para amostras com $f/b=0,36$ .....	90
4.3.2 Resultados de fluência e recuperação para amostras com $f/b=0,54$ .....	94
4.3.3 Resultados de fluência e recuperação para amostras com $f/b=0,72$ .....	98
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>102</b>
<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>102</b>
5.1 COM RELAÇÃO À CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA, MINERALÓGICA E MICROESTRUTURAL .....	102
5.2 COM RELAÇÃO AO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DOS MASTIQUES .....	102
5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	104
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>105</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Sabe-se que o Brasil possui uma imensa quantidade de riquezas minerais com grande potencial exportador, destacando-se, o setor de rochas ornamentais e mineração. O país ocupa a 8º colocação no ranking mundial de exportação de blocos e o 5º em exportação de rochas ornamentais acabadas e, atualmente, o setor de rochas no país movimentava cerca de 2,1 bilhões de dólares por ano. O Espírito Santo é referência mundial na produção de mármore e granito, sendo líder absoluto na produção nacional de rochas, apresentando um potencial geológico imensurável sendo responsável por 50% da produção de todo o mercado nacional e 65% das exportações brasileiras. Com cerca de 900 teares em operação no Estado, o que representa 69% dos teares instalados no Brasil, o Espírito Santo é o maior produtor, processador e exportador de rochas ornamentais do Brasil, tendo também a maior reserva de mármore do país (SINDIROCHAS-ES, 2011).

Já se tratando da indústria do aço, o país em 2013 teve uma produção de cerca de 34,5 milhões de toneladas de aço bruto, tornando-se o 17º exportador mundial de aço (exportações diretas), 6º maior a exportar líquido de aço e com um saldo comercial de US\$ 1,3 bilhão, segundo o Instituto Aço Brasil (IAB, 2014). O Estado possui uma produção de 7,5 milhões de toneladas de aço/ano, o que corresponde a 3% do volume global comercializado de placas de aço e ainda é o 3º maior produtor brasileiro de aços planos laminados segundo a siderúrgica ArcelorMittal Tubarão (2014).

Diante deste cenário, e em contrapartida aos benefícios econômicos de suas atividades, as indústrias de rochas ornamentais e produção de aço no estado Espírito Santo têm gerado um grande volume de resíduos durante o processo de extração e corte de rochas ornamentais e na produção do aço.

Os rejeitos produzidos pela extração das rochas em sua grande maioria são depositados em lagoas de decantação e aterros provocando impacto ambiental negativo no meio ambiente. Enquanto que o rejeito gerado pela produção de aço, de acordo com o Laboratório de Reciclagem, Tratamento de Resíduos e Metalurgia Extrativa da Universidade de São Paulo, a escória bruta, subproduto gerado durante a produção do aço, tem cerca de 30% da produção brasileira e 20% da produção mundial não reaproveitada em 2008, tendo como destino extensas áreas dos parques industriais.

O Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR, 1988) informa que cada tonelada de aço produzido gera, aproximadamente, de 120 a 160 kg de escória de aciaria. Assim, pode-

se estimar a geração de 14,4 milhões de toneladas de escória LD (Linz-Donawitz) de aciaria no Estado do Espírito Santo no ano de 2008. Já o beneficiamento primário de rochas ornamentais, de acordo com Reis (2008), através do processo de corte e serragem e lustro de chapas dessas rochas gera cerca de 1,8 milhão de tonelada de resíduo por ano.

A possibilidade de redução do custo de produção e da degradação ambiental causada pela extração de materiais de jazidas, aliada às significativas quantidades de resíduos gerados pelo beneficiamento de rochas ornamentais e produção de aço anualmente, tem estimulado várias pesquisas sobre a utilização de seus rejeitos para diversas finalidades.

Alguns estudos apontam o reaproveitamento destes rejeitos como material alternativo em várias áreas e aplicações, tais como agregados tanto em misturas asfálticas (SAINT MARTIN *et al.*, 2008), (LANZELLOTTI *et al.*, 2005) e (CASTELO BRANCO, 2004), como em tratamento superficial (ROCHA, 2011), em misturas de módulo elevado (FREITAS, 2007), em base (MARCACCINI, 2010), bloco intertravado (MOURA *et al.*, 2006).

O uso mais significativo das escórias de aciaria no Brasil é como material de base e sub-base, porém, ainda limitada em relação ao volume disponível deste agregado siderúrgico, devido ao potencial expansivo quando em contato com a água, problema este que será discutido no item 3.2.

Apesar do número cada vez mais crescente de estudos que visam incorporar os resíduos nas misturas asfálticas, observa-se que a maior parte dessas pesquisas foca na análise do comportamento mecânico de concretos asfálticos. No entanto, muitas pesquisas têm feito análises de ensaios reológicos de constituintes de misturas asfálticas (mástiques e matriz de agregados finos) para tentar compreender os fenômenos que ocorrem nestas escalas menores de análise.

## **1.1 Hipótese**

É possível empregar o resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) e a escória moída de aciaria (EMA) como fíleres em mástiques de forma a manter ou melhorar o desempenho do ligante asfáltico com relação a suas propriedades reológicas?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Verificar o efeito da incorporação de fíleres de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais e escória de aciaria nas propriedades reológicas de mástiques produzidos com diferentes proporções fíler/betume.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral dessa pesquisa foram definidos os objetivos específicos apresentados a seguir:

- Analisar se a adição de fíler de resíduos altera significativamente a viscosidade das amostras dos mástiques estudados e conseqüentemente as temperaturas de mistura e usinagem através da realização de ensaios de viscosidade Brookfield e método Casola;
- Verificar se as alterações nas propriedades reológicas (módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ )) dos mástiques com adição de resíduos em diferentes proporções fíler/betume diminuem a susceptibilidade à deformação permanente dos mástiques estudados através da análise das propriedades viscoelásticas (módulo de cisalhamento dinâmico,  $G^*$ , e ângulo de fase,  $\delta$ ) obtidas após o ensaio de varredura de frequência no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR);
- Verificar se as propriedades obtidas no ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR) indicam uma menor susceptibilidade a deformação permanente dos mástiques produzidos com adição de resíduo em comparação ao ligante puro;
- Verificar se a microestrutura das partículas dos resíduos adicionados nos mástiques pode afetar o desempenho dos mástiques através da análise de imagens obtidas no equipamento Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV);
- Verificar a influência dos parâmetros reológicos dos mástiques com adição dos resíduos com a trabalhabilidade, grau de desempenho e resistência à deformação permanente.

## **1.3 Estrutura do trabalho**

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, além das referências bibliográficas e dos apêndices. A seguir é apresentada uma descrição sucinta do conteúdo de cada um dos capítulos.

O Capítulo 1 é introdutório, contendo a justificativa e a importância do tema escolhido para a pesquisa, além dos objetivos do estudo e também a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 é destinado à revisão bibliográfica, apresentando o contexto e a avaliação das propriedades reológicas com adições minerais, tais como, viscosidade, temperatura de usinagem e compactação, ângulo de fase ( $\delta$ ), módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e os resultados alcançados nessas pesquisas utilizando esses tipos de resíduos em mástiques ou em misturas asfálticas.

O Capítulo 3 explica a metodologia inerente ao programa experimental, descrevendo as variáveis envolvidas na pesquisa, os materiais empregados e sua caracterização, incluindo o método de preparo do resíduo e os procedimentos adotados para confecção das amostras. Também constam neste capítulo as dosagens e os teores de fíleres adotados para os mástiques estudados, além da obtenção das imagens para análise microestrutural dos mesmos.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos ensaios explicitados na matriz experimental, discutidos com base na revisão bibliográfica e nos comparativos de acordo com os requisitos de cada propriedade estudada. As imagens da microscopia também são apresentadas para uma análise microestrutural dos mástiques, buscando identificar elementos para corroborar alguns destes resultados.

O Capítulo 5 contém as principais conclusões obtidas com esta pesquisa quanto aos aspectos estudados e ainda algumas sugestões para trabalhos futuros baseados nas lacunas encontradas.

Por fim, são relacionadas as referências bibliográficas utilizadas nesta dissertação.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo possui o embasamento teórico que deu origem a esta pesquisa realizado com base nas publicações que fundamentam o tema e auxiliaram no entendimento das principais questões envolvidas. Desenvolvido por meio de revisão bibliográfica em fontes nacionais e internacionais, este referencial teórico aborda os conceitos fundamentais utilizados nesta pesquisa bem como os principais estudos sobre utilização de adições em mástiques asfálticos e/ou em misturas asfálticas completas.

#### 2.1 Resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO)

##### 2.2.1 Contextualização e produção do RBRO

As rochas ornamentais são produto da extração de blocos de maciços rochosos e matações transformados em placas, cortadas, beneficiadas e polidas conforme a necessidade de aplicação (MORAES, 2006).

O Brasil se tornou o 5º maior exportador de rochas ornamentais acabadas, o setor movimentou no país 1,06 bilhão de dólares no ano de 2012, mostrado na Tabela 1.

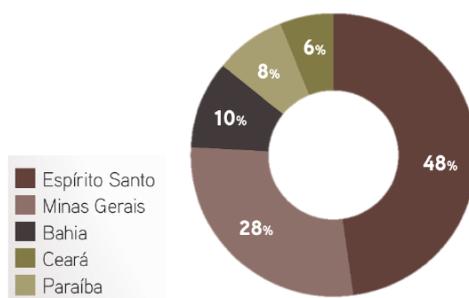
**Tabela 1 – Principais destinos das exportações brasileiras de rochas (acima de US\$ 10 milhões).**

12 PRINCIPAIS PAÍSES	ANO DE 2011		11 PRINCIPAIS PAÍSES	ANO DE 2012	
	US\$ 1000	TONELADAS		US\$ 1000	TONELADAS
EUA	506.688,70	605.717,48	EUA	577.766,77	709.391,52
CHINA	141.595,42	766.176,51	CHINA	146.614,57	780.608,89
ITÁLIA	74.355,54	236.679,88	ITÁLIA	59.424,46	178.650,41
CANADÁ	40.104,27	38.541,48	CANADÁ	42.931,41	40.462,73
MÉXICO	20.697,64	29.281,29	MÉXICO	23.223,04	32.430,78
TAIWAN	17.414,38	80.283,02	TAIWAN	20.593,03	104.039,85
ALEMANHA	16.089,89	32.329,23	VENEZUELA	16.555,68	24.223,20
REINO UNIDO	15.026,42	34.711,49	REINO UNIDO	15.293,00	34.478,64
HONG KONG	14.244,09	58.934,80	ALEMANHA	14.525,88	28.504,92
VENEZUELA	13.601,02	20.724,51	ESPANHA	10.346,73	37.707,96
ESPANHA	12.203,90	34.856,29	COLÔMBIA	10.167,99	16.060,27
BÉLGICA	10.547,78	31.805,96			
Subtotal principais Países	<b>882.569,05</b>	<b>1.970.041,94</b>		<b>937.442,56</b>	<b>1.986.559,17</b>
Total Exportações Brasileiras	<b>999.803,96</b>	<b>2.190.055,45</b>		<b>1.060.415,86</b>	<b>2.237.150,44</b>
Participação Principais	<b>88,3%</b>	<b>89,9%</b>		<b>88,4%</b>	<b>88,8%</b>

Fonte: ABIROCHAS, 2012.

O Estado do Espírito Santo é considerado como o principal minerador de rochas ornamentais como pode ser observado na Figura 1, respondendo por cerca de 48% da produção brasileira e concentrando 60% da capacidade industrial instalada para beneficiamento de blocos. Destaca-se paralelamente o estado de Minas Gerais como importante pólo de lavra e produção diversificada (BRASIL, 2009).

**Figura 1 - Principais estados produtores de rochas ornamentais no Brasil.**



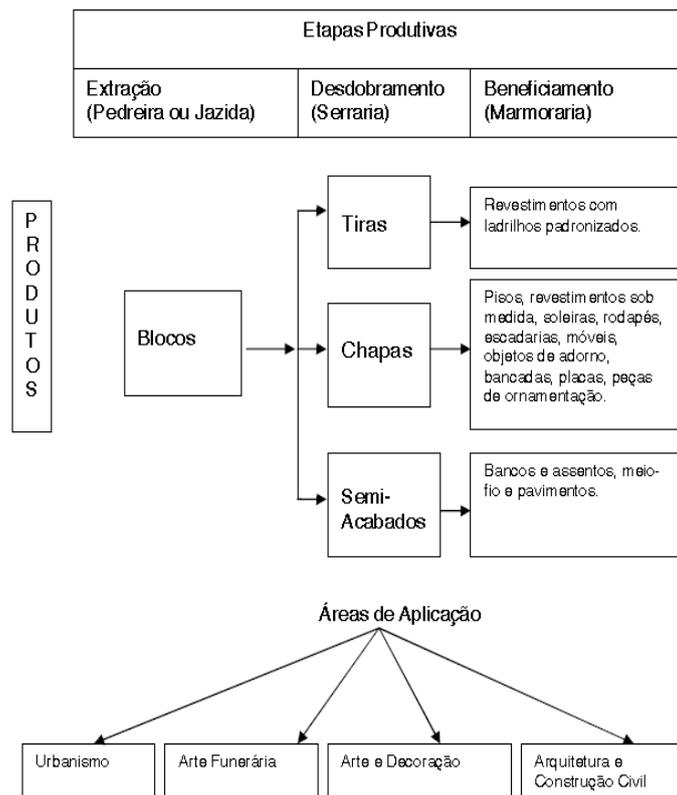
Fonte: Bahia, 2012.

Ainda, o Estado possui cerca de 900 teares em operação, o que representa em torno de 69% dos teares instalados no Brasil. A maioria desses teares está localizada na cidade de Cachoeiro do Itapemirim (ABIROCHAS, 2012).

O processamento das rochas ornamentais divide-se em três etapas: extração dos blocos nas lavras, desdobramento e beneficiamento nas serrarias. A extração é a primeira fase da produção de rochas ornamentais e consiste em remover material útil ou economicamente aproveitável de maciços rochosos ou matacões. Na lavra, são obtidos blocos prismáticos de dimensões diversas, com volume variando de 5 m<sup>3</sup> a 10 m<sup>3</sup> (REIS; SOUZA, 2003). O sistema de desdobramento dos blocos em chapas se dá através do uso de teares e cerca de 25 a 30% do bloco é transformado em pó (FREIRE e MOTA, 1995; GONÇALVES, 2000; GONÇALVES e MOURA, 2002; MOTHE FILHO *et al.*, 2005) que misturado a água geram os resíduos.

Na Figura 2 apresentam-se as principais transformações técnicas pelas quais passam as rochas ornamentais, da matéria prima ao produto final comercializado. O sistema de beneficiamento dos blocos de rochas ornamentais inicia-se com o desdobramento que é o processo de transformação dos blocos em chapas ou placas semiacabadas, com espessuras que variam de 1 a 3 cm utilizando máquinas denominadas teares que, em geral, podem ser de dois tipos: de lâminas metálicas ou de fios diamantados.

**Figura 2 - Transformações Técnicas e Principais Produtos da Indústria de Rochas.**



Fonte: Villaschi Filho e Pinto, 2000 *apud* Spínola (2003).

O sistema de beneficiamento dos blocos de rochas ornamentais inicia-se com o desdobramento que é o processo de transformação dos blocos em chapas ou placas semiacabadas, com espessuras que variam de 1 a 3 cm utilizando máquinas denominadas teares que, em geral, podem ser de dois tipos: de lâminas metálicas ou de fios diamantados, como ilustrado na Figura 3.

**Figura 3 - Tipo de teares utilizados para o desdobramento de blocos em chapas.**



Fonte: Barros, 2006.

Em teares que usam fios diamantados, o resíduo é gerado durante o desdobramento do bloco em chapas e é composto de pó de rocha e água, e em teares que utilizam lâminas metálicas, além da água e do pó de pedra, o resíduo constitui-se de cal (atua como

emulsificante que reduz a corrosividade a que a granalha e as lâminas de corte estão expostas no processo industrial), granalha (geralmente composto maciçamente por Fe, auxilia no corte dos blocos, elevando o coeficiente de atrito das lâminas e acelerando todo o processo de desdobramento) e fragmentos metálicos provenientes do desgaste das lâminas, formando assim a lama, denominado pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente do Espírito Santo e Recurso Hídricos (IEMA-ES) como Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO), cujo destino tem causado grandes problemas ambientais, principalmente pela destinação inapropriada em rios.

O volume de resíduo gerado pelo beneficiamento de rochas ornamentais é bastante significativo, porém, existe uma oscilação neste quantitativo, pois dependem da demanda do mercado consumidor. Segundo Calmon e Silva (2006), durante o processo de serragem em teares convencionais, 25% a 30% do bloco são transformados em pó, sabendo que a diminuição dessa perda depende diretamente da melhoria da tecnologia de corte, sendo este percentual reduzido a 20% nos teares de fios diamantados.

Dados da ABIROCHAS (2013) apontam um montante relativo aos rejeitos de processamento de 41% da produção de rochas ornamentais, totalizando em 2012 para a produção brasileira de 9,3 milhões de toneladas de rochas, um total de 3,35 milhões de toneladas de resíduo, considerando aqui os resíduos desde a extração até o esquadrejamento das peças.

### **2.1.2. Características químicas, físicas e mineralógicas do RBRO**

Para sua viabilização técnica, é necessário primeiramente que o resíduo seja caracterizado física, química e ambientalmente. De acordo com sua composição é possível classificar as rochas ígneas em três tipos em função do teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ): >65% rocha ácida, 65 - 52% rocha intermediária, 52 - 45% rocha básica e < 45% ultrabásica. A Tabela 2 apresenta a caracterização química de amostras de resíduo de corte de granito (RCG) e mármore (RCM) estudados por diferentes autores. Para os RCG, percebe-se que as rochas dos estudos de Calmon *et al.* (1997) e Gonçalves (2000) podem ser classificadas como rochas intermediárias e a rocha do estudo de Moreira *et al.* (2003) pode ser classificada com ácida. As rochas calcárias, no entanto, apresentam uma característica ultrabásica, com teores inferiores a 45% de  $\text{SiO}_2$ . A acidez é uma característica inerente e intrínseca seja para o ligante como para a partícula moída da rocha (BARRA *et al.*, 2013).

A caracterização química é importante, ela irá influenciar na adesividade do fíler mineral com o cimento asfáltico.

**Tabela 2 - Caracterização química do Resíduo de Corte de Granito (RCG) e Resíduo do Corte de Mármore (RCM) por diversos autores.**

Teor (%)	RCG			RCM	
	Calmon <i>et al.</i>	Gonçalves	Moreira <i>et al.</i>	Almeida <i>et al.</i>	Queiroz <i>et al.</i>
	(1997)	(2000)	(2003)	(2015)	(2014)
SiO <sub>2</sub>	59,95	59,62	65,95	0,9	5,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,05	9,49	7,89	-	0,34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,28	12,77	12,84	-	0,4
CaO	6,51	4,83	3,01	52,4	48,5
MgO	3,25	1,96	1,47	9,62	-
K <sub>2</sub> O	4,48	5,3	4,19	0,58	-
TiO <sub>2</sub>	0,92	---	0,93	-	-
SO <sub>3</sub>	---	0,03	---	0,4	-
Na <sub>2</sub> O	3,39	2,72	2,39	-	-
Perda ao Fogo (%)	4,74	1,92	1,33	36	-

Fonte: Produção do autor.

A adesividade é função da composição e da estrutura dos minerais, sendo que os agregados podem apresentar fracas cargas eletrostáticas, podendo essas serem positivas e negativas, de acordo com sua natureza:

- agregados eletronegativos (ácidos): granitos, gnaisses, areias quartozas etc;
- agregados eletropositivos (alcalinos): rochas calcárias, basalto, diabásio, etc.

O alto teor de sílica na composição do RCG apresentado pelos autores acima deve ser visto com preocupação caso estes materiais sejam aplicados em misturas asfálticas, pois normalmente tornam a superfície do agregado mais ácida, prejudicando o balanceamento de cargas elétricas com os componentes do asfalto (YOON e TARRER, 1988), prejudicando na adesividade ou na interação química com a maioria dos asfaltos.

Já o composto CaO, por exemplo, é conhecido por melhorar na adesividade tendo em vista que reage com os Ácidos Naftênicos dos CAP resultando em um composto denominado Naftanato de Cálcio, resultando em uma espécie de sal insolúvel na água, que vai constituir uma ligação agregado/CAP insensível à água, desenvolvendo a adesividade ativa (SANTANA, 1992).

Barra (2005) explica que a eficiência do calcário em sua forma carbonatada é contestada, seja calcítico (CaCO<sub>3</sub>) ou dolomítico (Ca, Mg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), na questão de melhorador de adesividade.

Foi observado uma má adesividade desses tipos de calcários junto às emulsões asfálticas catiônicas (EAC), tendo variado de -10mv a -15mv, pois as moléculas de (Ca<sup>2+</sup>) foram solubilizadas pela água e as de (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub><sup>-</sup> deixaram a superfície do

agregado eletronegativa, o que resultou em um valor negativo do Potencial Zeta (PARANHOS *et al.*, 1990).

Nestes casos, o fator principal que pode prejudicar uma adesividade melhor na interface agregado/CAP, seria o percentual destes elementos químicos na composição das rochas calcárias, mais especificamente, do  $(CO_3)_2$ - e de impurezas como a Sílica ( $SiO_2$ ).

Quanto à caracterização física, Gonçalves (2000) e Calmon *et al.* (1997) apresentaram, respectivamente, uma massa específica do resíduo de  $2,78g/cm^3$  e  $2,67g/cm^3$ . Na caracterização granulométrica, Calmon *et al.* (1997) constataram que o resíduo é constituído por partículas irregulares e diâmetro variável dos grãos, na faixa de  $0,8\mu m$  a  $25\mu m$ . Já Gonçalves (2000), buscando uma granulometria ótima para viabilizar a utilização do RBRO como adição em concretos, realizou a moagem de amostras do resíduo em diferentes tempos, chegando a diâmetros na faixa de  $3,92\mu m$  a  $6,74\mu m$ .

Os principais fíleres naturais utilizados em misturas asfálticas apresentam valores similares, Tabela 3, o que indica uma possível utilização do RCG quanto a essa caracterização.

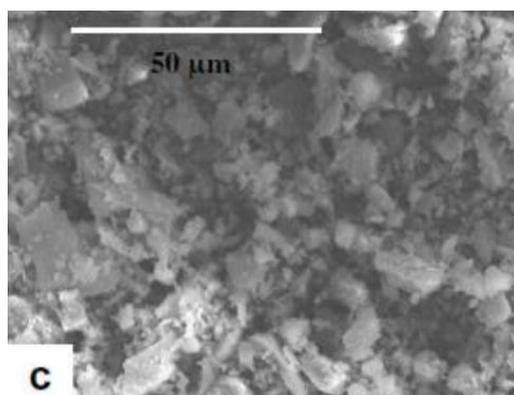
**Tabela 3 - Valores médios de Massa Específica Fíleres Naturais**

MATERIAL	MASSA ESPECÍFICA ( $g/cm^3$ )
Cimento Portland	3,030
Calcário	2,749
Cal Cálca	2,350

Fonte: Pinnila (1965)

Alyamaç e Ince (2009), Colangelo, Marroccoli e Cioffi (2010) e Mármol *et al.* (2010) apresentam imagens microscópicas do resíduo utilizado e afirmam que a alta superfície específica pode ser justificada não somente pela baixa granulometria, mas também pela irregularidade dos grãos, conforme a Figura 4 publicada por Mármol *et al.* (2010).

**Figura 4 - Microscopia do resíduo de rochas ornamentais.**

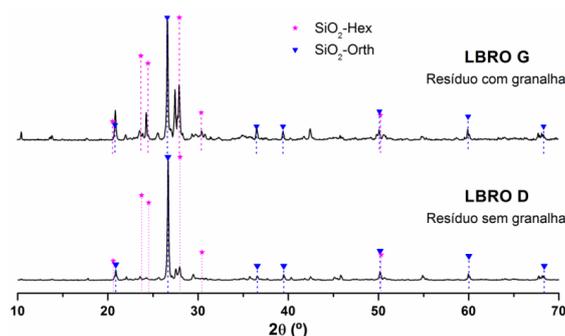


Fonte: Mármol *et al.* (2010, p.619).

A forma, porosidade e a textura das partículas, garantem uma firme adesão do filme do ligante asfáltico com a superfície das partículas, o que lhe conferem um endurecimento maior do que o ligante puro (Barra *et al.*, 2013)

Uliana (2014) caracterizou a lama do beneficiamento de rochas ornamentais, com granalha (LBRO G) e sem granalha (LBRO D) obtido de teares que utilização fio diamantados, para aplicação do resíduo como pozolana em matrizes cimentícias. Foram analisadas as fases morfológicas presentes nos resíduos através difratogramas de raios X com resultados apresentados na Figura 5 onde mostram a presença de sílica (SiO<sub>2</sub>) sob as formações cristalinas hexagonal e ortorrômbica. De maneira geral, é possível identificar picos bem definidos, característica típica de compostos cristalinos quimicamente estáveis e, portanto, com baixa possibilidade de atividade reativa e consequentemente pozolânica.

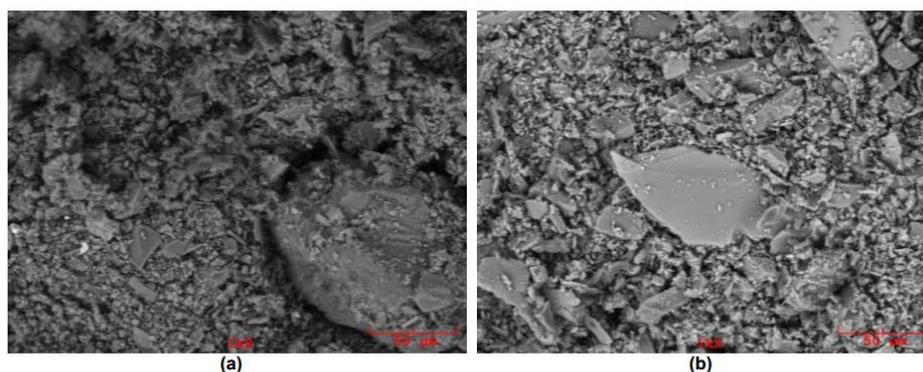
**Figura 5 - Difratogramas de raios X dos resíduos LBRO G e LBRO D.**



Fonte: Uliana (2014).

A forma dos grãos dos resíduos estudados por Uliana (2014) estão apresentadas na Figura 6 que mostra que os grãos não apresentam uma forma definida possuindo, em geral, um formato anguloso devido ao processo de serragem das rochas, com grãos de dimensão entre 0,8 a 25  $\mu\text{m}$ , e alguns um pouco maiores na ordem dos 60  $\mu\text{m}$ .

**Figura 6 - Micrografias com ampliação de 1000 vezes do (a) LBRO G e (b) LBRO D.**



Fonte: Uliana (2014).

### 2.1.3 Estudos e aplicações do RBRO

Com a crescente demanda de novos compostos que venham a se incorporar ou substituir agregados ou adições a fim de melhorar as propriedades físicas e químicas dos materiais, o resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais tem demonstrado bom desempenho em várias aplicações da engenharia, por exemplo:

- Na produção de agregados para a construção de estradas - É viável tecnicamente a utilização do resíduo como fíler em concreto betuminoso, preenchendo vazios entre os agregados e melhorando o desempenho sem aumento no teor de asfalto (SOUZA; RODRIGUES; NETO, 2005; KARASBAHIN; TERZI, 2007; RUBIO et al., 2010; AKBULUT et al., 2012; GOTTARDI; CALMON; TEIXEIRA, 2013) e também como substituto de agregados naturais na mistura betuminosa (MORENO; RUBIO; ECHEVARRIA, 2011).
- Produção de cimento – tratando-se das aplicações relacionadas à fabricação de cimento, há a viabilidade técnica de formular farinhas para a produção do clínquer com 1% de resíduo em sua composição sem afetar os módulos químicos indicados pela indústria cimenteira e facilitando o processo de moagem dada a finura do material (GOBBO; MELLO, 2005).
- Matrizes cerâmicas - a incorporação de RBRO traz efeitos positivos em relação à redução da absorção de água em matrizes de cerâmica vermelha (SEGADÃES; CARVALHO; ACCHAR, 2005; ACCHAR; VIEIRA; HOTZA, 2006), mas valores superiores do RBRO aumentam os índices de absorção de água e somente os diminuem se a temperatura de sinterização se eleva (SILVA et al., 2005), além disso a incorporação de resíduo reduz a retração e aumenta o módulo de ruptura (MELLO; AGOSTINHO, 2005; COCHI, 2006).

### 2.2 Contextualização e produção da escória

Escórias siderúrgicas são rejeitos resultantes de processos industriais destinados a obter o aço. A escória de aciaria (EA) é gerada no processo de fabricação do aço, resultante da transformação do ferro gusa líquido em aço. O aço é produzido, basicamente, a partir da queima do minério de ferro, carvão e cal. A produção mundial de aço bruto em 2008, segundo o Laboratório de Reciclagem, Tratamento de Resíduos e Metalurgia Extrativa da Universidade de São Paulo (LAREX, 2008) alcançou a cifra de 1,3 bilhão de toneladas registrando um novo recorde de produção. Considerando que para cada tonelada de aço produzido são gerados cerca de 150 kg de escória de aciaria, ou seja,

15% do total produzido, somente no ano de 2008 foram produzidos aproximadamente 200 milhões de toneladas deste resíduo.

No Brasil, são utilizados para a produção e o refino do aço os seguintes processos: OH (Open Heart) que utiliza o forno Siemens-Martin, elétrico ou EAF (Eletric Arc Furnace) que utiliza o forno de arco elétrico e o LD (Linz-Donawitz) ou BOF (Blast Oxygen Furnace) que utiliza o conversor a oxigênio, que eram responsáveis por cerca de 1,9%, 20,2% e 77,9% da produção de aço no país, respectivamente, no início do século XXI (MACHADO, 2000). A Tabela 4 apresenta a produção de aço bruto por processo no Brasil atualmente.

**Tabela 4 - Produção brasileira de aço por processo.**

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

Fonte: IABR (2012).

Na Figura 7 são mostrados exemplos de agregados de escórias provenientes do forno EAF e do LD. Verifica-se que, a escória do primeiro tipo apresenta coloração mais escura e grãos “porosos” e “lisos” (refinos oxidante e redutor, respectivamente), enquanto que a escória LD, além da coloração mais clara, apresenta apenas grãos “lisos”.

**Figura 7 - Exemplos de agregados de escória de aciaria de forno elétrico (EAF) e básico a oxigênio (LD).**



Fonte: Tavares (2012)

A escória para ser beneficiada precisa ser resfriada. As formas de resfriamento sofrido pelas escórias afetam suas propriedades físicas, assunto que será abordado no item 2.2.1.

Quando a escória é resfriada naturalmente ao ar é considerada “inerte” quanto às características hidráulicas, devido à cristalização de seus óxidos e apresenta “estrutura vesicular, textura superficial rugosa e maior superfície específica quando comparada com agregados mais lisos (MASUERO, 2001).

Já no resfriamento dito rápido, o processo é acelerado através de uma quantidade controlada de água, que juntamente com o vapor gerado, faz com que a escória incorpore ar e se expanda (MASUERO, 2001). Essa solidificação acelerada gera um material, chamado de escória expandida, menos denso ou de maior estrutura vesicular (GEYER, 2001).

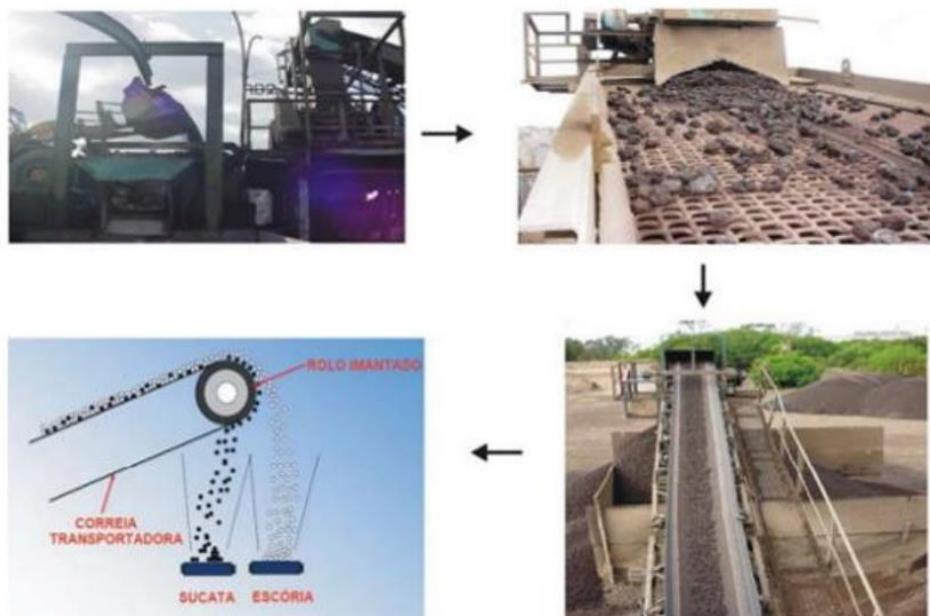
Já o processo conhecido por brusco consiste no resfriamento por choque térmico com jatos de água sob alta pressão sobre a escória líquida e sua posterior granulação ao ser resfriado em um tanque com água, ocorre uma fragmentação em blocos de escória, gerando um material denominado Escória Bruta de Aciaria (EBA), como mostrado na Figura 8. Este processo é comumente utilizado para escórias de alto forno.

**Figura 8 - Resfriamento brusco da escória.**



Após o resfriamento, a escória é transportada para a planta de britagem e, através de sistemas de correias, vai para uma peneira vibratória para fins de classificação e de separação magnética, sequencia esta ilustrada na Figura 9.

**Figura 9 - Classificação e separação magnética da escória e partes metálicas.**



Fonte: Sousa (2007)

A Escória de Aciaria In Natura é aquela proveniente da Aciaria e que foi britada e peneirada, mas não foi submetida a tratamento para redução da expansão, antes de serem empregadas em obras de pavimentação em diversos tipos de vias. Este material em suas aplicações não pode ser confinado devido a sua expansibilidade volumétrica, assunto este abordado no item 2.2.3.

### **2.2.1. Características químicas, físicas e mineralógicas de Escórias de Aciaria**

Durante o processo de produção do aço são eliminados óxidos de carbono (CaO) e íons de alumínio, silício e fósforo, que tornam o aço frágil, quebradiço e difícil de ser transformado em barras (ZIEMKIEWIC, 1998). Todos estes elementos e compostos eliminados entram na composição química da escória.

Dentre as impurezas do processo que formarão a escória estão silicatos de cálcio ( $\text{CaSiO}_3$ ), óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), ferrita cálcica ( $\text{CaFe}_2\text{O}_4$ ), óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) e outros. Os altos teores de CaO e MgO livres, presentes nas escórias, são devidos ao fato de que, depois que o fósforo e o silício se oxidam, estes elementos precipitam porque ultrapassam os limites de solubilidade da escória fundida (JOHN, 2003). As

composições típicas de algumas escórias de aciaria elétrica produzidas no Brasil podem ser vistas na Tabela 5.

**Tabela 5 - Composição da escória produzida pelo processo LD no Brasil.**

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

Fonte: IBS (1998)

Observa-se que os teores de óxido de sílica da escoria são bem inferiores ao do resíduo de corte de granito, com um teor maior de óxido de cálcio, o que confere melhor desempenho nas propriedades das misturas asfálticas

As características físicas são de extrema importância e têm sido estudadas e comparadas com agregados naturais e com as especificações definidas para materiais para pavimentação, por exemplo. A Tabela 6 mostra uma comparação de algumas propriedades e características físicas de materiais naturais e de escória de aciaria LD. Pode-se concluir, a partir desse quadro, que as escórias de aciaria podem ser processadas para gerar agregado de alta resistência (ALEXANDRE *et al.*, s.d.; GEISELER, 1996).

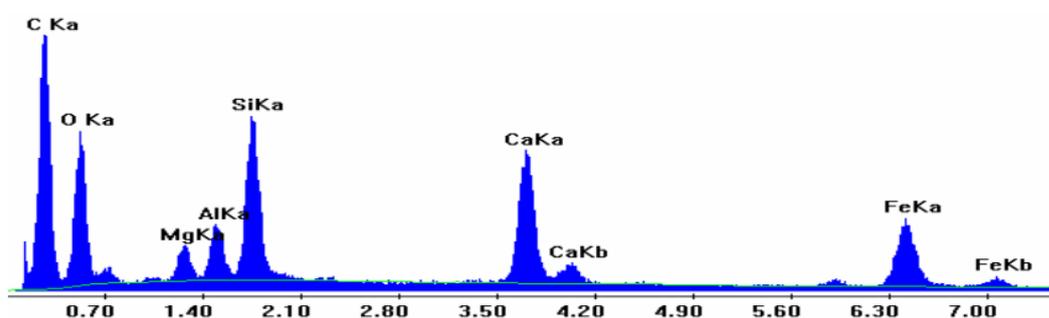
**Tabela 6 - Comparação entre escória de aciaria, basalto e granito.**

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

Fonte: GEISELER (1996)

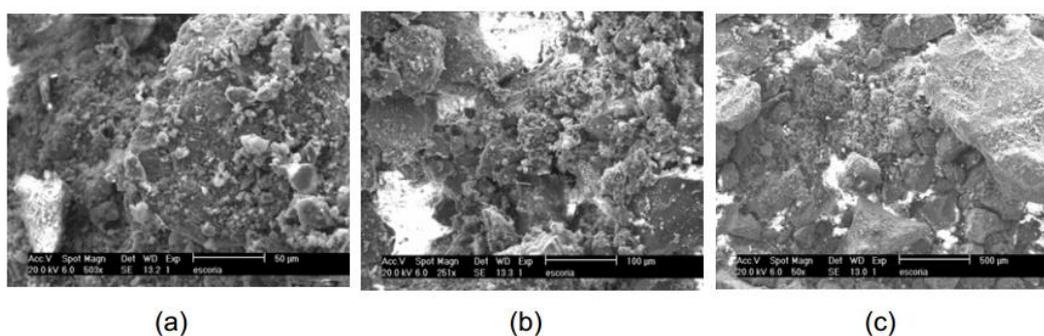
Castelo Branco (2004) caracterizou escórias obtidas na Sobremetal Recuperação de Metais Ltda., localizada no município de Maracanaú - CE, nas dependências da Gerdaul Cearense S.A. A análise química qualitativa do material foi feita através Microscópio de Varredura Eletrônica (MVE) com EDS onde os resultados estão apresentados nas Figuras 10 e 11. É possível perceber os elementos existentes nesta amostra (carbono, oxigênio, magnésio, alumínio, silício, cálcio e ferro), bem como a forma e a textura dos grãos. Através das fotos, verifica-se que os grãos da escória de aciaria possuem tamanhos variados, desde tamanhos menores do que 50  $\mu\text{m}$  até maiores do que 500  $\mu\text{m}$ .

**Figura 10 - Picos dos elementos existentes na escória, obtidos com a utilização do Microscópio de Varredura Eletrônica.**



Fonte: Castelo Branco (2004)

**Figura 11 - Fotos dos grãos da escória, escalas variadas (a) 50  $\mu\text{m}$ , (b) 100  $\mu\text{m}$  e (c) 500  $\mu\text{m}$ .**

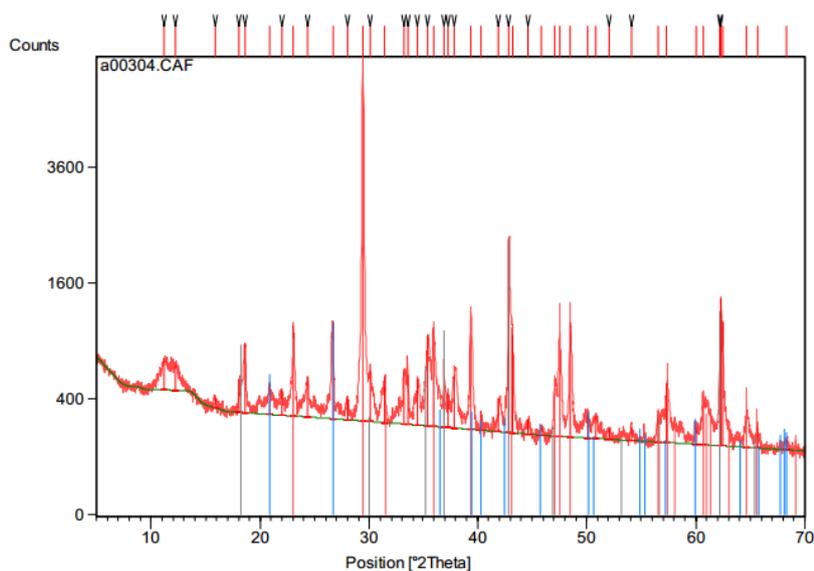


Fonte: Castelo Branco (2004)

A difração de raio-X no estudo de Castelo Branco (2004) foi realizada para identificar a composição mineralógica da escória de aciaria. A difração é o efeito da interferência entre ondas que reforça as intensidades dos picos. As partículas são formadas por estruturas cristalinas com padrões de difrações diferentes e característicos de cada fase. O feixe de raios-X é incidido em ângulos variáveis na amostra de policristal (em forma de pó e com arranjo atômico ou molecular com estrutura que se repete de forma periódica e tridimensional) (BLEICHER e SASAKI, 2000).

Como exemplo de difratograma, para a amostra de escória de aciaria, é mostrado na Figura 12. Os resultados são encontrados a partir da comparação com padrões de difração já conhecidos.

**Figura 12 – Difratograma da escória.**



Fonte: Castelo Branco (2004)

Para a amostra de aciaria do estudo de Castelo Branco (2004) foram encontrados cerca de 340 compostos diferentes, sendo o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e o óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) encontrados em maior quantidade. Alguns compostos encontrados são formados por metais, como prata, níquel, mercúrio e zinco. A não existência dos compostos responsáveis pela expansão do material é um indicativo de que a escória foi realmente curada.

### 2.2.2 Estudos e aplicações das escórias

As diferentes origens das escórias aplicadas em vários campos e tipo de resfriamento da escória também interfere no seu potencial de utilização. Escórias resfriadas ao ar são utilizadas, principalmente, como agregados para construção de estradas e em lastros de ferrovias. Já as escórias resfriadas bruscamente (granuladas) são potencialmente utilizadas como agregado em concreto, aterro, fabricação de tijolos, adições em concreto de cimento Portland, vidros, granito sintético, concreto leve e matéria-prima para produção do cimento (GEYER, 2001).

Pode-se citar ainda outras aplicações para escórias, tais como:

- Na produção de agregados para a construção de estradas, empregados tanto nas camadas de revestimento, quanto nas camadas de base e sub-base para

estabilização dos solos. A utilização da escória LD proporciona um significativo aumento na resistência à abrasão, pois as partículas expostas resistem satisfatoriamente às solicitações mecânicas, ampliando de forma consistente a vida útil do pavimento (LANZELLOTTI *et al.*, 2005);

- Lastro de ferrovia – Apresentam bons resultados de resistência de carga de ruptura à compressão pontual e baixo Los Angeles, porém, segundo SOUSA *et al.* (2004), é sugerido que se deva ter um maior controle no processo de industrialização para aumentar a qualidade das partículas quanto à uniformidade das características mecânicas;
- Produção de cimento – GEYER (2001) verificou a potencialidade do uso de escória de aciaria de refino redutor como adição ao cimento Portland comum para a produção de concreto e comprovou ser viável a sua utilização em até 10% desde resíduo para este fim;
- Aplicação em construções hidráulicas: as principais aplicações da escória de aciaria, nas construções hidráulicas, são para a regularização do fluxo do curso d'água e proteger suas margens, através de construção de nervuras, defletores e filtros de multicamadas (JOOST, 2002).
- Reciclagem nos processos siderúrgicos – pode ser utilizado como material substituto de parte da cal e do calcário, na aciaria e nos altos-fornos, respectivamente (GEYER, 2001);
- Corretivo agrícola – fertilizantes ou aditivos no cultivo de plantas e algas e corretivo de acidez do solo;

Segundo o DNER (1994j) ME 262, a escória para uso em pavimentação deve obedecer aos seguintes limites:

- Máximo de 3,0% de expansão;
- Isentas de impurezas orgânicas, contaminação com escórias de alto forno, solos e outros materiais;
- Granulometria: 40,0% até 12,7 mm e 60,0% entre 12,7 e 50,8 mm de abertura nominal e atender a granulometria de projeto;
- Absorção de água: 1,0% a 2,0% em peso;
- Massa específica: 3,0 a 3,5 g/cm<sup>3</sup>;
- Massa unitária: 1,5 a 1,7 kg/dm<sup>3</sup>;

- Desgaste por abrasão Los Angeles: no máximo igual a 25,0% para sub-base, base e revestimento.

Vale lembrar que a norma do DNER para uso de escória de aciaria em pavimentos rodoviários não especifica o tipo de processo de refino utilizado na fabricação do aço que será responsável pela geração da escória.

### **2.2.3. Expansibilidade da escória**

Machado (2000) relata que a característica expansiva da escória de aciaria está associada, principalmente, à hidratação da cal livre (CaO) e do periclásio (MgO) e à corrosão e oxidação do ferro metálico residual. Estas reações são responsáveis pelo aumento significativo do volume em relação às dimensões originais do cristal, podendo causar expansão destrutiva na escória de aciaria.

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

Conforme abordado no item anterior, a escória para ser beneficiada ela precisa ser tratada para que evitar a expansão do material quando este for utilizado. Os tratamentos de redução da expansão da escória de aciaria LD, utilizados no Brasil, tem sido estocagem ao ar livre (ao tempo) somente ou com molhagem e aeração diárias. Já nas escórias de aciaria EAF brasileiras, somente é realizado o tratamento ao tempo (RODRIGUES, 2007).

Empresas como a Arcelor Mittal, buscaram maior rapidez na estabilização da escória, de modo que os óxidos livres sejam em parte inertizados, reduzindo a capacidade de a escória expandir. O resultado deste estudo foi o desenvolvimento da ACERITA®. O processo de estabilização deste material buscou "estimular" a reação dos óxidos livres a partir de reação dos mesmos com o ar e a água, através de um processo de umectação e aeração da escória durante um certo período de tempo. Durante o período de tratamento para a redução da sua capacidade de expansão, a Escória de Aciaria é permanentemente monitorada através de ensaios de laboratório e testes previstos pelas normas do DNIT (antigo DNER) para utilização em base e sub-base dos pavimentos rodoviários. Ao atingir um valor de expansão que atenda as normas técnicas, o processo é interrompido e o material é disponibilizado para o mercado com o nome de ACERITA® - Escória de Aciaria com Redução de Expansão.

## 2.3 Mástiques asfálticos

O mástique asfáltico é habitualmente referido como a mistura do cimento asfáltico de petróleo (CAP) com as frações finas do agregado mineral (partículas com diâmetros inferiores à 0,075mm). Este elemento assume um papel de matriz na mistura betuminosa, com comportamento visco-elasto-plástico, em que a primeira função é envolver e manter ligados os agregados mais grossos, considerados elementos elásticos embebidos no mástique, e secundariamente o de preencher os vazios existentes no esqueleto mineral, garantir compacidade, impermeabilidade e trabalhabilidade às misturas betuminosas (BARDINI *et al.*, 2009).

As características do mástique influenciam o comportamento reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade à água das misturas asfálticas. A rigidez do mástique também influencia as tensões desenvolvidas e a resistência à fadiga a temperaturas intermediárias, bem como afeta a resistência à deformação permanente da mistura asfáltica a altas temperaturas e as tensões desenvolvidas e a resistência ao trincamento a baixas temperaturas (KIM *et al.*, 2003).

As propriedades do mástique são determinadas pelo tipo e teor dos seus componentes, pelas propriedades reológicas do ligante asfáltico e pela forma e estrutura dos grãos de fíler.

### 2.3.1 Cimento Asfáltico de Petróleo

O cimento asfáltico de petróleo (CAP) é um material termoplástico, semi-sólido à temperatura ambiente e viscoelástico que provém da destilação do petróleo. Comporta-se como um sólido vítreo a baixas temperaturas e/ou durante carregamento rápido (pequeno tempo de aplicação de carga – alta frequência de aplicação) e como um fluído viscoso a altas temperaturas e/ou durante carregamento lento (longo tempo de aplicação de carga – baixa frequência de aplicação) (MORILHA, 2004).

A característica de termoviscoelasticidade desse material manifesta-se no comportamento mecânico, sendo suscetível à velocidade, ao tempo e à intensidade de carregamento, e à temperatura de serviço. O comportamento termoviscoelástico é mais comumente assumido do que o termoviscoplastico, com suficiente aproximação do real comportamento do material (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Com relação as especificações se tratando de normativa brasileira, as classificações do CAP são baseadas quanto a sua consistência por penetração, com quatro tipos de asfaltos, i.e., CAP 30-45, CAP 50-70, CAP 85-100 e CAP 150-200.

Já a especificação norte americana (SUPERPAVE) se baseia no grau de desempenho do material, levando em consideração o clima e temperatura do pavimento onde ele será aplicado. O grau de desempenho (Performance Grade - PG) dos ligantes é representado, por exemplo, por PG 64-22. O primeiro número 64, frequentemente, é chamado de “grau à alta temperatura”. Isto significa que o ligante possui propriedades físicas adequadas até 64 °C no máximo. Esta deve ser a temperatura mais elevada esperada no pavimento, correspondente ao clima da região. Da mesma forma, o segundo número (-22) é chamado de “grau à baixa temperatura” e significa que o ligante possui propriedades físicas adequadas no pavimento até a temperatura mínima de -22 °C. Além disso, devem ser feitas considerações adicionais em termos de volume de tráfego (caminhões pesados) e tempo de aplicação de carga (autopistas, corredores de ônibus, etc.) para se especificar adequadamente o ligante em cada caso.

Os requisitos quanto às propriedades físicas permanecem os mesmos, porém muda a temperatura em que o ligante deve atendê-las. Por exemplo, as altas temperaturas a rigidez de um ligante não envelhecido quantificada pela relação  $G^*/\sin\delta$  deve ser no mínimo 1,0 kPa. Este requisito deve-se obtido a temperaturas mais elevadas, caso se deseje usar este ligante em um clima mais quente que o outro (MOTTA *et al.*, 1996).

Já a especificação AASHTO MP 19-10 – Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test – propõe a classificação em função do volume de tráfego, utilizando como parâmetro o valor da compliância de fluência não recuperável  $J_{nr}$ , obtida a partir do ensaio de Fluência e Recuperação sob Múltipla Tensão – MSCR, ASTM D 7405, este assunto será mais detalhado no item 2.5.3.

#### *Envelhecimento Oxidativo do Cimento Asfáltico de Petróleo*

O asfalto, por ser uma substância orgânica, é afetado pela presença de oxigênio, o que acarreta na alteração de duas características físicas, químicas e reológicas. Essas alterações regem o envelhecimento do ligante, que segundo Leite (1999) podem ocorrer através de quatro principais mecanismos, sendo eles: a oxidação, perda de voláteis, endurecimento físico e endurecimento exsudativo.

O envelhecimento do ligante asfáltico do revestimento ocorre em três etapas: a primeira, de maior impacto, ocorre na usinagem da mistura asfáltica e representa cerca de 60% do envelhecimento; a segunda ocorre durante a estocagem, transporte, espalhamento e compactação, representando cerca de 20% do envelhecimento total; e a terceira etapa ocorre durante a vida útil do revestimento e se dá devido à ação do meio ambiente, representando cerca de 20% do envelhecimento total sofrido pelo ligante (MORILHA,

2004). Este envelhecimento total é responsável pela alteração de suas características físicas, químicas e reológicas (TONIAL, 2001) e nos três tipos os asfaltos são endurecidos, o que afeta diretamente o desempenho destes (SHENOY, 2002).

Para a simulação do processo de envelhecimento no processo de usinagem o CAP é levado à Estufa de Filme Fino Rotativo (RTFOT), Figura 13, enquanto o processo de vaso de pressão (PAV), Figura 14, simula o endurecimento oxidativo que ocorre no ligante, ao longo da vida útil do pavimento.

**Figura 13 - Estufa RTFOT.**



Fonte: Bringel (2007)

**Figura 14 - Vaso de pressão (PAV).**



Fonte: Bringel (2007).

### 2.3.2 Fíler em Concreto Asfáltico

Segundo Al-Quadi *et al.* (2009), quando um ligante é combinado com um fíler mineral, um mástique é formado. Esse mástique pode ser encarado como um componente da mistura asfáltica que liga os agregados, e como o componente da mistura que sofre deformação quando o pavimento é submetido ao carregamento do tráfego. Portanto, as características do fíler podem influenciar significativamente as propriedades do mástique e, conseqüentemente, causar alterações importantes no desempenho da mistura asfáltica. O fíler influencia no desempenho mecânico, físico e químico do mástique e, por conseguinte, das misturas asfálticas. Entre os principais tipos de fileres utilizados na pavimentação pode-se citar:

- Cal;
- Polímero SBS e EVA;
- Borracha moída;
- Cimento Portland;
- Ácido polifosfórico.

### 2.3.3 Características dos Mástiques

Os fileres, quando combinados com o ligante asfáltico, provocam alterações nas propriedades físicas e químicas dos ligantes, causadas pelas diferentes propriedades dos fileres, em função do tipo, natureza e concentração na mistura (Kavussi *et al.*, 1997).

No mástique, o ligante asfáltico manifesta sua natureza elástica, viscoelástica ou viscosa em função da temperatura ou do tempo de carregamento, enquanto o agregado mineral preserva sua natureza elástica independentemente das condições de temperatura e de carregamento (FAXINA *et al.*, 2009).

Segundo Al-suhaibani *et al* (1992), o fíler entra nas misturas asfálticas com a “responsabilidade” de melhorar a estabilidade e a resistência das mesmas, devido a duas teorias. A primeira teoria é de que suas partículas finas, preenchendo os vazios existentes entre os agregados, aumentam a densidade e a resistência da mistura quando compactada. A outra teoria é que as partículas finas do fíler, ficando em suspensão no ligante asfáltico e absorvendo os componentes asfálticos (mástique), aumentam assim a viscosidade do ligante e conseqüentemente a rigidez da mistura, sendo que essas duas situações ocorrem simultaneamente.

Santana (1995) também discute dois pontos de vista sobre a influência do fíler:

- Mástique com fíler total: segundo Ruiz, em um mástique bem dosado todas as partículas do fíler ficam em suspensão no asfalto, ou seja, suas partículas não se tocam, formando um mástique homogêneo.
- Mástique com fíler ativo: segundo Puzinauskas, parte do fíler ainda se comporta como um agregado muito fino, com suas partículas se tocando, formando um esqueleto mineral, e a outra fica em suspensão no ligante.

Barra e Momm (2008) defendem que a atividade exercida por um fíler na formação de um mástique é física, atuando na rigidez da mistura, e química, interferindo na adesividade, e que isso independe de sua finura, mas depende da forma, textura, superfície específica e natureza do material. O comportamento do mástique é regido fisicamente pela forma e textura das partículas, tornando mais rígidas as misturas com teores mais altos de fíler, e quimicamente devido a superfície específica e natureza mineralógica, aumentando a adesividade do conjunto mástique-agregado, tanto quanto maior for a superfície específica do fíler e a compatibilidade entre cargas elétricas que aumentam o campo de atração molecular.

É importante a análise da granulometria do material fino, partículas entre 75  $\mu\text{m}$  e 40  $\mu\text{m}$  tem o papel de preencher os vazios formados pelas partículas maiores, são também estas partículas menores responsáveis pelo o aumento da rigidez e resistência pós-compactação das misturas (AASHTO, 2000).

Ainda, para Barra *et al.* (2005) e Barra e Momm (2008), a fração do fíler, que tem diâmetro maior que 20  $\mu\text{m}$ , contribui na formação do esqueleto mineral da mistura, preenchendo os vazios entre os agregados graúdos e miúdos, e aderindo aos agregados graúdos, atuando, em vários casos, como melhoradores de adesividade. Por outro lado, a fração com diâmetro menor que 20  $\mu\text{m}$  permanece em suspensão no CAP, denominado fíler ativo, responsável por aumentar a viscosidade do ligante, alterando o ponto de amolecimento, diminuindo a susceptibilidade térmica, e aumentando a resistência a deformação.

Em contrapartida, alguns autores encontram que partículas de fíleres inferiores a 37 $\mu\text{m}$  (RADFORD, 1916) e especialmente abaixo de 20  $\mu\text{m}$  (MOTTA e LEITE, 2000), ou até mesmo todas elas (RUIZ, 1943), permanecem em suspensão e formam o mástique quando misturadas com o ligante asfáltico, adsorvendo parte de seus componentes, provocando um aumento da viscosidade do ligante e conseqüentemente melhorando na rigidez na mistura. O melhoramento da rigidez é causado pela energia superficial de atração entre a superfície do mineral e o ligante, que para Tunnicliff (1962), uma película é formada que confere uma maior resistência a forças externas de tentativa de

punção ou penetração, resultado da adsorção que ocorre nas partículas de fíler mineral suspensas no ligante asfáltico.

Este comportamento devido à dimensão das partículas do fíler também é abordado por Lucena *et al.* (2004), aonde fíler aumenta a estabilidade e a resistência das misturas asfálticas em função das parcelas constituintes do mesmo:

- fíler agregado (entre 40 e 75  $\mu\text{m}$ ): preenche os vazios existentes nos agregados, aumentando a densidade e a resistência da mistura quando compactada;
- fíler ativo (menor que 20  $\mu\text{m}$ ): fica em suspensão no CAP absorvendo os componentes asfálticos (incorpora-se ao CAP), aumentando a viscosidade do CAP e conseqüentemente a rigidez da mistura.

Ainda no estudo de Lucena *et al.* (2004), foi verificado a influência do tipo e teor de fíler em misturas asfálticas e concluíram que fíleres com mais de 80% das partículas menores que 20  $\mu\text{m}$ , interagem melhor com o CAP, aumentando a rigidez da mistura.

No estudo de Smith e Hesp (2000) foi verificado os efeitos das dimensões das partículas de fíler na recuperação mecânica (healing) do mástique e na mistura asfáltica a baixas temperaturas. A recuperação mecânica foi avaliada pela medição da recuperação da rigidez em cada corpo de prova após um período de 2 horas de repouso em seguida a um ensaio de fadiga em um reômetro dinâmico. Os autores concluíram que os mástiques com fíler mais grosso apresentam recuperação mecânica maior do que os mástiques com fíler mais fino.

Quanto a característica das formas dos grãos, A forma sub-angular ou aproximadamente cúbica dos grãos tem sido a preferencial na utilização em misturas asfálticas em relação aos agregados de formato mais arredondado ou esférico. O mesmo ocorre no caso da textura rugosa ou áspera quando comparado à de aspecto liso ou polido.

Estes fatores são explicados pelo aumento do ângulo de atrito interno entre os granulares (forma; angulosidade) e melhor ancoragem do cimento asfáltico de petróleo ao grão (textura), onde tanto mais elevada será a estabilidade da mistura à medida que se dispõe de granulares cúbicos e angulosos, dotados de superfície áspera. A condição oposta é verificada na presença de agregados arredondados e com superfície lisa (DAMO, 1990).

Segundo Bechara *et al.* (2008), a relação fíler/betumem (f/b) é a principal variável associada ao efeito do mástique sobre as propriedades mecânicas, determinada pela quantidade de finos na composição granulométrica da mistura asfáltica, em relação ao teor de ligante asfáltico efetivo. Outros autores como Motta e Leite (2000), abordam

que a densificação e a rigidez de uma mistura asfáltica são afetadas não somente pelo material passante na peneira n° 200, mas também pela forma e natureza do material. Ishai *et al.*, (1980) atribui que os diferentes tipos de efeitos causados pelos diferentes tipos de fíleres a atividade superficial dos fíleres. Craus *et al.*, (1978) apontam, dentro os diversos fatores responsáveis pela interação físico-química do fíler-ligante asfáltico, a intensidade de adsorção como o fator mais importante de caracterização do fíler. Kavussi e Hicks (1997), complementam destacando os seguintes fatores:

- Tipo de fíler: graduação, textura superficial, superfície específica, forma dos grãos etc.;
- Natureza do fíler: a composição mineralógica e a atividade físico-química, que afetam a afinidade com o ligante asfáltico;
- Concentração do fíler na mistura.

#### **2.3.4. Influência do fíler no comportamento reológico de mástiques**

Segundo Bretas e D'Ávila (2000), reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria; analisa as respostas (deformações ou tensões) de um material provocadas pela aplicação de uma tensão ou uma deformação. O material pode estar tanto no estado líquido como no estado gasoso ou sólido. Materiais de elevado peso molecular como os CAP's possuem um comportamento viscoelástico, que se caracteriza por apresentar ao mesmo tempo características de materiais sólidos e de materiais líquidos. Em temperaturas suficientemente baixas e/ou altas taxas de carregamento (frequência), o asfalto se comporta essencialmente como um sólido elástico. Quando a temperatura aumenta e/ou quando a taxa de carregamento diminui, a propriedade viscosa do asfalto se torna mais evidente. Em temperaturas suficientemente altas e/ou em longo tempo de aplicação de cargas, o asfalto é essencialmente um líquido Newtoniano e pode ser descrito por um valor de viscosidade independente da taxa de aplicação de carga.

As propriedades reológicas do mástique é resultado da combinação das características elástica, viscoelástica ou viscosa do ligante asfáltico e da natureza elástica do fíler mineral, o que afeta as propriedades mecânicas da mistura asfáltica composta por esses materiais. Com isso, o estudo das propriedades reológicas do mástique permite avaliar como esse componente pode afetar as propriedades da mistura asfáltica (BECHARA *et al.*, 2008).

É necessário se conhecer as condições nas quais os CAP's se comportam como materiais viscoelásticos lineares para que se possa obter os parâmetros viscoelásticos

tais como módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ), ângulo de fase ( $\delta$ ), módulo elástico ( $G'$ ) recuperável e o módulo viscoso ( $G''$ ) não recuperável, já que estes são definidos dentro de uma região de viscoelasticidade linear. Várias publicações tratam da importância de se estudar os limites da linearidade dos ligantes betuminosos e principalmente se forem modificados por polímeros (COLLINS *et al.*, 1991).

A adição de fíler provoca modificações no comportamento reológico do mástique asfáltico, com o aumento do módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e redução do ângulo de fase ( $\delta$ ). Os efeitos são mais significativos e favoráveis em temperaturas altas, aumentando a rigidez do ligante, que tem módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) menor nessa faixa de temperatura. Porém, a baixas temperaturas, o fíler aumenta ainda mais a rigidez do ligante asfáltico, com redução da capacidade de relaxar tensões. A adição de fíler mineral ao ligante asfáltico provoca um aumento do parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$ , o que segundo a Especificação Superpave é favorável por aumentar a resistência do ligante à deformação permanente; porém, também provoca um aumento do parâmetro  $G^*\text{sen}\delta$ , sendo desfavorável em relação ao dano por fadiga sob deformação controlada (BAHIA, 1995).

A caracterização das propriedades reológicas do ligante asfáltico deve ser realizada ao longo de toda a faixa de temperaturas e/ ou de tempos de carregamento a que o pavimento pode ser submetido ao longo da sua vida em serviço, princípio da superposição tempo temperatura.

Atualmente, os estudos reológicos em mástiques são realizados em amostras semelhantes àsquelas usadas em estudos de ligantes asfálticos puros ou modificados ou na forma de corpos de prova cilíndricos em miniatura, que podem ser moldados ou extraídos de corpos de prova maiores (CASTELO BRANCO, 2008).

Para o ensaio destas amostras, equipamentos específicos, chamados reômetros, são utilizados.

#### **2.4 Caracterização do comportamento reológico de mástiques**

A literatura propõe alguns testes como, por exemplo, ensaio oscilatório (varredura de frequência e varredura de deformação), ensaio de Ensaio de Fluência e Recuperação sob Tensão Múltipla e ensaio de Viscosidade Brookfield, utilizados para determinar os parâmetros reológicos do mástique, tais como módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ), ângulo de fase ( $\delta$ ), viscosidade (cP) e perfil reológico do material.

### 2.4.1 Ensaio de Cisalhamento Dinâmico

O reômetro de cisalhamento dinâmico (Dynamic Shear Rheometer - DSR) é utilizado para a caracterização das propriedades viscoelásticas do ligante asfáltico com ou sem envelhecimento a curto e longo prazo. O DSR avalia a rigidez do ligante asfáltico (módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ )), sob carregamento de cisalhamento oscilatório, de forma senoidal, sob várias condições de temperaturas e a taxas de carregamento (frequência) compatíveis com o tráfego rodoviário.

A aplicação de carregamento no reômetro de cisalhamento dinâmico pode ser realizada na forma de tensão ou de deformação controlada: sob tensão controlada, o sistema de aplicação de carga aplica um torque à amostra, de forma que ela esteja submetida à tensão selecionada para a realização do ensaio; sob deformação controlada, o sistema aplica uma deflexão angular à amostra, de forma que ela esteja submetida à deformação desejada para a realização do ensaio (LIMA *et al.*, 2008).

O  $G^*$  é definido como a razão da taxa de cisalhamento máximo com a deformação máxima e fornece a medida da resistência total à deformação quando o ligante asfáltico está sujeito a um carregamento. O ângulo de fase ( $\delta$ ) fornece informações sobre a razão entre as respostas elástica e viscosa durante o processo de cisalhamento (MOTTA *et al.*, 1996). Um alto módulo de cisalhamento dinâmico representa maior rigidez enquanto que um menor ângulo de fase representa uma maior resposta elástica.

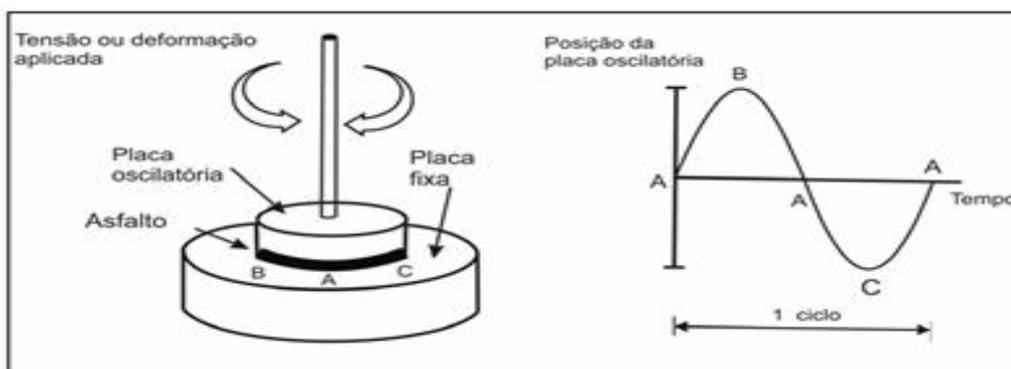
O  $G^*$  é formado por parcelas elásticas e viscosas que são designadas por módulo de armazenamento ( $G'$ ) e módulo de perda ( $G''$ ), respectivamente. O módulo de armazenamento ( $G'$ ) representa o componente em fase do módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ), já o módulo de perda ( $G''$ ) representa o componente defasado do módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ).

O módulo de armazenamento ( $G'$ ) pode ser definido como a razão da tensão elástica com a deformação, correspondendo à relação entre a tensão - quando a tensão e a deformação estão em fase, ou seja,  $\delta=0^\circ$  - e o pico de deformação. O  $G'$  indica a parcela equivalente de energia proveniente da tensão aplicada que é temporariamente armazenada durante o ensaio, mas que pode ser recuperada posteriormente (LIMA *et al.*, 2008).

O módulo de perda ( $G''$ ) é, matematicamente, igual à tensão, quando  $\delta = 90^\circ$ , dividida pela deformação. O módulo de perda indica a parcela de energia utilizada para iniciar o escoamento e é transferida irreversivelmente sob forma de calor (LIMA *et al.*, 2008).

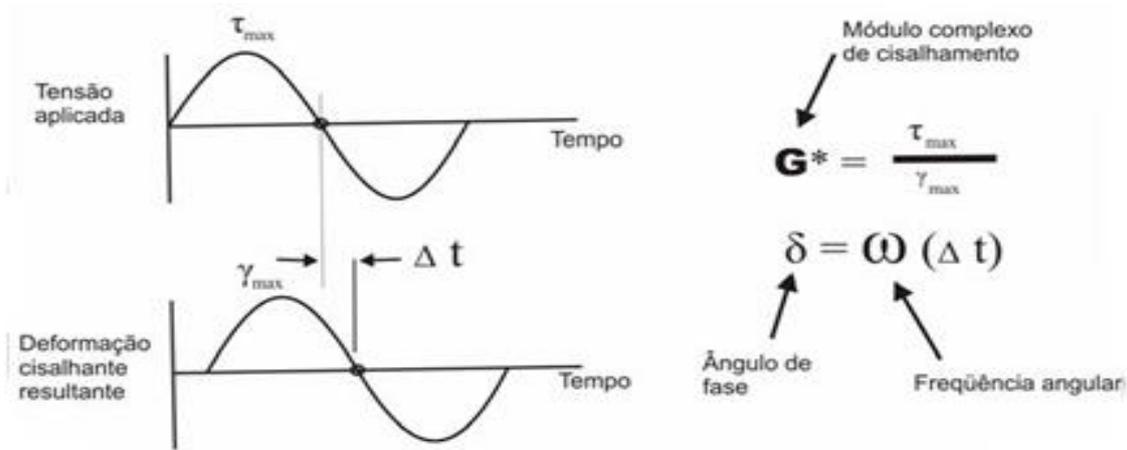
As Figuras 15 e 16 mostram um esquema de funcionamento do reômetro que consta das especificações do SHRP (Strategic Highway Research Program). Apresentam, de forma esquemática, os valores de  $G^*$  e  $\delta$  medidos pelo DSR, como resposta a uma deformação cisalhante em torque constante de uma amostra. Na ilustração, a resposta à deformação cisalhante de uma amostra de ligante está “defasada” em relação à tensão aplicada por certo intervalo de tempo  $\Delta t$ .

**Figura 15 - Funcionamento Reômetro de Cisalhamento Dinâmico.**



Fonte: Motta *et al.* (1996)

**Figura 16 - Cálculo do módulo de cisalhamento dinâmico e do ângulo de fase  $\delta$  medidos no DSR.**



Fonte: Motta *et al.* (1996)

O  $\delta$  é a medida do balanço viscoelástico do comportamento do material. Para materiais completamente elásticos, não existe atraso entre a tensão cisalhante aplicada e a deformação cisalhante obtida, sendo  $\delta$  igual a  $0^\circ$ . Para materiais totalmente viscosos, a deformação obtida está completamente defasada e vale  $90^\circ$ . Materiais viscoelásticos, tais como os ligantes asfálticos, possuem ângulo de fase variando entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , dependendo da temperatura, sendo este uma combinação das respostas viscosas e elásticas. A altas temperaturas o  $\delta$  tende a  $90^\circ$ , e a baixas temperaturas o  $\delta$  tende a  $0^\circ$ .

O ângulo de fase ( $\delta$ ) é determinado conhecendo-se o intervalo de tempo entre a aplicação da tensão de cisalhamento (torque) e a deformação de cisalhamento resultante (rotação angular), no ensaio sob de tensão controlada, ou entre a deformação de cisalhamento induzida e a tensão de cisalhamento requerida, no ensaio sob deformação controlada.

O método para o ensaio de cisalhamento dinâmico é o ASTM D D715-05 (“Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer”). Esta norma contém o procedimento utilizado para determinar o módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ) de ligantes asfálticos, com a utilização do reômetro de cisalhamento dinâmico e geometria de placas paralelas. O ensaio é adequado para uso quando o módulo de cisalhamento dinâmico varia entre 100 Pa e 10 MPa, valores que são obtidos geralmente entre 4 e 88°C. Os corpos-de-prova para o ensaio tem 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura ou 8 mm de diâmetro e 2 mm de espessura.

#### **2.4.2 Curva Mestra**

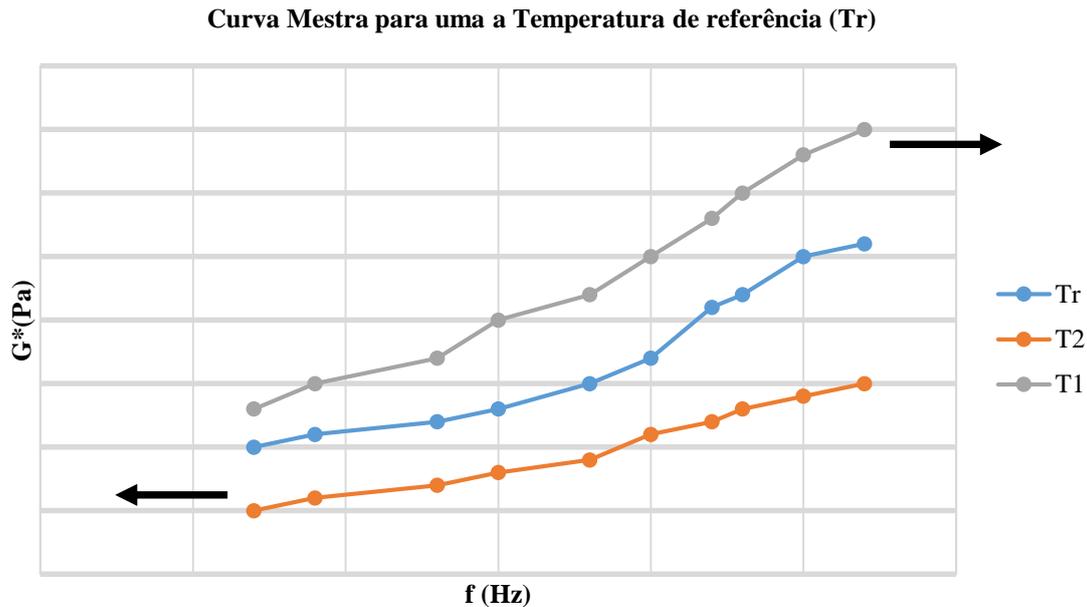
As curvas mestras são utilizadas para avaliar uma propriedade reológica, como ângulo de fase ( $\delta$ ) ou módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ), em função da frequência (ou do tempo) de aplicação do carregamento, descrevendo o comportamento reológico do material para uma única temperatura, denominada temperatura de referência, em uma ampla faixa de frequências ou tempos de carregamento. Para isto pode se fazer uso do Princípio da Superposição Tempo-Temperatura (PSTT), o PSTT afirma que dados de viscoelasticidade obtidos para diferentes temperaturas podem ser superpostos em uma curva mestra. Isto é feito através de deslocamentos horizontais ao longo do eixo logarítmico da frequência ou do tempo (KLOMPEN e GOVAERT, 1999).

Os ligantes asfálticos, de maneira geral, são materiais termo-reologicamente simples (ANDERSON *et al.*, 1992), o que permite assumir que o princípio de superposição tempo- temperatura é válido (STASTNA *et al.*, 1994; ZANZOTTO *et al.*, 1996). O princípio de superposição tempo-temperatura (PSTT) usa a equivalência entre frequência e temperatura, para o comportamento viscoelástico linear de ligantes asfálticos, sobre a propriedade reológica, ou seja, pode-se afirmar que o efeito na redução da frequência nas propriedades mecânicas do material é equivalente ao aumento da temperatura.

Para a construção da curva-mestra, Figura 17, empregando-se o PSTT, é realizada uma varredura de dados da função reológica, obtidos em ensaios dinâmicos, em função de faixas curtas de frequência, a diferentes temperaturas. Uma temperatura de referência

deve ser selecionada e os dados de ensaios realizados em todas as outras temperaturas são deslocados horizontalmente em relação ao tempo até que as curvas se fundam, compondo uma função suavizada do comportamento reológico do material ao longo de uma faixa extensa de frequências de carregamento. A quantidade de deslocamento em cada temperatura, necessária para formar a curva mestra, descreve a dependência da temperatura do material (WITCZAK, 2004).

**Figura 17 - Construção da Curva Mestra.**



Fonte: Autor

Este fator de deslocamento ( $a_t$ ) pode ser determinado de diferentes formas, dentre elas: (1) equação de Arrhenius ou (2) equação de Williams-Landel-Ferry (WLF). De acordo com Cheung (1995), caso a diferença entre a temperatura a ser deslocada e a temperatura de referência ( $T-T_{ref}$ ) seja menor ou igual a  $20^\circ\text{C}$  a equação de Arrhenius fornece um melhor ajuste dos resultados. Por outro lado, quando ( $T-T_{ref}$ ) é maior que  $20^\circ\text{C}$  a equação WLF é mais indicada.

$$\text{Log}_{a_t} = C \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) = \frac{E_a}{2,303 \cdot R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (1)$$

Onde C é a constante do material (K),  $E_a$  é a energia de ativação (J/mol), R é a constante dos gases ideais (8,314J/mol.K), T é a temperatura experimental (K),  $T_{ref}$  é a temperatura de referência (K) e o valor 2,303 corresponde ao logaritmo natural do número 10.

$$\text{Log}_{a_t} = \frac{-C_1(T-T_{ref})}{C_2 + (T-T_{ref})} \quad (2)$$

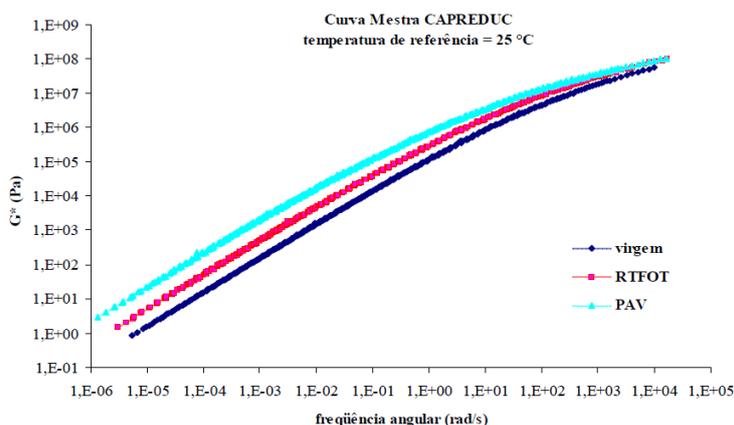
Onde a constante  $C1$  é adimensional e a constante  $C2$  tem unidade de temperatura (K). Estas constantes dependem das propriedades de cada material e da temperatura de referência,  $T_{ref}$ .

O método da superposição tempo-temperatura permite que se obtenham as curvas mestras das funções viscoelásticas linear (PARTAL *et al.*, 1999). Os resultados de  $G^*$ ,  $G'$ ,  $G''$  e  $\delta$ , a uma dada temperatura, podem ser dispostos horizontalmente em uma escala log-log para se originar uma curva mestra (POLACCO *et al.*, 2003), conforme indica a Figura 18.

De posse das curvas mestras pode-se avaliar as propriedades reológicas, tanto pela variação do módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) quanto do ângulo de fase ( $\delta$ ), do ligante asfáltico para uma única temperatura em um amplo espectro de frequência (e/ou tempo) de carregamento que o pavimento pode estar sujeito ao longo da vida de serviço.

Anderson *et al.* (1992) analisaram as propriedades reológicas dos mástiques através de um conjunto de curvas mestras para o módulo de cisalhamento dinâmico e o ângulo de fase e observaram que, nas temperaturas de intermediárias a baixas, o efeito da adição do fíler é praticamente inexpressivo, já nas temperaturas mais altas o efeito mais expressivo no aumento da rigidez do ligante asfáltico provoca deslocamento vertical na escala de rigidez, praticamente uniforme ao longo da escala de frequência; a elasticidade também aumenta com a adição de fíler, o que é indicado pela redução dos valores de ângulo de fase. Os fatores de deslocamento são pouco sensíveis à adição de finos, o que indica que a dependência da temperatura do mástique e do ligante asfáltico é essencialmente a mesma. Para todos os mástiques, o aumento relativo no módulo é pequeno a baixas temperaturas, quando comparado ao aumento verificado nas temperaturas altas.

**Figura 18 - Curva Mestre do CAPREDUC, com a temperatura de referência em 25 °C.**

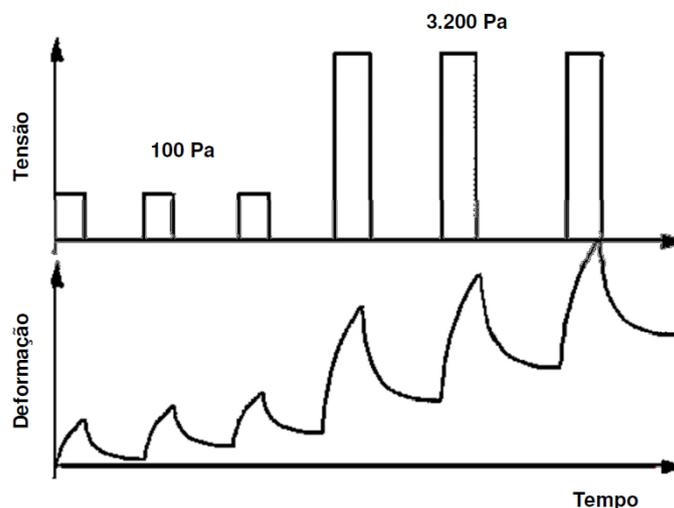


Fonte: Bringel (2007)

### 2.4.3 Fluência e Recuperação sob Tensão Múltipla (MSCR)

O ensaio Multiple Stress Creep and Recovery, ou fluência e recuperação sob tensão múltipla, foi desenvolvido pela Administração Rodoviária Federal dos Estados Unidos (FHWA) por meio de um aperfeiçoamento do ensaio de fluência repetida e recuperação, sendo uma alternativa ao ensaio do Superpave em regime oscilatório para a caracterização da resistência dos ligantes asfálticos à deformação permanente. No MSCR, utiliza-se o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) para aplicar uma carga constante de 1 s em uma amostra de ligante asfáltico, removendo-a em seguida e permitindo que o material repouse por um período de tempo de 9 s. Este ciclo é repetido por 10 vezes em 11 níveis diferentes de tensão, sem intervalos de tempo entre um nível e outro. Os níveis variam de 25 a 25.600 Pa e foram implantados pelo FHWA com os objetivos de verificar a dependência dos ligantes asfálticos à tensão e reduzir o número necessário de amostras (D'ANGELO *et al.*, 2007). Na norma ASTM D7405, o número de níveis foi reduzido para apenas dois valores (100 e 3.200 Pa) como exemplificado na Figura 19, sendo que os tempos de carregamento e de repouso e o número de ciclos em cada nível de tensão foram mantidos.

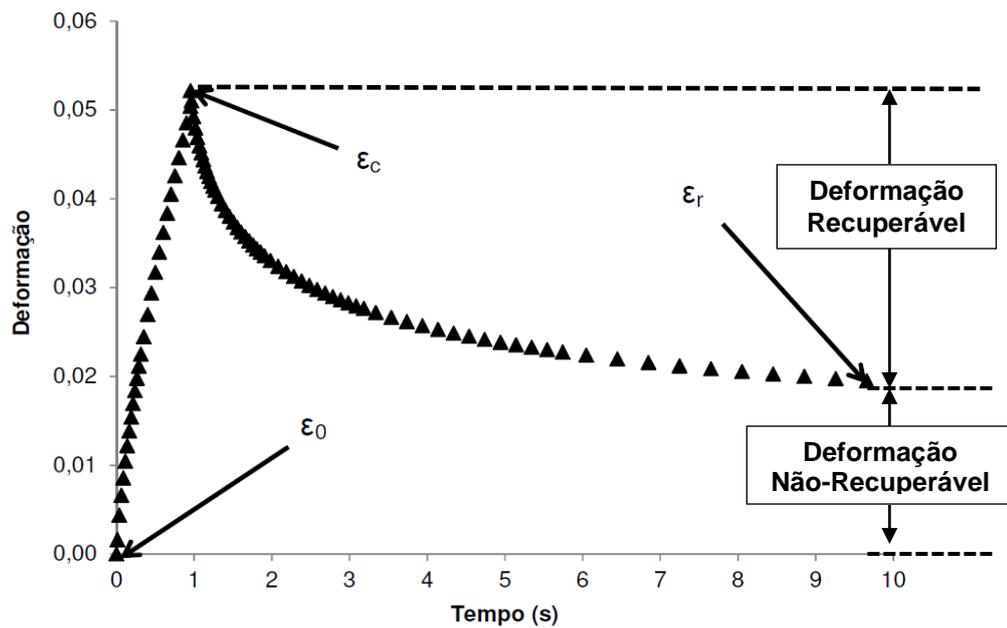
Figura 19 - Representação das tensões e deformações durante a realização do ensaio MSCR.



Fonte: Adaptado de D'Angelo e Dongré (2009)

Duas propriedades são obtidas no MSCR: o percentual de recuperação (R) e a compliância não-recuperável (J<sub>nr</sub>). Ambas são determinadas por meio de três leituras de deformação na amostra de ligante asfáltico em cada um dos 10 ciclos de fluência e recuperação, sendo elas: (1) uma no início do ciclo de fluência ( $\epsilon_0$ ), medida no tempo de 0 s; (2) outra no final do ciclo de fluência ( $\epsilon_c$ ), medida no tempo de 1 s; e (3) outra no final do ciclo de recuperação ( $\epsilon_r$ ), medida no tempo de 10 s. A Figura 20 ilustra a localização destas deformações em um ciclo de fluência e recuperação.

**Figura 20 - Localização das deformações  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_c$  e  $\epsilon_r$  em um ciclo de fluência e recuperação do ensaio MSCR.**



Fonte: Adaptado de Domingos (2011)

Os cálculos do percentual de recuperação e da compliância não-recuperável são realizados por meio de equações prescritas na norma ASTM D7405. No caso do percentual de recuperação, este cálculo é efetuado por meio da Equação 3:

$$R(\sigma, N) = \frac{[(\epsilon_c - \epsilon_0) - (\epsilon_r - \epsilon_0)] \cdot 100}{\epsilon_c - \epsilon_0} \quad (3)$$

onde  $R(\sigma, N)$  é o percentual de recuperação na tensão  $\sigma$  (para  $\sigma = 100$  Pa ou 3.200 Pa) para o ciclo de fluência e recuperação número  $N$  (onde  $1 \leq N \leq 10$ ). No caso da compliância não-recuperável, este cálculo é efetuado por meio da Equação 4:

$$J_{nr}(\sigma, N) = \frac{\epsilon_r - \epsilon_0}{\sigma} \quad (4)$$

Onde  $J_{nr}(\sigma, N)$  é a compliância não-recuperável na tensão de  $\sigma$  Pa e no ciclo de fluência e recuperação número  $N$ , para  $\sigma$  e  $N$  apresentando os mesmos valores mencionados anteriormente ( $\sigma = 100$  ou 3.200 Pa e  $1 \leq N \leq 10$ ). De posse de todos os valores individuais de  $R(\sigma, N)$  e  $J_{nr}(\sigma, N)$  nos 10 ciclos de fluência e recuperação, seus resultados médios são calculados por meio da média aritmética simples dos valores obtidos nestes 10 ciclos (ANDERSON *et al.*, 2010), em cada uma das temperaturas de realização do ensaio MSCR.

Com a determinação de todos os valores individuais e médios dos percentuais de recuperação e das compliâncias não-recuperáveis do ligante asfáltico em estudo, o comportamento fluência-recuperação do material pode ser determinado e avaliado. A

avaliação deste tipo de comportamento permite, como observado por Bahia *et al.* (2001), em seus estudos com o ensaio de fluência repetida e recuperação, uma diferenciação mais adequada dos comportamentos dos ligantes asfálticos modificados por meio dos valores de deformação acumulada com o tempo.

Em uma modelagem matemática, a resposta de fluência e recuperação de materiais viscoelásticos é tipicamente feita por meio do modelo de Burgers, o qual combina, em série, um modelo de Kelvin-Voigt e um modelo de Maxwell (D'ANGELO *et al.*, 2007). A vantagem da utilização desse modelo é a de que a resposta do material pode ser dividida em suas partes variadas para se estimar a componente viscosa, à qual se atribui a causa da deformação permanente, e o acúmulo desta deformação nas misturas empregadas em pavimentação (BAHIA *et al.*, 2001).

Afim de incluir as propriedades de fluência e recuperação avaliadas pelo ensaio MSCR, foi gerada uma nova classificação para os ligantes asfálticos. Nos critérios adotados nessa classificação, os ligantes são classificados em quatro níveis de serventia diferentes a partir dos valores obtidos do parâmetro  $J_{nr}$  com materiais na condição envelhecida a curto prazo (RTFOT). Esses níveis têm por objetivo relacionar a serventia do material ao tipo de carregamento do tráfego (volume e/ou velocidade) adequado ao material e são representadas pelas letras S (padrão), H (pesado), V (muito pesado) e E (extremamente pesado), a faixa de valores para classificação de cada nível encontrasse na Tabela 7.

Valores mínimos do percentual de recuperação (R) são recomendados para os ligantes asfálticos, Tabela 8. Esses valores tem a importância, segundo o ASPHALT INSTITUTE (2010) e Anderson *et al.* (2010) de fornecer um indicado do material quanto resposta elástica retardada, sendo que valores elevados desta propriedade indicam uma componente elástica significativa no material na temperatura do ensaio MSCR. Vale observar que materiais com  $J_{nr} > 2,0 \text{ kpa}^{-1}$  não são considerados nestas recomendações, portanto, não há valores mínimos de R para esses ligantes.

**Tabela 7 - Classificação dos ligantes asfálticos quanto ao valor de  $J_{nr}$  de acordo com o critério proposto pelo FHWA.**

<b><math>J_{nr}</math> a 3.200 Pa e na temperatura máxima do PG</b>	Padrão (S)	4,0	< 10 milhões e velocidade padrão
	Pesado (H)	2,0	Entre 10 e 30 milhões ou velocidade baixa
	Muito pesado (V)	1,0	Acima de 30 milhões ou velocidade muito baixa
	Extremamente pesado (E)	0,5	Acima de 30 milhões e velocidade muito baixa

Fonte: AASHTO (2010)

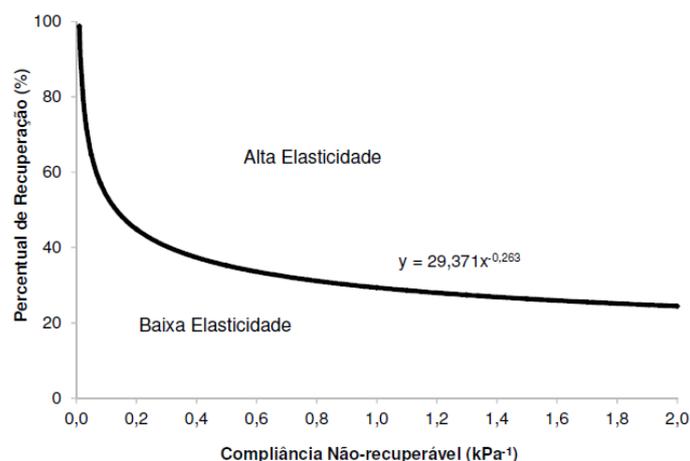
**Tabela 8 - Valores recomendados para o percentual de recuperação de acordo com o critério proposto pelo FHWA.**

Complância não-recuperável a 3.200 Pa (kpa <sup>-1</sup> )	Percentual de recuperação mínimo (em %)
1,01 a 2,00	30
0,51 a 1,00	35
0,251 a 0,50	45
0,125 a 0,25	50

Fonte: D'Angelo (2010) *apud* Domingos (2011)

Esses valores também podem ser apresentados em um gráfico, conforme Figura 21. Neste gráfico os pares ordenados (Jnr,R) acima da curva representam materiais considerados de alta elasticidade, em contrapartida os pares abaixo da curva são considerados de baixa plasticidade.

**Figura 21 - Relação entre as compliâncias não-recuperáveis e os percentuais de recuperação a 3.200 Pa.**



Fonte: D'Angelo (2010) *apud* Domingos (2011)

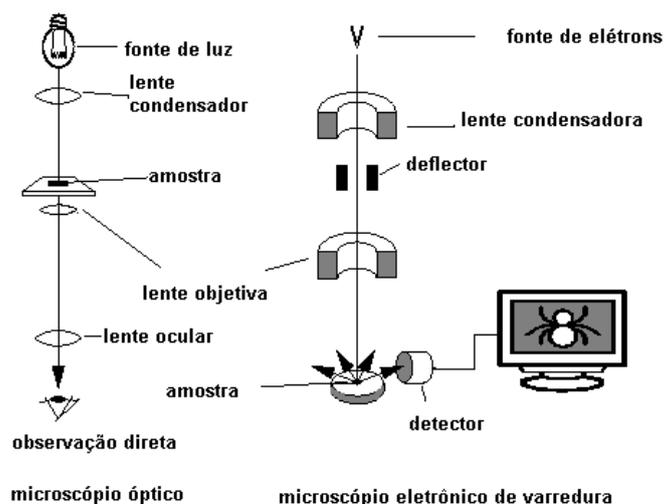
## 2.5 Análise microestrutural utilizando microscópio eletrônico de varredura (MEV)

A principal função de qualquer microscópio é tornar visível ao olho humano o que for muito pequeno para tal. A forma mais antiga e usual é a lupa seguida do microscópio óptico, que ilumina o objeto com luz visível ou luz ultravioleta. O limite máximo de resolução dos microscópios ópticos é estabelecido pelos efeitos de difração devido ao comprimento de onda da radiação incidente. Os microscópios ópticos convencionais ficam, então, limitados a um aumento máximo de 2000 vezes, porque acima deste valor, detalhes menores são imperceptíveis. Para aumentar a resolução pode-se utilizar uma radiação com comprimento de onda menor que a luz visível como fonte de iluminação do objeto.

Além disso, a profundidade de campo é inversamente proporcional aos aumentos, sendo necessário, então, um polimento perfeito da superfície a ser observada, o que às vezes é incompatível com a observação desejada (KESRENBACHK, 1994).

Um microscópio eletrônico de varredura (MEV) utiliza um feixe de elétrons no lugar de fótons utilizados em um microscópio óptico convencional, o que permite solucionar o problema de resolução relacionado com a fonte de luz branca, Figura 22.

**Figura 22 - Desenho esquemático para comparação entre microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura.**



Fonte: Dedavid *et al.* (2007)

O MEV é um aparelho que pode fornecer rapidamente informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra sólida. Sua utilização é comum em biologia, odontologia, farmácia, engenharia, química, metalurgia, física, medicina e geologia.

O MEV é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise de características microestruturais de objetos sólidos. A principal razão de sua utilidade é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas; valores da ordem de 2 a 5 nanômetros são geralmente apresentados por instrumentos comerciais, enquanto instrumentos de pesquisa avançada são capazes de alcançar uma resolução melhor que 1 nm (NAGATANI *et al.*, 1987).

Outra característica importante do MEV é a aparência tridimensional da imagem das amostras, resultado direto da grande profundidade de campo. Permite, também, o exame em pequenos aumentos e com grande profundidade de foco, o que é extremamente útil, pois a imagem eletrônica complementa a informação dada pela imagem óptica.

A análise das imagens fornecidas pelo MEV é uma forte ferramenta para entender a interação das partículas finas dos agregados com o ligante asfáltico, pois além de fornecerem informações que expliquem o desempenho mecânico das misturas asfálticas, pode-se ainda, avaliar propriedades reológicas da mistura ou do mástique como a viscosidade, por exemplo.

## CAPÍTULO 3

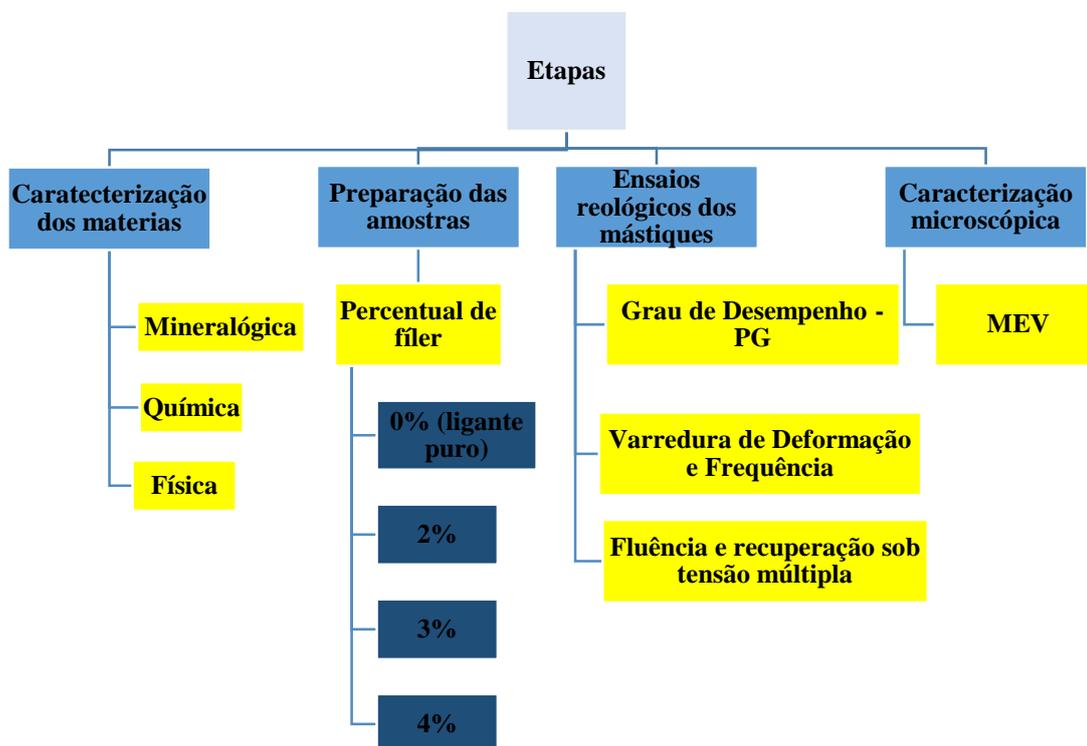
### MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do estudo, bem como os ensaios e as propriedades envolvidas. Podem ser destacados como parâmetros para análise de grau de desempenho dos ligantes asfálticos fatores como curvas mestra do módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase; e percentual de recuperação e compliância não-recuperável de mástiques puros e sujeitos ao envelhecimento oxidativo.

#### 3.1 Matriz experimental e variáveis da pesquisa

No presente trabalho foi realizada a caracterização de diferentes fases de materiais asfálticos (CAP e Mástique). Para o melhor entendimento dos ensaios utilizados para realizar a caracterização de cada uma destas fases, a Figura 23 apresenta a matriz experimental do trabalho.

**Figura 23 - Etapas do Programa Experimental.**



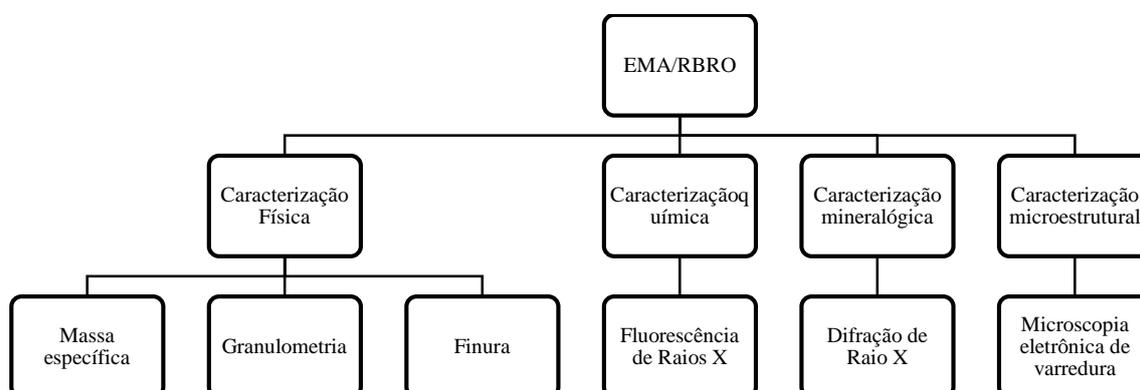
Fonte: Autor

##### 3.1.1. Caracterização dos Resíduos

Na primeira etapa deste trabalho, antes da execução e ensaio dos diferentes percentuais de fíleres nos mástiques propostos, os resíduos RBO e EMA foram devidamente

caracterizados para identificação de suas propriedades iniciais, conforme os parâmetros indicados na Figura 24.

**Figura 24 - Caracterização dos resíduos.**



Fonte: Autor

### *Caracterização física*

No aspecto físico, os resíduos foram analisados através de ensaios realizados no Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção (LEMAC) – UFES, descritos na Tabela 9.

**Tabela 9 - Métodos de ensaios para a caracterização física.**

Propriedade	Método de ensaio
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 23 (ABNT, 2001)
Finura por meio da peneira 0,075 mm (nº 200)	NBR 11579 (ABNT, 2012)
Granulometria	Peneiramento

Fonte: Autor

A determinação da massa específica é de grande importância para o desenvolvimento da pesquisa e seguiu os procedimentos estabelecidos para o cimento Portland e outros materiais em pó, por meio do frasco de Le Chatelier, verificando o deslocamento do líquido no interior do recipiente após a inserção de material, conforme indicado na Figura 25.

**Figura 25 - Ensaio de massa específica dos resíduos.**



Fonte: Autor

A verificação da distribuição granulométrica dos resíduos foi realizada através de peneiramento, onde foram utilizadas cinco peneiras, sendo elas: 100# (150  $\mu\text{m}$ ), 150# (106  $\mu\text{m}$ ), 200# (75  $\mu\text{m}$ ), 325# (45  $\mu\text{m}$ ) e 450# (32  $\mu\text{m}$ ) no Laboratório de Análises Químicas do Centro de Tecnologia do Gás (CTGÁS) do SENAI/RN.

A finura indica a área superficial do material, o que impacta significativamente nas propriedades reativas. Essa análise foi executada por meio de percentual retido nas peneiras nº 200, conforme Figura 26.

**Figura 26 - Ensaio de finura pela peneira 200.**



Fonte: Autor

### *Caracterização Mineralógica*

Para a identificação das fases mineralógicas presentes em um material fez-se uso da técnica de difração de raios X que se representa uma importante ferramenta para a verificação da organização das moléculas em sua formação.

A preparação do material deu-se por moagem com a utilização de grau e pistilo até passar pela peneira nº 200, sendo então acondicionado em porta-amostras de alumínio para análise no equipamento utilizado foi o XRD-6000 da marca Shimadzu.

A análise consiste na emissão de raios x que ao atingirem um material podem ser espalhados elasticamente, sem perda de energia pelos elétrons de um átomo (dispersão ou espalhamento coerente). O fóton de raios x após a colisão com o elétron muda sua trajetória, mantendo, porém, a mesma fase de energia do fóton incidente. Sob o ponto de vista da física ondulatória, pode-se dizer que a onda eletromagnética é instantaneamente absorvida pelo elétron e retida; cada elétron atua, portanto, como centro de emissão de raios X.

#### *Caracterização Química*

Os componentes químicos foram identificados e quantificados por meio da técnica de espectrometria por fluorescência de raios X (FRX). Sendo uma técnica bastante utilizada, a FRX baseia-se no princípio de que a absorção de raios X pelo material provoca excitação dos átomos o que acarreta uma radiação denominada fluorescência. Os raios emitidos têm comprimento de onda diferente para cada um dos elementos, o que proporciona sua identificação, a partir da comparação com padrões devidamente calibrados. Testes para obtenção dos dados de perda ao fogo e teores de carbono e enxofre também foram executados, estas análises foram realizadas pelo SENAI/RN.

#### *Caracterização Microscópica*

As imagens microscópicas foram geradas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), onde foi possível visualizar a forma e tamanho dos grãos, bem como confirmar a composição química das partículas a partir dos padrões de energia dos elementos químicos com a utilização do Espectrômetro por Energia Dispersiva (EDS) acoplado ao instrumento.

O princípio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente. Por um sistema de bobinas de deflexão, o feixe pode ser guiado de modo a varrer a superfície da amostra segundo uma malha retangular. O sinal de imagem resulta da interação do feixe incidente com a superfície da amostra. O sinal recolhido pelo detector é utilizado para modular o brilho do monitor, permitindo a observação.

### 3.1.2 Variáveis da pesquisa

#### *Variáveis dependentes*

- Viscosidade;
- Módulo de cisalhamento dinâmico;
- Ângulo de fase;
- Percentual de recuperação;
- Microestrutura dos fíleres.

#### *Variáveis independentes*

- Percentual de adição dos resíduos em relação a massa de betume;
- Tipo de resíduos (RBRO e EMA).

#### *Fatores constantes*

Para possibilitar comparativos, alguns fatores são comumente mantidos constantes. Para todos os experimentos desta pesquisa foram fatores constantes:

- Origem dos materiais;
- Relação fíler/betume;
- Preparação e moldagem das amostras.

#### *Variáveis de controle*

- Frequência;
- Amplitude de deformação;
- Temperatura de ensaio;
- Envelhecimento das amostras;
- Taxa de cisalhamento.

## 3.2 Materiais

### 3.2.1 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)

O CAP utilizado para o desenvolvimento deste trabalho é um produto derivado do petróleo brasileiro proveniente do Campo Fazenda Alegre, no Espírito Santo e processado na refinaria Petrobras/Regap, a partir da destilação a vácuo do petróleo. Este CAP foi caracterizado por penetração como sendo um CAP 50/70 e de acordo com a

classificação Superpave como um PG 70-28. Suas características são apresentadas na Tabela 10.

**Tabela 10 - Características do CAP 50/70.**

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	ASTM D5	50 a 70	53	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	ASTM D 36	46 min	50,8	Grau °C
Viscosidade Brookfield 135°C SP21	ASTM D 4402	274 min	323	cp
Viscosidade Brookfield 150°C SP21	ASTM D 4402	112 min	167	cp
Viscosidade Brookfield 177°C SP21	ASTM D 4402	57 a 285	63	cp
RTFOT – Penetração Retida	ASTM D 5	55 min	68	%
RTFOT – Aumento do Ponto de Amolecimento	ASTM D 36	8 max	3,6	Grau C
RTFOT – Ductilidade 25°C	ASTM D 113	20 min	>115	Cm
RTFOT – Variação % Massa	ASTM D 2872	-0,50 a 0,50	-0,069	%
Ductilidade 25°C	ASTM D 113	60 min	>150	Cm
Solubilidade no Tricloroetileno	ASTM D 2042	99,5 min	99,8	% massa
Ponto de Fulgor	ASTM D 92	235 min	318	Grau C
Suscetibilidade Térmica	ASTM X 018	-1,5 a 0,7	-0,9	N/A
Densidade relativa	ASTM D70	-	1,007	N/A

Fonte: Laboratório REGAP conforme ensaios da especificação ANP realizados na própria refinaria.

### 3.2.2 Resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO)

O Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) utilizado nesta pesquisa foi o mesmo utilizado por Gottardi *et al.*, (2013) onde o processo para geração do resíduo constitui no seguinte: os resíduos eliminados no processo de corte dos blocos foram encaminhados através de canaletas ou tubulações aos silos de armazenagem e decantação; em seguida são levados ao filtro prensa, para diminuir seu teor de umidade assim, parte da água retirada do resíduo é tratada e reaproveitada no processo retornando por bombeamento, ficando o resíduo com umidade reduzida, em torno de 20%, estocado nos pátios das empresas.

O material foi coletado e encaminhado ao Laboratório de Materiais de Construção (LEMAC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Em laboratório, o resíduo foi submetido à secagem em estufa (105 °C) e posteriormente destorroado com auxílio do almofariz e da mão-de-grau. Após esse processo o resíduo passou pela peneira de malha quadrada com abertura de 0,075 mm, atendendo plenamente à especificação em vigor no DNIT para materiais de enchimento ou fíler, conforme do DNER-EM 367/97 (DNER, 1997). A amostra foi homogeneizada, quarteada e estocada em sacos plásticos. Na Figura 27 apresenta-se uma parte da amostra do Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais, na Figura 28 a granulometria das partículas feitos através do ensaio de peneiramento, assim como a distribuição granulométrica

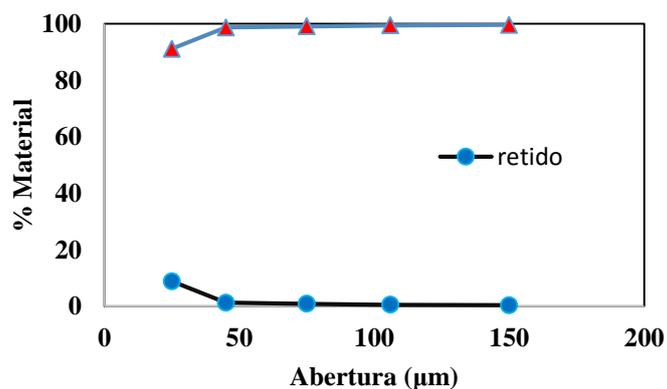
apresentada na Tabela 11, na Figura 29 os compostos químicos mais comuns encontrados no resíduo feito através de ensaio de difração de raio X e por fim a Tabela 12 da análise química semiquantitativa do resíduo RBRO. O valor da massa específica encontrado foi de 2,99 g/cm<sup>3</sup>.

**Figura 27 - Amostra do Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais.**



Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 28 - Diâmetro das partículas de RBRO**



Fonte: Autor.

**Tabela 11 - Distribuição granulométrica RBRO.**

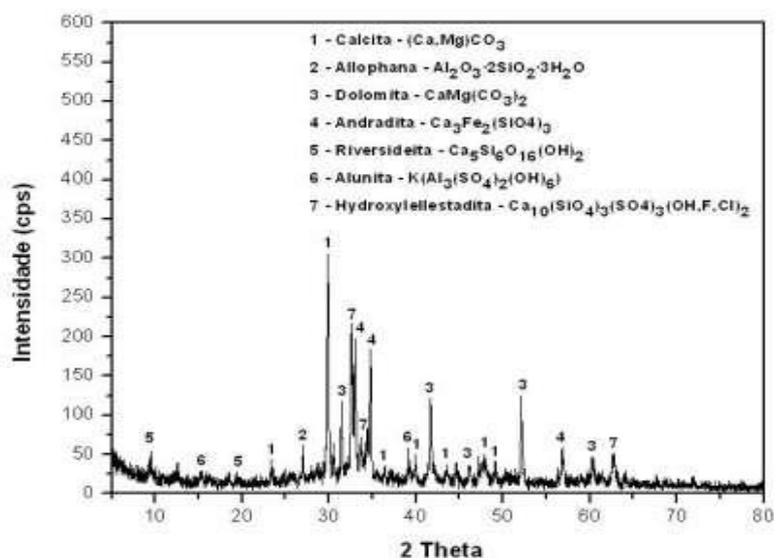
Abertura (µm)	Retido (%)	Passante (%)
150	0,40	99,60
106	0,60	99,40
75	0,90	99,10
45	1,30	98,70
25	8,89	91,11
0		100,00

Fonte: Autor

A partir dos dados apresentados na Tabela 11 podemos concluir que o resíduo RBRO irá atuar como fíler ativo, ou seja, possui um percentual considerável de partículas com dimensões inferiores a 25 µm (BARRA *et al.*, 2005; BARRA e MOMM, 2008;

RADFORD, 1916; MOTTA e LEITE, 2000; Lucena *et al.* 2004). Essa natureza do material classificado como filler ativo de acordo com a dimensão das partículas é responsável por aumentar a viscosidade do ligante, alterando o ponto de amolecimento, diminuindo a susceptibilidade térmica e aumentando a resistência a deformação. Essa atividade do filler faz com que o mástique tenha maior viscosidade que o CAP virgem

**Figura 29 - Características químicas das partículas de RBRO.**



Fonte: Autor

**Tabela 12 - Resultado da análise química semiquantitativa da amostra RBRO.**

RBRO	
Óxidos	(%)
CaO	47,89
SiO <sub>2</sub>	23,57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,20
SO <sub>3</sub>	5,12
MgO	4,51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,60
K <sub>2</sub> O	0,79
TiO <sub>2</sub>	0,26
MnO	0,18
SrO	0,18
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03
CuO	0,01
ZnO	0,01
P.F.	4,65

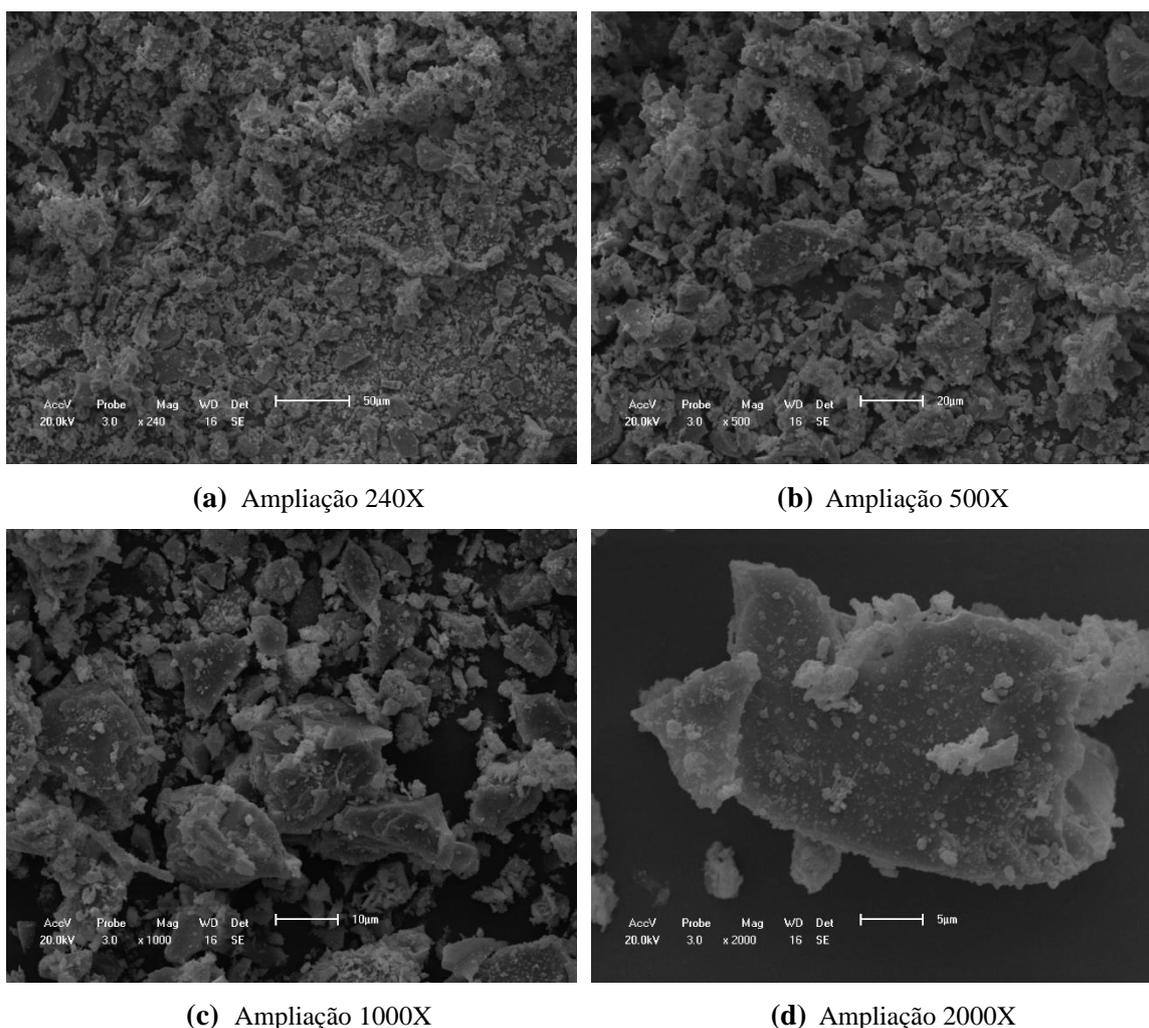
Fonte: Autor

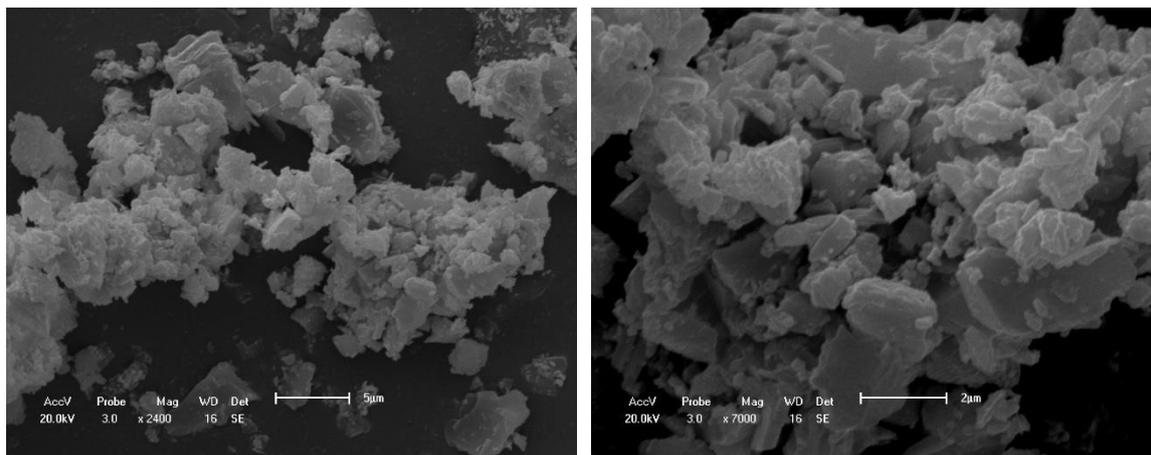
Observa-se predominância de óxido de cálcio (CaO), sílica (SiO<sub>2</sub>) e, seguidamente, do feldspato alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). A grande concentração de óxido de cálcio é favorável para as misturas asfálticas tendo em vista que este material reduz a formação de afundamento de trilhas de roda, trincamento por envelhecimento, como também, o trincamento por

fadiga (LITTLE et al., 2006). A concentração de 23,57% demonstra que o material tenha uma concentração considerável de impureza, acima de 8, conforme parâmetro indicado na classificação de GUIMARÃES (1952). Esta impureza pode prejudicar a adesividade na interface agregado/CAP.

As micrografias do resíduo apresentadas na Figura 30 mostram que os grãos não apresentam uma forma definida possuindo, em geral, um formato lamelar devido ao processo de serragem das rochas. Apesar da forma do grão contribuir para o intertravamento dos grãos, o resíduo apresenta uma textura lisa, o que aliado a considerável concentração de impureza, pode prejudicar na adesividade com o ligante. Ainda com as micrografias apresentarem grãos de dimensão entre 2 a 25  $\mu\text{m}$ , e alguns um pouco maiores na ordem dos 50  $\mu\text{m}$  e a análise granulométrica demonstrar que mais de 91% dos grãos passarem na peneira de 25  $\mu\text{m}$ , pode-se concluir que o resíduo irá atuar mais como fíler ativo do que na formação do esqueleto mineral da mistura.

**Figura 30 - Micrografias do RBRO.**





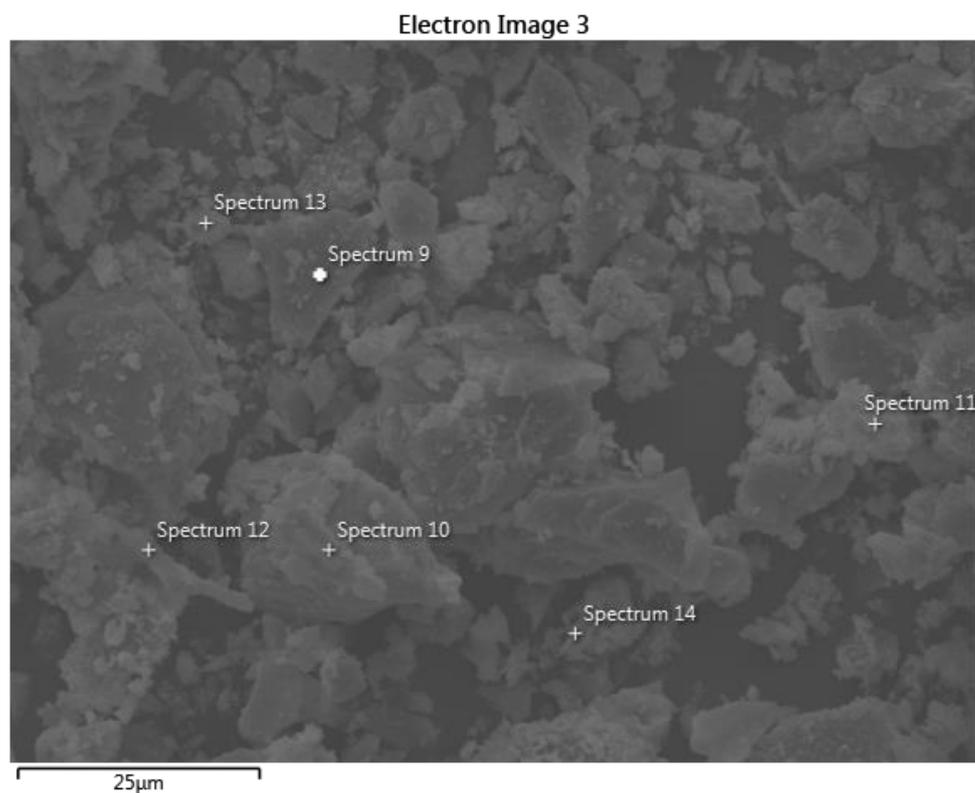
(e) Ampliação 2400X

(f) Ampliação 7000X

Fonte: Autor.

O ensaio de Espectrometria por Energia Dispersiva (EDS) foi realizado em diferentes pontos e regiões das imagens, identificadas para o RBRO na Figura 31.

**Figura 31 - Pontos e regiões analisadas no EDS para o RBRO.**



Fonte: Autor

**Tabela 13 - Resultado da análise química do EDS para o RBRO.**

	O	Ca	Si	C	Fe	Al	Mg	Cu	Cr
<b>Espectro 9</b>	41,9	40,1	9,0	5,0	1,6	0,8	0,5	1,0	0,4
<b>Espectro 10</b>	43,5	36,9	9,6	5,9	1,5	1,2	0,9	0,6	-
<b>Espectro 11</b>	35,3	41,7	10,2	-	4,5	4,0	2,7	1,6	-
<b>Espectro 12</b>	59,1	16,5	2,7	17,8	1,4	1,4	0,5	-	-
<b>Espectro 13</b>	35,6	41,9	11,2	-	3,6	3,8	1,9	2,0	-
<b>Espectro 14</b>	33,4	48,2	7,8	-	4,3	2,8	1,5	1,3	0,7

Fonte: Autor

Observa-se, pela Tabela 13, que o resíduo é constituído, principalmente de oxigênio (O), seguido por Cálcio (Ca) e Silício (Si). Tais resultados complementam os encontrados através da espectrometria de fluorescência de raios X.

### 3.2.3 Escória moída de aciaria (EMA)

Assim como o resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO), a escória moída de aciaria também foi a mesma utilizada por Gottardi *et al* (2013), sendo a origem do material a Escória de Aciaria com Redução de Expansão - ACERITA®, fornecida pela ArcelorMittal. A empresa está localizada em Jardim Limoeiro, Serra, próximo ao Porto de Praia Mole, na região da Grande Vitória/ES.

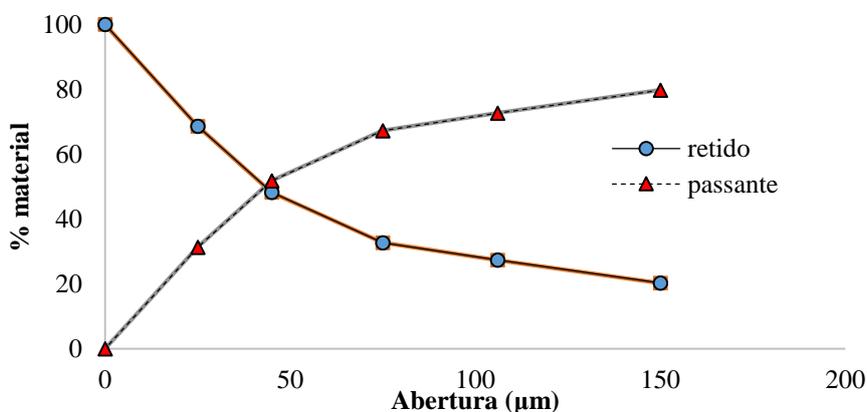
As amostras de ACERITA® foram coletadas e enviadas ao LEMAC-UFES, onde foram submetidas a secagem em estufa (105°C), moídas através do moinho de argolas, com o objetivo de reduzir o diâmetro de suas partículas, peneirado em peneira de malha quadrada de abertura 0,075mm, homogeneizada, quarteada e estocada em sacos plásticos. A textura final do resíduo pronto para aplicação na mistura pode ser visualizada na Figura 32. Na Figura 33 a granulometria das partículas obtida do ensaio de peneiramento, assim como a composição granulométrica apresentada na Tabela 14 e na Figura 34 estão apresentados os elementos químicos mais comuns encontrados nas partículas de Escória Moída de Aciaria feito através de ensaio de difração de raio X e por fim a Tabela 15 da análise química semiquantitativa do resíduo.

Figura 32 - Amostra da Escória de Aciaria.



Fonte: Autor.

Figura 33 - Diâmetro das partículas de Escória Moída de Aciaria.



Fonte: Autor.

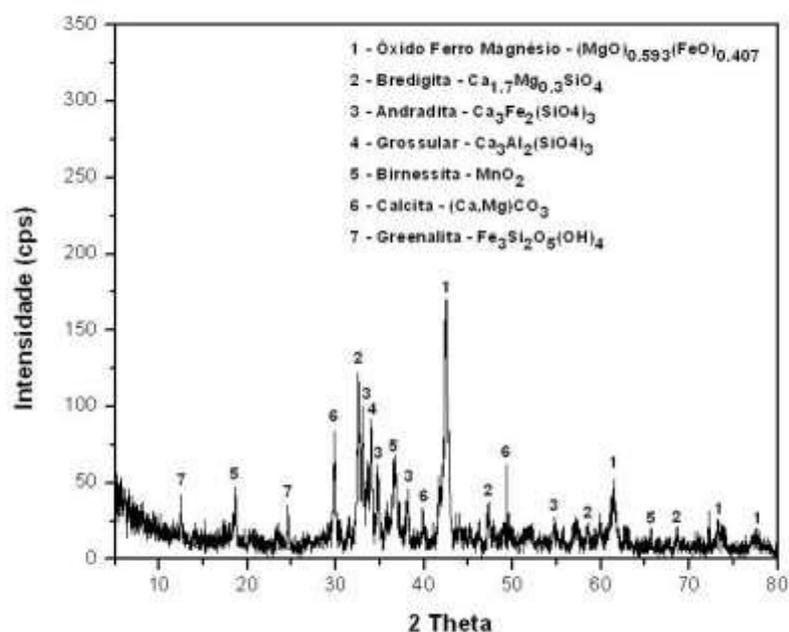
Tabela 14 - Distribuição granulométrica EMA.

Abertura (µm)	Retido (%)	Passante (%)
150	20,26	79,74
106	27,35	72,65
75	32,73	67,27
45	48,2	51,8
25	68,66	31,34
0	100	-

Fonte: Autor

A partir dos dados apresentados na Tabela 14 pode-se concluir que parte do resíduo de EMA irá atuar como fíler inerte, que contribui na formação do esqueleto mineral da mistura, preenchendo os vazios entre os agregados graúdos e miúdos, e aderindo aos agregados graúdos, atuando, em vários casos, como melhoradores de adesividade, e parte irá atuar como fíler ativo, responsável por aumentar a viscosidade do ligante, alterando o ponto de amolecimento, diminuindo a susceptibilidade térmica, e aumentando a resistência a deformação.

Figura 34 - Características químicas das partículas de Escória Moída de Aciaria.



Fonte: Autor

Tabela 15 - Resultado da análise química semiquantitativa da amostra EMA.

EMA	
Óxidos	(%)
CaO	36,78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,36
SiO <sub>2</sub>	14,17
MgO	11,54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,55
MnO	3,83
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,94
TiO <sub>2</sub>	0,38
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,16
SO <sub>3</sub>	0,14
SrO	0,10
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02
CuO	0,02
NiO	0,01
P.F.	N.A.*

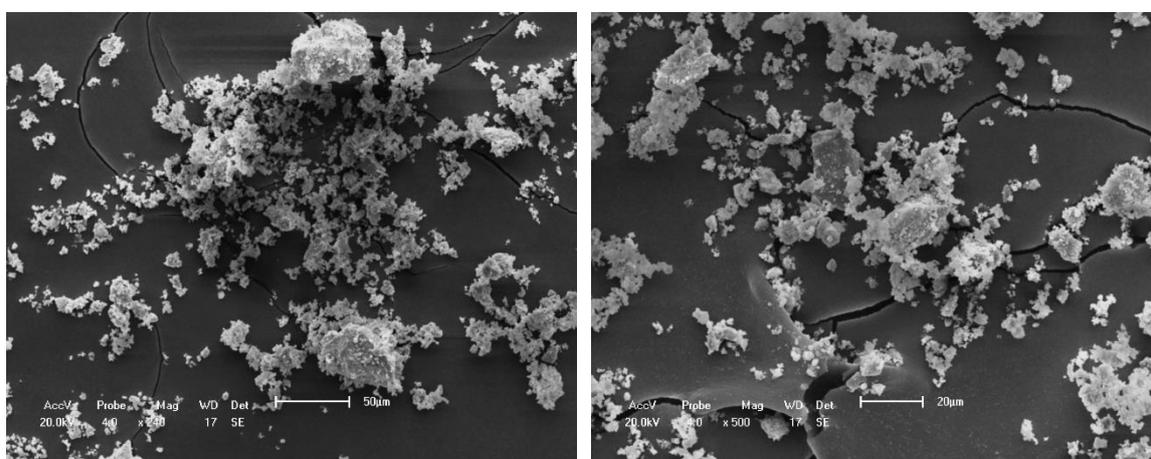
Fonte: Autor

Observa-se, na Tabela 15, a predominância de óxido de cálcio (CaO), do óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e, seguidamente, do óxido de Silício (SiO<sub>2</sub>). O Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presente na escória contribui para o maior enrijecimento da mistura asfáltica, porém em condições climáticas de baixas temperaturas pode proporcionar a formação de trincas e fissuras no revestimento asfáltico. O resíduo utilizado apresenta menores teor sílica em relação ao RBRO, todavia, a concentração de 14,17% demonstra que, assim como o RBRO, o material também é considerado impuro, conforme parâmetro indicado na classificação

de Guimarães (1952), o que pode levar a problemas de adesividade entre o agregado e o ligante asfáltico.

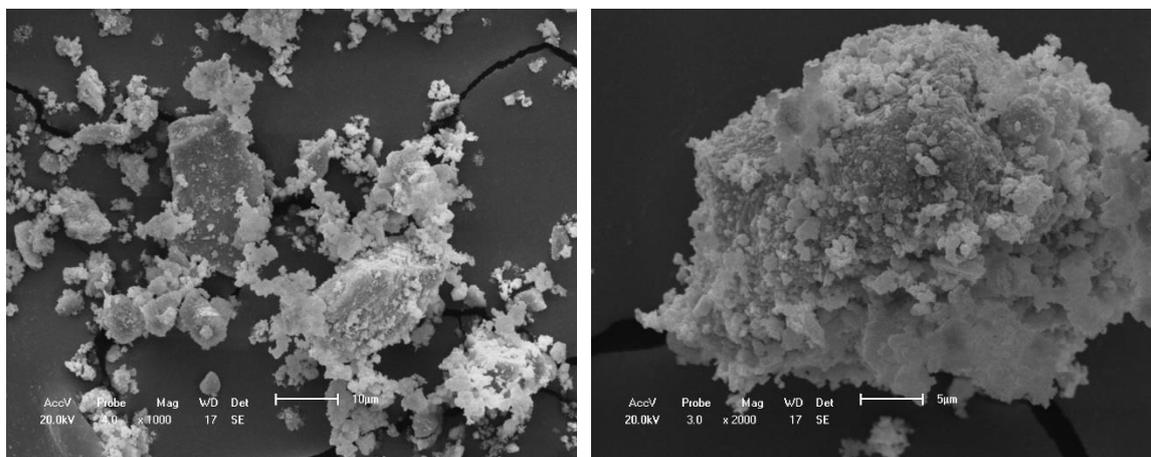
As micrografias do resíduo apresentadas na Figura 35 mostram que os grãos apresentam uma forma, em geral, um formato anguloso, com grãos de dimensão entre 2 a 25  $\mu\text{m}$ , e alguns um pouco maiores na ordem dos 50  $\mu\text{m}$ . A forma do grão contribui para o intertravamento dos grãos, assim como apresenta uma textura áspera, que aliado a menor concentração de impureza, pode apresentar melhor adesividade do que o resíduo RBRO.

**Figura 35 - Micrografias do EMA.**



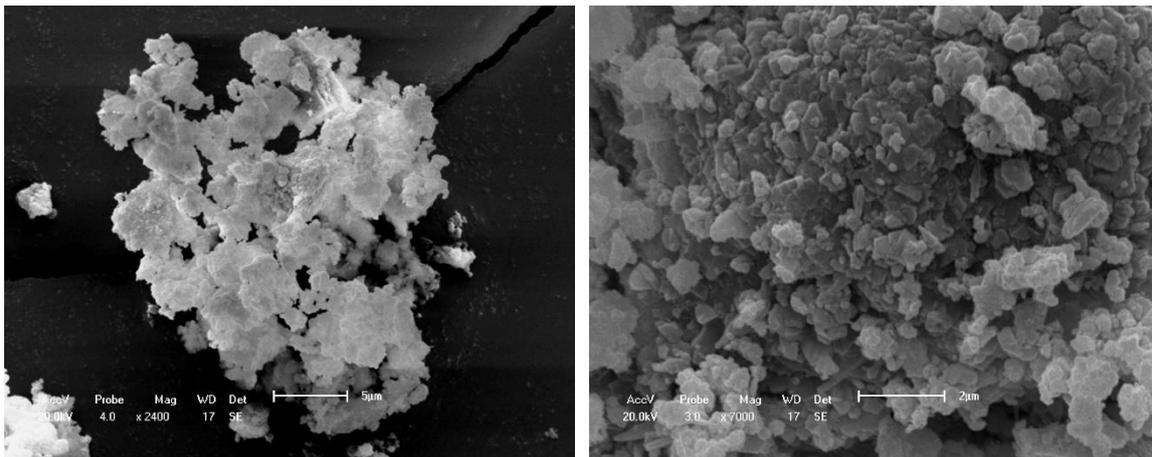
**(a)** Ampliação 240X

**(b)** Ampliação 500X



**(c)** Ampliação 1000X

**(d)** Ampliação 2000X



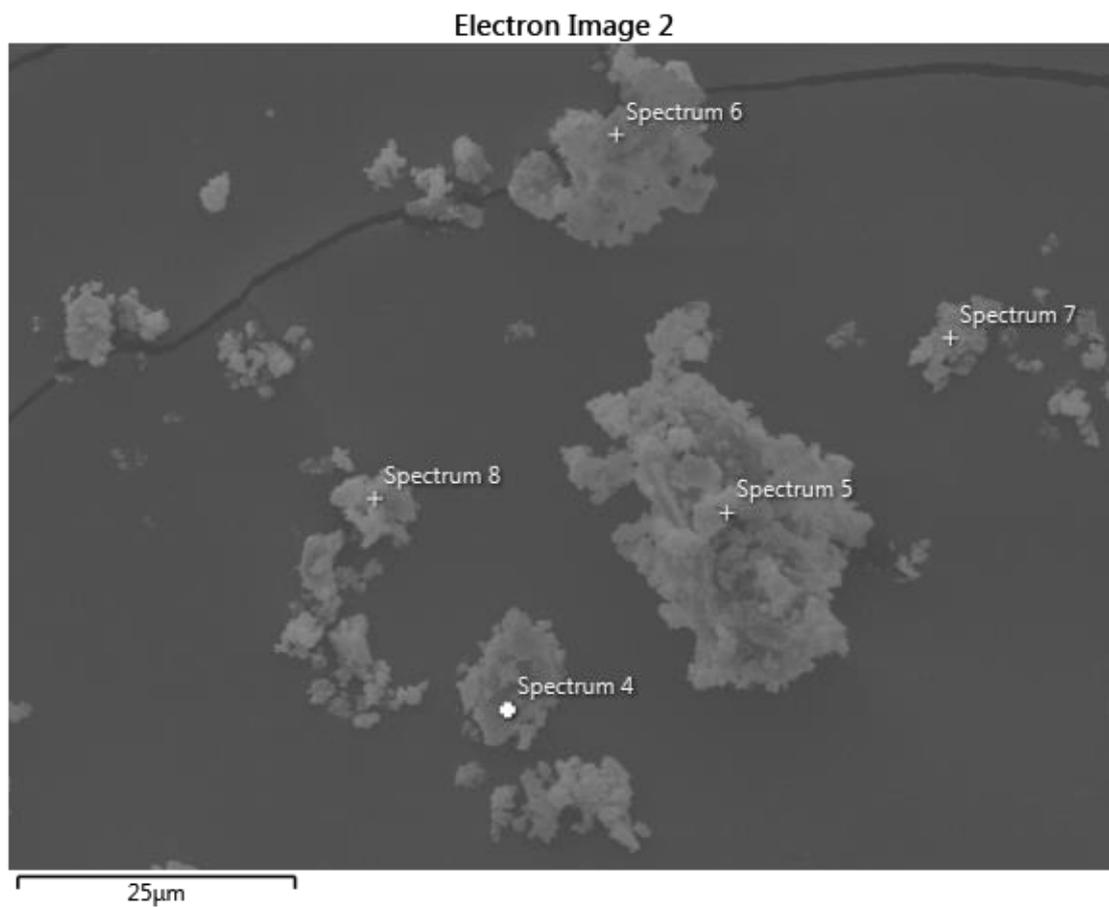
(e) Ampliação 2400X

(f) Ampliação 7000X

Fonte: Autor

O ensaio de Espectrometria por Energia Dispersiva (EDS) foi realizado em diferentes pontos e regiões das imagens, identificadas para o EMA na Figura 36 e os resultados para o percentual dos elementos químicos presentes encontram-se na Tabela 16.

**Figura 36 - Pontos e região analisados no EDS para o EMA.**



Fonte: Autor

**Tabela 16 - Resultado da análise química do EDS para o EMA.**

	O	C	Ca	Fe	Cu	Si	Mg	Cr	Al
<b>Espectro 4</b>	59,2	18,7	14,7	3,8	1,3	1,3	0,4	0,4	0,4
<b>Espectro 5</b>	64,6	22,2	6,2	3,6	1,0	0,8	0,3	0,3	0,3
<b>Espectro 6</b>	65,3	22,7	4,4	4,5	1,0	0,6	0,5	0,4	0,3
<b>Espectro 7</b>	67,0	23,8	3,4	3,0	1,0	0,4	0,4	0,3	0,3
<b>Espectro 8</b>	67,0	23,9	3,9	3,6	1,2	0,4	-	-	-

Fonte: Autor

Observa-se que o resíduo é constituído, principalmente de oxigênio (O), seguido por Carbono (C) e Cálcio (Ca). Tais resultados complementam os encontrados através da espectrometria de fluorescência de raios X.

### 3.3. MÉTODOS

Os principais métodos adotados foram definidos com base na revisão bibliográfica de forma que fosse possível identificar as propriedades reológicas do mástiques utilizando os resíduos RBRO e EMA.

#### 3.3.1 Metodologia de mistura para a fabricação dos mástiques

Um dos objetivos desse trabalho é correlacionar os resultados obtidos através da avaliação das propriedades reológicas de mástiques com os resultados encontrados no estudo proposto por Gottardi *et al.* (2013), no qual foi verificada a influência do fíler no comportamento mecânico de concretos asfálticos produzidos com a incorporação de Resíduos de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) e de Escória Moída de Aciaria (EMA) através de ensaios de estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração por compressão diametral, desgaste Cântabro e dano por umidade (Ensaio de Lottman Modificado). No estudo de Gottardi foram utilizados os percentuais de 2%, 3% e 4% de fíler em relação ao teor de ligante na mistura asfáltica completa. A Tabela 17 mostra os diferentes teores de CAP encontrados através da Dosagem Marshall por Gottardi *et al.* (2015) para as misturas asfálticas completas estudadas pelos autores com diferentes percentuais de fíleres.

**Tabela 17 - Percentual de material para formação do mástique.**

<b>Materiais</b>	<b>EMA (2%)</b>	<b>EMA (3%)</b>	<b>EMA (4%)</b>	<b>RBRO (2%)</b>	<b>RBRO (3%)</b>	<b>RBRO (4%)</b>	<b>50%EMA 50% RBRO (2%)</b>	<b>50%EMA 50% RBRO (3%)</b>	<b>50%EMA 50% RBRO (4%)</b>
<b>Teor de CAP de projeto (%)</b>	5,21	5,23	5,30	5,21	5,11	5,26	5,17	5,01	5,02
<b>Fíler (%)</b>	1,90	2,84	3,79	1,90	2,85	3,79	1,90	2,85	3,80
<b>f/b</b>	0,36	0,54	0,72	0,36	0,56	0,72	0,36	0,57	0,76

Fonte: Adaptado de Gottardi *et al.* (2015).

No estudo de Gottardi *et al.* (2015), houve uma pequena variação na relação f/b dependendo do tipo de resíduo adicionado. No entanto, para melhor comparação do efeito dos diferentes tipos de resíduo no comportamento reológico, optou-se por fixar a relação f/b para todas as amostras estudadas dentro de uma mesma categoria de adição. Assim, foram estudadas as relações f/b de 0,36; 0,54 e 0,72 para os mástiques de RBRO, EMA e mistura RBRO/EMA. Foram preparadas amostras de 350g utilizando as proporções fíler/betume em massa, conforme Tabela 18.

**Tabela 18 - Composição de material para amostra de 350g.**

<b>Materiais</b>	<b>EMA (2%), RBRO (2%), 50%EMA 50% RBRO (2%)</b>	<b>EMA (3%), RBRO (3%), 50%EMA + 50% RBRO (3%)</b>	<b>EMA (4%), RBRO (4%), 50%EMA + 50% RBRO (4%)</b>
<b>Fíler</b>	93,5	123,7	147,6
<b>CAP</b>	256,5	226,3	202,4

Fonte: Autor

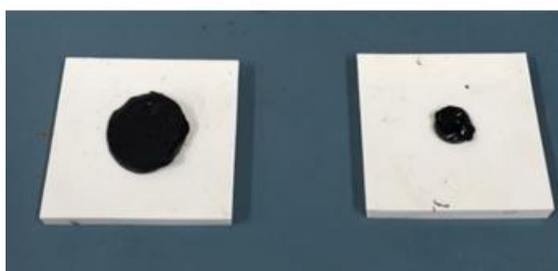
Neste estudo as amostras de mástiques foram preparadas com auxílio de agitador mecânico de baixo cisalhamento e hélice cisalhante, ilustrado na Figura 37. As misturas foram realizadas a uma temperatura de  $150 \pm 5$  °C, rotação de 800 rpm, por um período de 30 min. Em seguida, o material foi colocado em molde de silicone de dimensões de 25mm e 8mm, conforme Figura 38. As massas dos materiais foram estabelecidas numa balança eletrônica digital de precisão de 0,01g.

**Figura 37 - Agitador mecânico de baixo cisalhamento.**



Fonte: Autor

**Figura 38 - Dimensões amostras dos mástiques, 25 e 8mm de diâmetro.**



Fonte: Autor

### **3.3.2 Envelhecimento dos Mástique**

#### *Envelhecimento Oxidativo em Estufa de Filme Fino Rotativo*

Os mástiques foram, primeiramente, envelhecidos utilizando uma estufa de filme fino rotativo (Rolling Thin Film Oven Test - RTFOT) (fabricante DESPATCH), conforme o ASTM D2872 (1997), no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Este método de teste aponta mudanças nas propriedades do asfalto que podem ocorrer durante a usinagem a 150 °C, verificadas por variações nas medidas reológicas.

Em recipientes de vidros foram pesadas aproximadamente 35 g de amostra. As amostras foram aquecidas a 163 °C por 85 minutos. A especificação Superpave considera a alteração das propriedades reológicas ocorridos após o envelhecimento do CAP para a determinação grau de desempenho (PG) do ligante.

#### *Envelhecimento Oxidativo em Sistema de Vaso de Pressão*

O estudo que simula o envelhecimento das amostras de 5 a 10 anos de serviço também foi realizado, baseado na norma ASTM D6521 (2003), em um vaso de pressão (Pressure

Aging Vessel - PAV) (fabricante Prentex, modelo 9300) no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da UFC. Como o asfalto para ser aplicado em campo deve ser primeiramente usinado, o ensaio no PAV é precedido de um ensaio na estufa RTFOT. Assim, 50 g de amostras obtidas após o RTFOT foram envelhecidas a temperatura de 100 °C por 20 h em vaso pressurizado com 2,10 MPa de ar.

### 3.3.3 Ensaio Reológicos

#### *Ensaio Oscilatórios*

Para a realização dos ensaios oscilatórios (varredura de deformação e frequência) e para o ensaio de recuperação de fluência foi utilizado um reômetro de cisalhamento dinâmico modelo AR 2000ex (TA Instruments), ilustrado na Figura 39. Suas características são apresentadas na Tabela 19.

**Figura 39- Reômetro rotacional AR 2000ex.**



Fonte: Autor

**Tabela 19 - Características do reômetro rotacional AR 2000ex.**

Torque	0,03 $\mu$ N.m – 200mN.m
Frequência	$7,5 E^{-7}$ – 628 rad/s
Velocidade angular	0 – 300 rad/s
Força normal	0,005 – 50 N

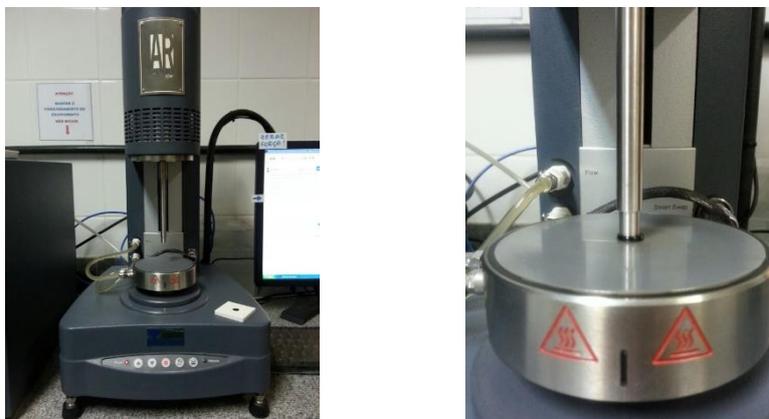
Fonte: TA Instruments, 2011.

O reômetro possui seu próprio programa, onde são gerados os dados com seus respectivos gráficos e apresentados em um computador que se encontra acoplado ao equipamento.

Existem diversos tipos de geometria para a realização do ensaio oscilatório. Foram escolhidas as geometrias de placas paralelas, que possui diâmetro de 8 mm e espaçadas de 2 mm, e de 25mm e espaçadas de 1mm, ilustradas na Figura 40 que é uma das

geometrias utilizadas em normas internacionais. Para manter as amostras nas temperaturas de ensaio, utilizar-se-á um dispositivo protetor (peltier).

**Figura 40 - Geometria de placas paralelas com peltier.**



Fonte: Autor

#### *Ensaio Oscilatório de varredura de deformação (Strain Sweep)*

O ensaio de Varredura de Deformação foi realizado nos mástiques estudados com a finalidade de se definir a taxa de deformação na qual o material estaria dentro da faixa Limite de Viscoelasticidade Linear, não sujeitando, portanto, as amostras a danos que pudessem introduzir não linearidade ao material. Assim, aplicou-se uma oscilação de amplitude de deformação entre  $10^{-5}$  e  $10^{-1}$  a uma temperatura de  $64\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $0,1\text{Hz}$  nas amostras de  $25\text{mm}$  e  $10^{\circ}\text{C}$  e  $10\text{Hz}$  nas amostras de  $8\text{mm}$ .

A deformação crítica foi estabelecida como a deformação correspondente no ponto anterior ao ponto onde o valor da componente elástica  $G'$  do módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) teve uma redução de 5%, onde ocorre a fragmentação da estrutura, conforme relatório de análise térmicas (TS-61) publicado pela *TA Instruments*. Esta deformação então foi fixada para realização do ensaio oscilatório de varredura de frequência.

#### *Ensaio Oscilatório de varredura de frequência (Frequency Sweep)*

Com a deformação crítica estabelecida pelo ensaio de varredura de deformação, foi realizado o ensaio de varredura de frequência em amostras de  $25\text{mm}$ , oscilando as frequências entre  $0,1$  e  $10\text{Hz}$  para o intervalo de temperaturas de  $10$  a  $70^{\circ}\text{C}$ .

Tendo-se em vista o comportamento termoreologicamente simples dos ligantes asfálticos, as curvas mestras foram construídas utilizando-se o princípio da superposição tempo-temperatura (TTS). Obteve-se o módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e ângulo de fase  $\delta$ . Os fatores de deslocamento  $af$  foram obtidos a partir da equação de WLF

(Williams- Landel-Ferry) (eq. 1), com o auxílio do software do equipamento *Reology Advantage Data Analysis*®, adotando a temperatura de referência de 40°C.

*Ensaio Oscilatório de fluência e recuperação (Multiple Stress Creep and Recovery)*

Para o ensaio de fluência e recuperação também foi utilizado o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) com amostras de 25mm onde se aplicou uma carga constante de 1 s, removendo-a em seguida e permitindo que o material repouse por um período de tempo de 9 s. Este ciclo é repetido por 10 vezes em 11 níveis diferentes de tensão, sem intervalos de tempo entre um nível e outro nas temperaturas de 52°C, 58°C, 64°C, 70°C e 76°C. Os níveis irão variar de 100 e 3.200 Pa.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados encontrados após a caracterização reológica dos mástiques estudados bem como do ligante puro após a realização dos ensaios de Varredura de Frequência e MSCR. A partir dos resultados encontrados, são feitas algumas discussões e conclusões a respeito do desempenho encontrado para cada material.

#### 4.1. Determinação do grau de desempenho das amostras (PG)

Para a determinação do grau de desempenho (PG) foi seguido o teste proposto pelo SHRP (1994) que considera a temperatura na qual os valores de  $G^*/\text{sen}\delta$  são superiores a 1,0 kPa e 2,2 kPa, respectivamente para amostras virgens e envelhecidas no RTFOT. Segundo as especificações, estes valores são capazes de garantir a adequada resistência ao acúmulo de deformação permanente. A Tabela 20 apresenta as formulações de cada ligante asfáltico, juntamente com suas classificações PG no critério original do Superpave.

**Tabela 20 - Classificações PG das amostras em estudo.**

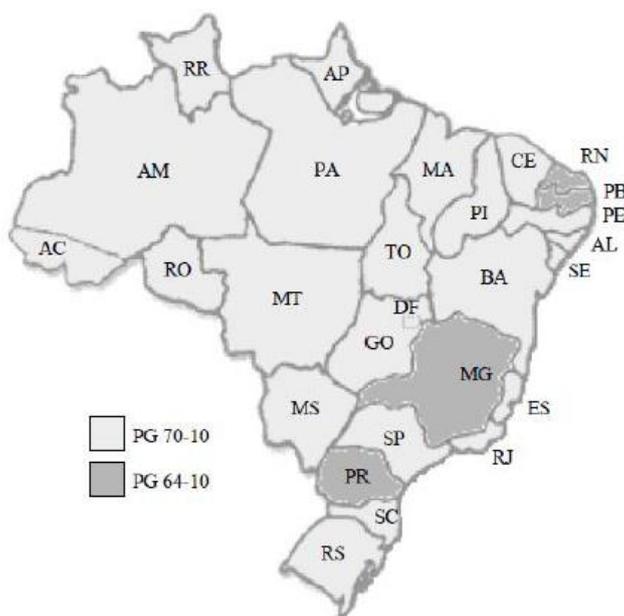
Condição de ensaio	Amostras									
	CAP	EMA	EMA	EMA	RBRO	RBRO	RBRO	EMA +	EMA +	EMA +
	50/70	2%	3%	4%	2%	3%	4%	RBRO	RBRO	RBRO
								2%	3%	4%
T (°C) onde $G^*/\text{sen}\delta > 1,0\text{kpa}$ (antes RTFOT)	64	70	70	70	64	70	76	70	70	70
T (°C) onde $G^*/\text{sen}\delta > 2,2\text{kpa}$ (após RTFOT)	64	70	70	70	64	70	76	70	70	70
<b>PG</b>	64	70	70	70	64	70	76	70	70	70

Fonte: Autor

O ligante puro utilizado neste estudo foi classificado com PG 64-XX. Com exceção do RBRO com  $f/b=0,36$  (denominado RBRO 2%), os demais mástiques apresentaram desempenho superior em temperaturas altas quando comparado ao CAP puro (valores mais elevados de PG), indicando maior resistência a formação de trilha de roda. Estes valores são relativos a classificação Superpave, conhecida como “grau a temperatura alta”, significando que os ligantes apresentam bom desempenho no pavimento, no máximo, até esse valor de temperatura encontrado. Considerando-se o clima da região do Sudeste e a temperatura alto do PG máxima dos ligantes asfálticos no Brasil é de

70°C (Figura 41), os resultados relativos a esse parâmetro podem ser considerados aceitáveis.

**Figura 41 - Grau de desempenho sugerido para ligantes asfálticos no Brasil.**



Fonte: Cunha *et al* (2007)

#### 4.2. Curvas mestras do módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ )

As propriedades viscoelásticas lineares dos mástiques foram avaliadas através da confecção de curvas mestras do módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e do ângulo de fase ( $\delta$ ) na temperatura de 40°C.

O comportamento termo-reológico viscoelástico linear pode ser determinado através de das curvas mestras. Pode-se interpretar que a baixas frequências representam o comportamento a altas temperaturas e baixas velocidades de carregamento, já a frequências elevadas representam baixas temperaturas e velocidades altas, tendo então, toda faixa de serviço do material englobada pela curva mestra.

Para construção das curvas foi considerado o princípio da superposição tempo-temperatura e utilizado o Software Trios®, em escala log-log, conforme mostrado nas Figuras a seguir.

##### 4.2.1 Comportamento reológico após envelhecimento RTFOT

Nas Figuras 42 a 44 estão demonstrados o comportamento do modulo de cisalhamento dinâmico  $|G^*|$  ao longo da frequência reduzida na temperatura de referência de 40°C.

Figura 42 - Curva mestra do  $G^*$  a temperatura de referência de 40°C das amostras  $f/b = 0,36$  após envelhecimento RTFOT.

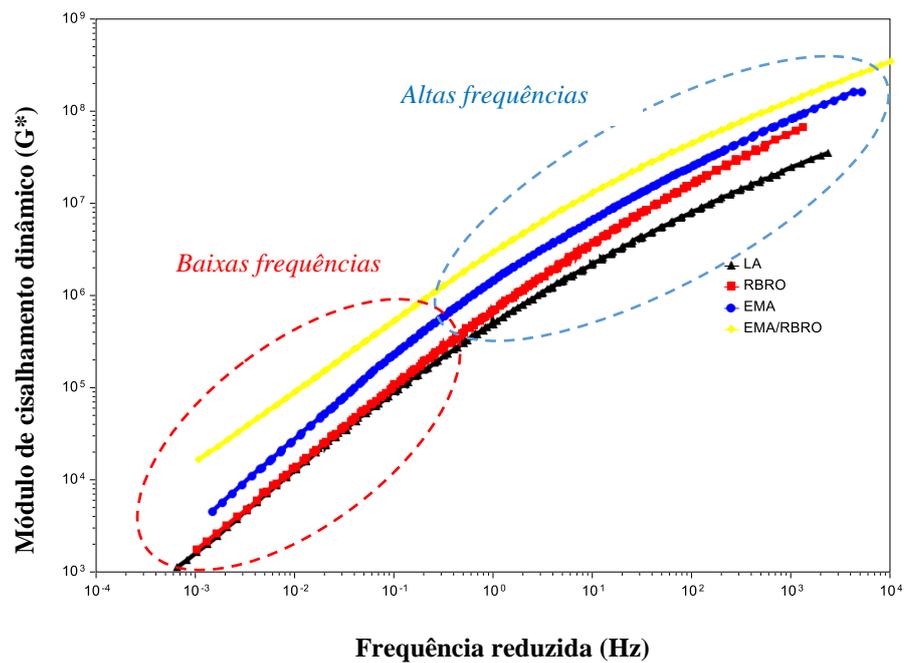


Figura 43 - Curva mestra do  $G^*$  a temperatura de referência de 40°C das amostras  $f/b = 0,54$  após envelhecimento RTFOT.

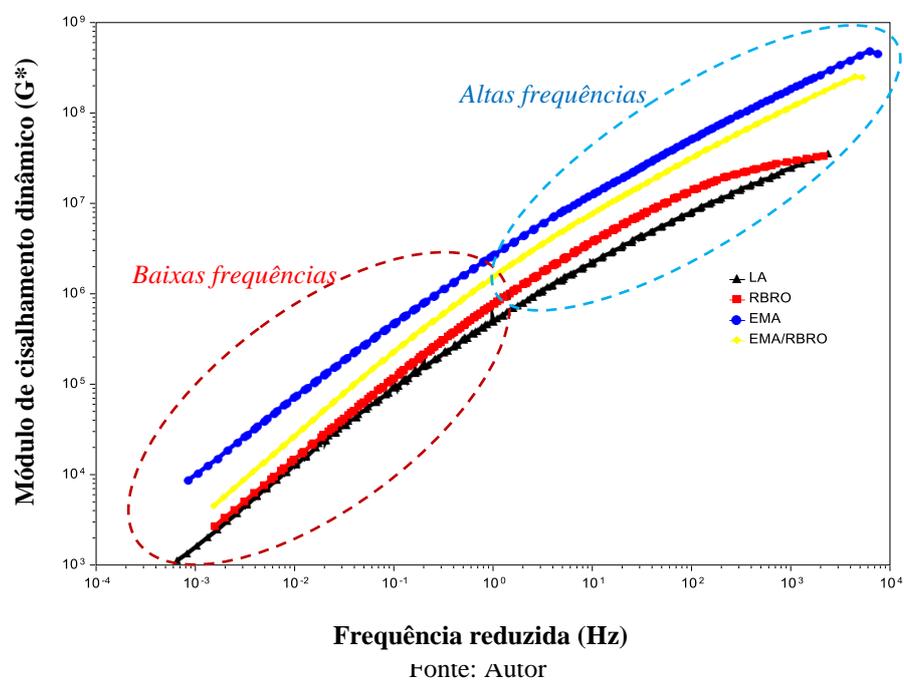
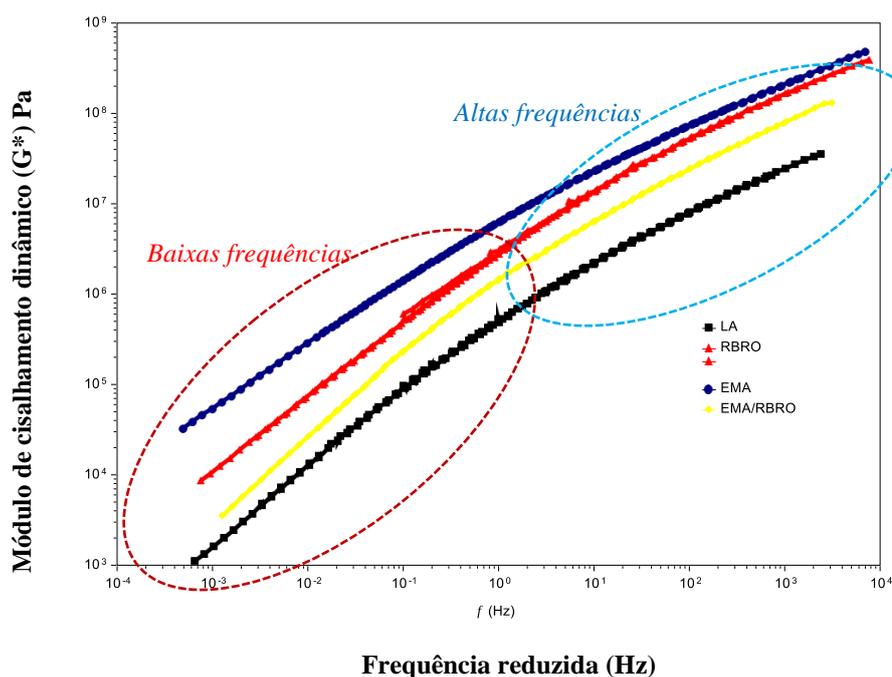


Figura 44 - Curva mestra do  $G^*$  a temperatura de referência de 40°C das amostras  $f/b = 0,72$  após envelhecimento RTFOT.



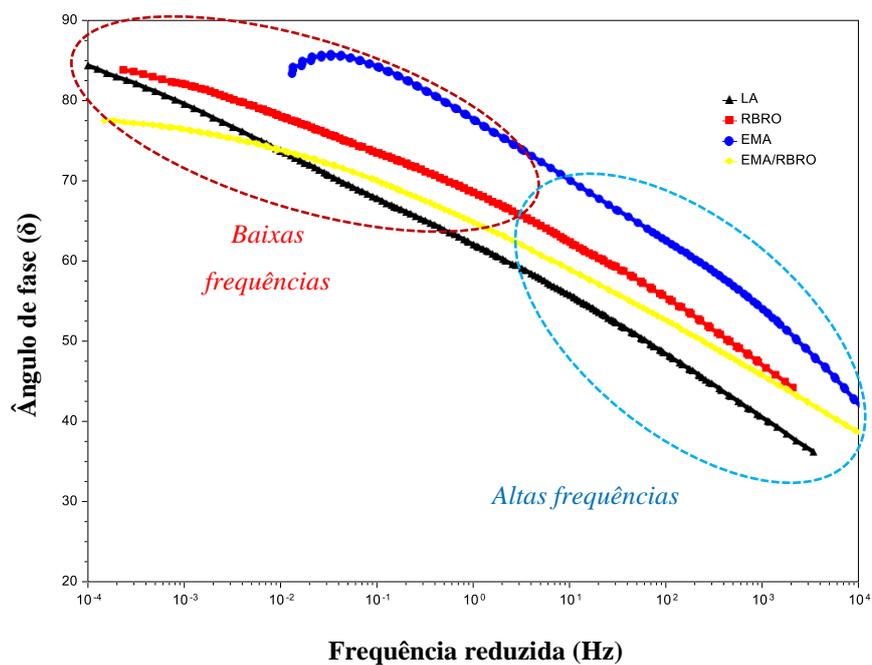
Fonte: Autor

Analisando as Figuras 43 e 44, observa-se que há um incremento no  $G^*$  nos mástiques em relação ao CAP 50/70 puro. Esse aumento na rigidez do material pode ser atribuído a adição de filer quanto também pelos efeitos químicos de compostos como CaO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que atuam aumentando a rigidez do material. Em geral, há um aumento significativo do  $G^*$  nas amostras com presença do resíduo de escória de aciaria (EMA) e da mistura EMA/RBRO, provavelmente ocasionado pelo alto teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> quando comparado ao resíduo puro de RBRO. Constata-se ainda que este aumento pode ser considerado linear em toda faixa de frequência.

Vale ressaltar na Figura 44, que o mástique com RBRO apresenta módulo de rigidez superior a mistura EMA/RBRO, diferentemente do que encontrado para  $f/b$  menores. Este aumento do módulo de cisalhamento dinâmico do resíduo RBRO, principalmente na faixa de alta frequência (baixa temperatura) pode ser atribuído ao aumento da concentração de partículas inferiores a 20  $\mu\text{m}$  (fíler ativo) responsáveis pelo aumento da rigidez da amostra, o que não foi tão evidente para concentrações  $f/b$  menores.

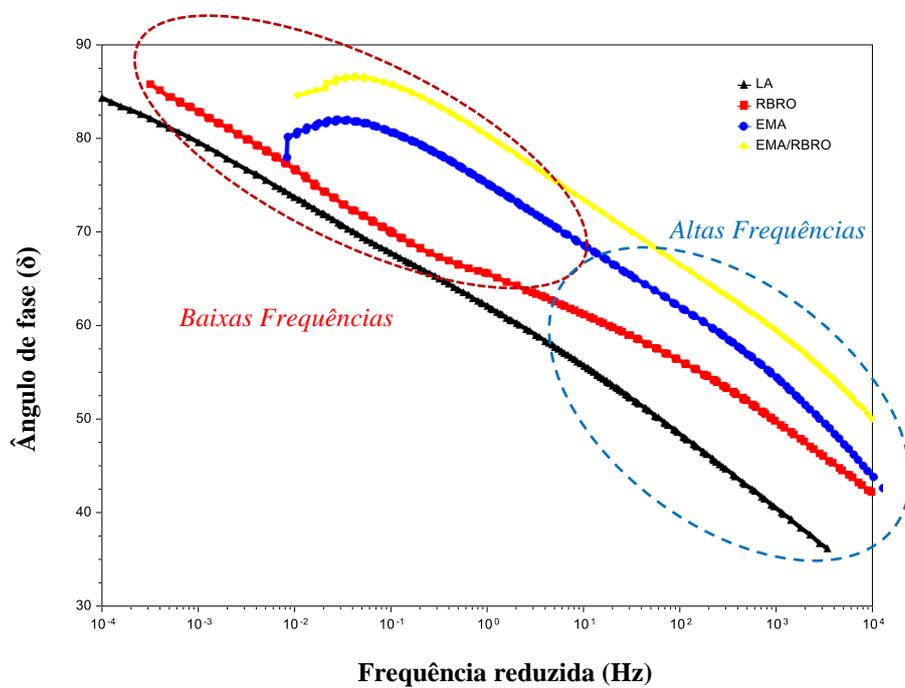
Através das curvas mestras do ângulo de fase versus frequência reduzida, Figuras 45 a 47, pode-se observar o efeito da interação entre os resíduos e o ligante.

Figura 45 - Curva mestra do  $\delta$  a temperatura de referência de 40°C das amostras  $f/b=0,36$  após envelhecimento RTFOT.



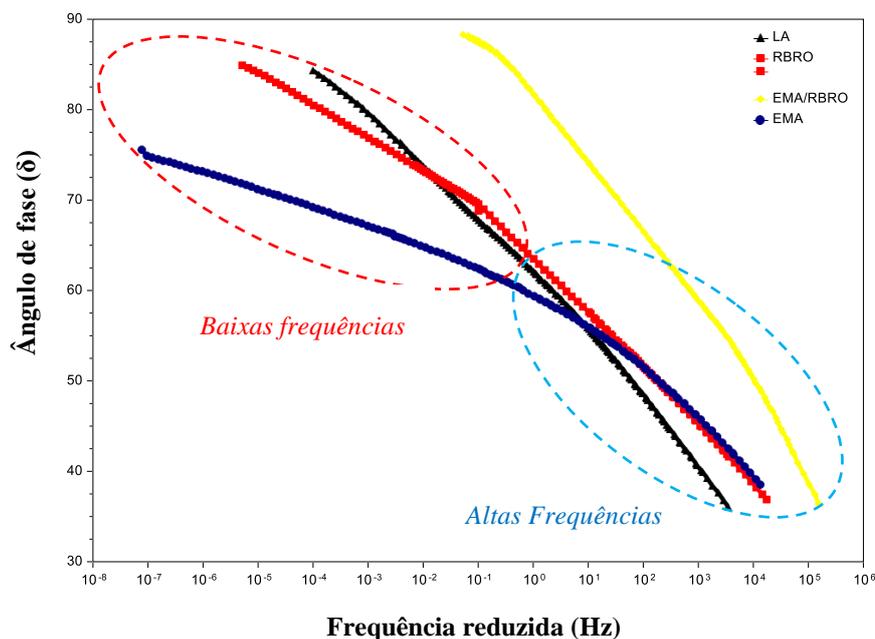
Fonte: Autor.

Figura 46 - Curva mestra do  $\delta$  a temperatura de referência de 40°C das amostras  $f/b = 0,54$  após envelhecimento RTFOT.



Fonte: Autor.

**Figura 47 - Curva mestra do  $\delta$  a temperatura de referência de 40°C das amostras f/b = 0,72 após envelhecimento RTFOT.**



Fonte: Autor.

As amostras com na proporção f/b de 0,36 (Figura 45) apresentaram em geral valores maiores de ângulo de fase ( $\delta$ ) em relação ao LA puro, a não ser por uma pequena faixa de frequência de  $10^{-4}$  a  $10^{-3}$ , onde o mástique EMA+RBRO apresentou menor valor de  $\delta$ . Quando comparados os resultados das amostras de EMA e RBRO, deve-se ser feito uma distinção nas frequências, pois as curvas se cruzam, demonstrando que o EMA apresenta menor valor de  $\delta$  em baixa frequência e o RBRO menor  $\delta$  à alta frequência. A elasticidade inferior do mástique em relação ao ligante asfáltico pode estar relacionado ao enrijecimento ocasionado pela ação do mástique em conjunto a temperatura intermediária adotada para esta análise.

Na Figura 46 observa-se que o aumento de teor de resíduo de 2% para 3% ainda não foi suficiente para que os mástiques apresentassem menores valores de  $\delta$  em relação ao ligante puro, porém nota-se que o aumento do teor de resíduo fez com que os mástiques com resíduo RBRO apresentassem menores valores de  $\delta$  em relação aos com resíduo de EMA ao longo de toda faixa de frequência. De uma maneira geral, é possível perceber um incremento do valor do ângulo de fase para as relações f/b de 0,36 e 0,54, que indica que o mástique apresentou um comportamento mais viscoso que o ligante puro.

Porém para a relação f/b de 0,72, Figura 47, o mástique EMA apresentou menor ângulo de fase que o CAP 50/70 na faixa de baixa frequência (alta temperatura) e o resíduo

RBRO também apresenta valores inferiores ou próximos ao cap nesta faixa de frequência.

#### **4.2.2 Comportamento reológico após envelhecimento PAV**

Nas Figuras 48 a 50 estão representados os resultados após o envelhecimento PAV para o módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ).

Observa-se a redução dos valores de  $G^*$  para toda faixa de frequência e de teores de fíleres quando comparados às amostras envelhecidas pelo RTFOT. Nota-se que mesmo após o envelhecimento a longo prazo, o resíduo de EMA apresentou maiores valores de rigidez em relação as demais amostras, o que também pode ser observado com o aumento de teor de resíduo, porém quando analisado os resultados da Figura 50 observa-se que é difícil a distinção dos valores de  $G^*$ , podendo ser considerados iguais para todos as amostras com resíduos. Ainda se observa também através das Figuras 48 a 50 que o aumento de rigidez a medida com o aumento do teor de fíler foi mais significativo no mástique de RBRO, apresentando maiores valores de  $G^*$  para relação  $f/b=0,72$ , Figura 50, podendo este enrijecimento apontado pelo aumento da concentração de partículas ultrafinas serem mais, inferiores a  $20 \mu\text{m}$ . Pode-se concluir também, que esse enrijecimento foi mais significativo no envelhecimento PAV do que ao RTFOT.

Figura 48 - Curva mestras do  $G^*$  a temperatura de referência de  $40^\circ\text{C}$  das amostras  $f/b= 0,36$  após envelhecimento PAV.

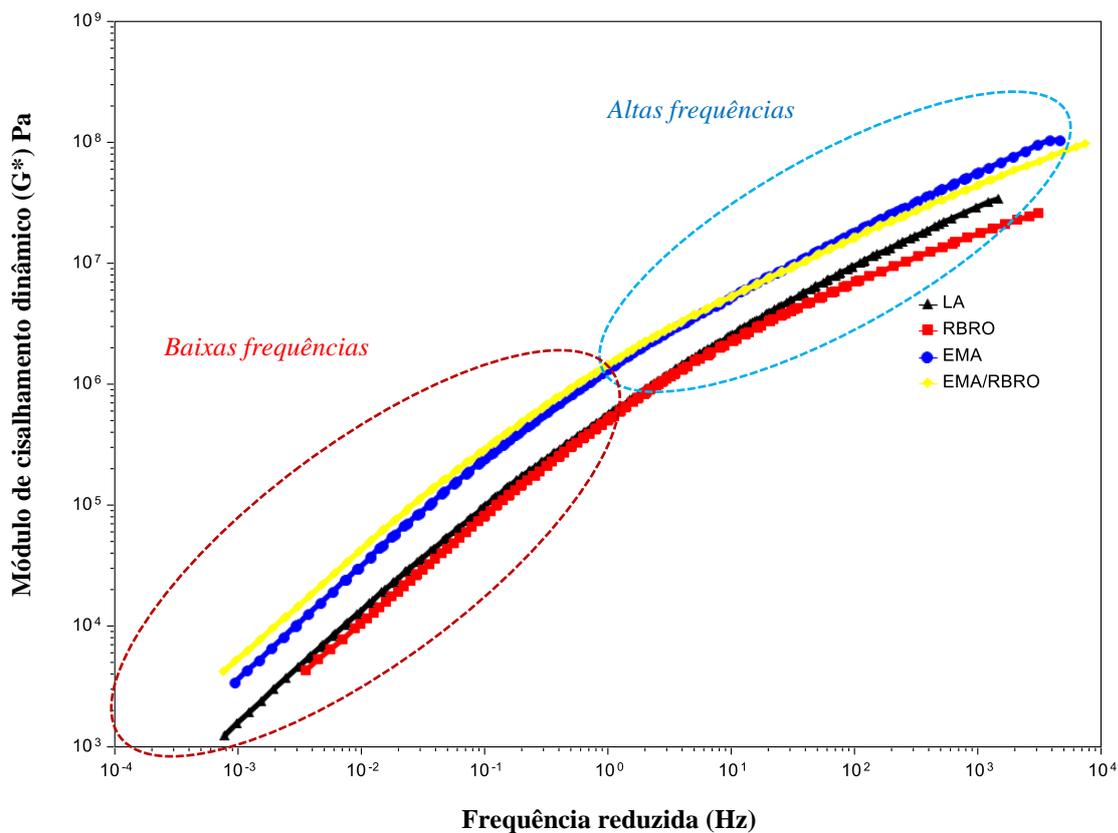


Figura 49 - Curva mestras do  $G^*$  a temperatura de referência de  $40^\circ\text{C}$  das amostras  $f/b= 0,54$  após envelhecimento PAV.

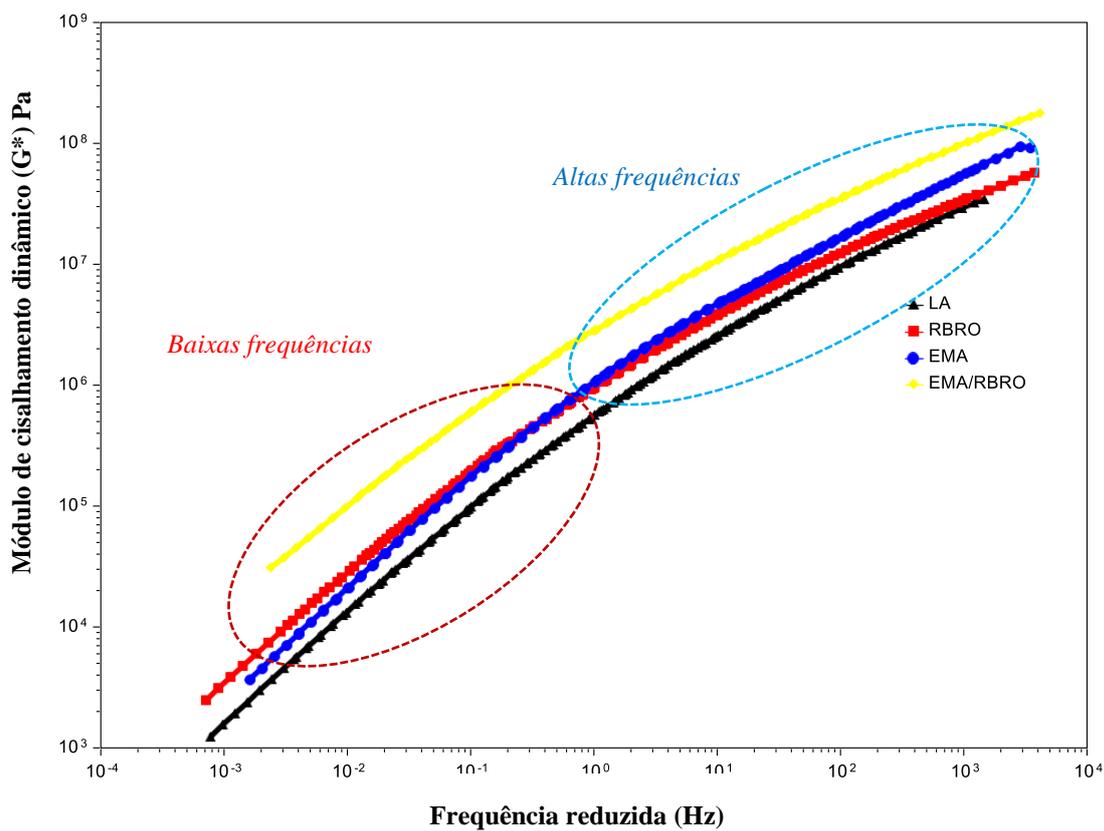
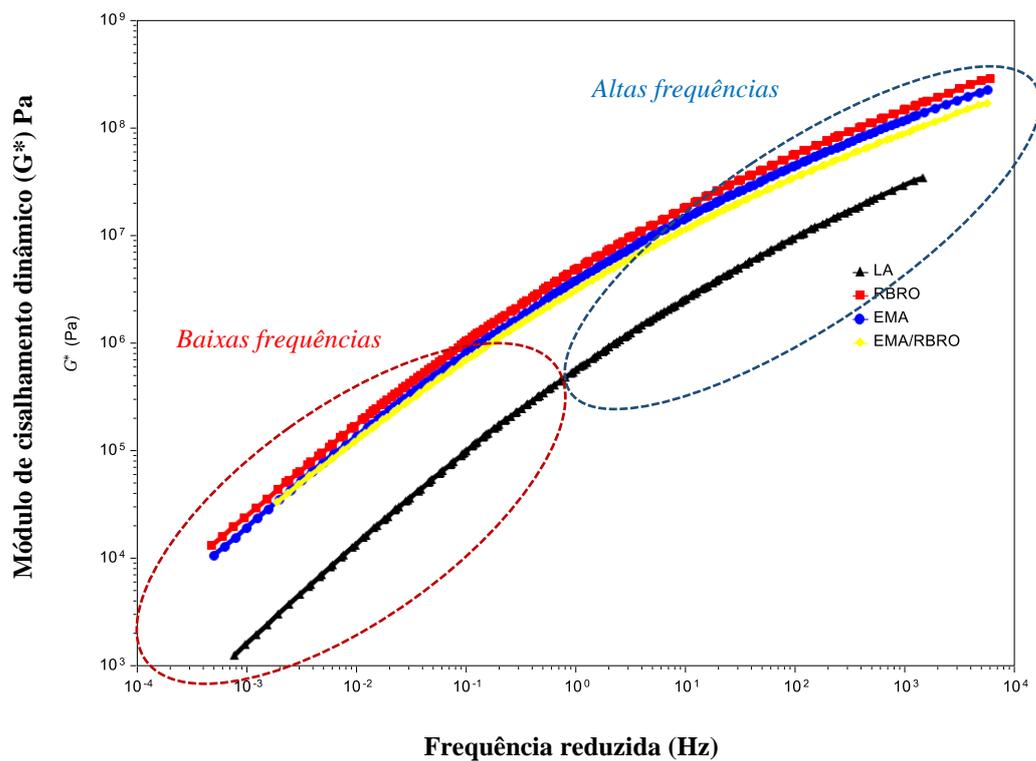


Figura 50 - Curva mestras do  $G^*$  a temperatura de referência de  $40^\circ\text{C}$  das amostras  $f/b=0,72$  após envelhecimento PAV.



As Figuras 51 a 53 apresentam as curvas mestras para o ângulo de fase ( $\delta$ ).

Figura 51 - Curva mestra do  $\delta$  a temperatura de referência de  $40^\circ\text{C}$  das amostras  $f/b=0,36$  após envelhecimento PAV.

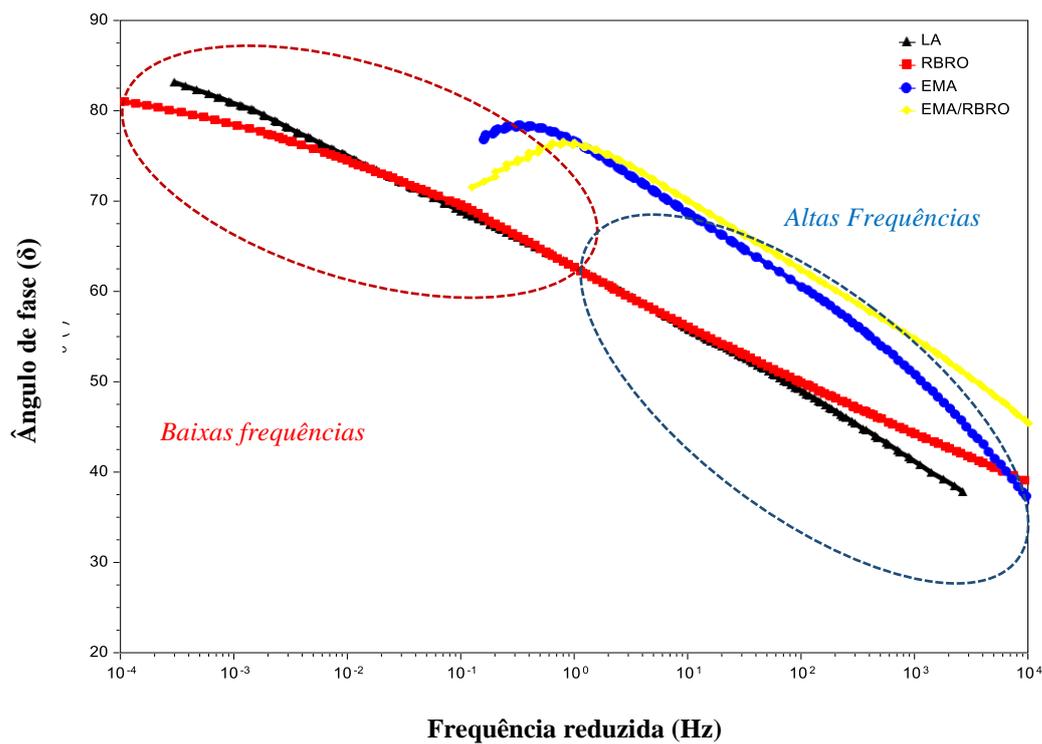
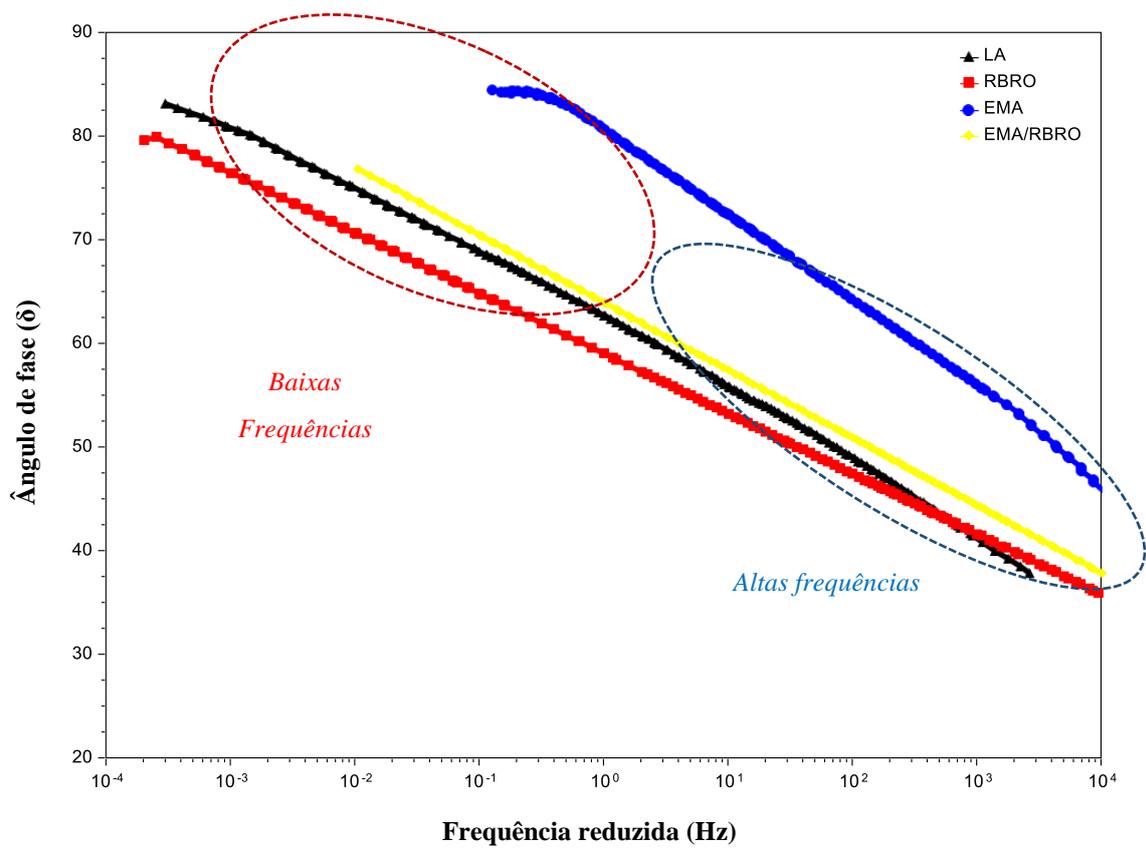
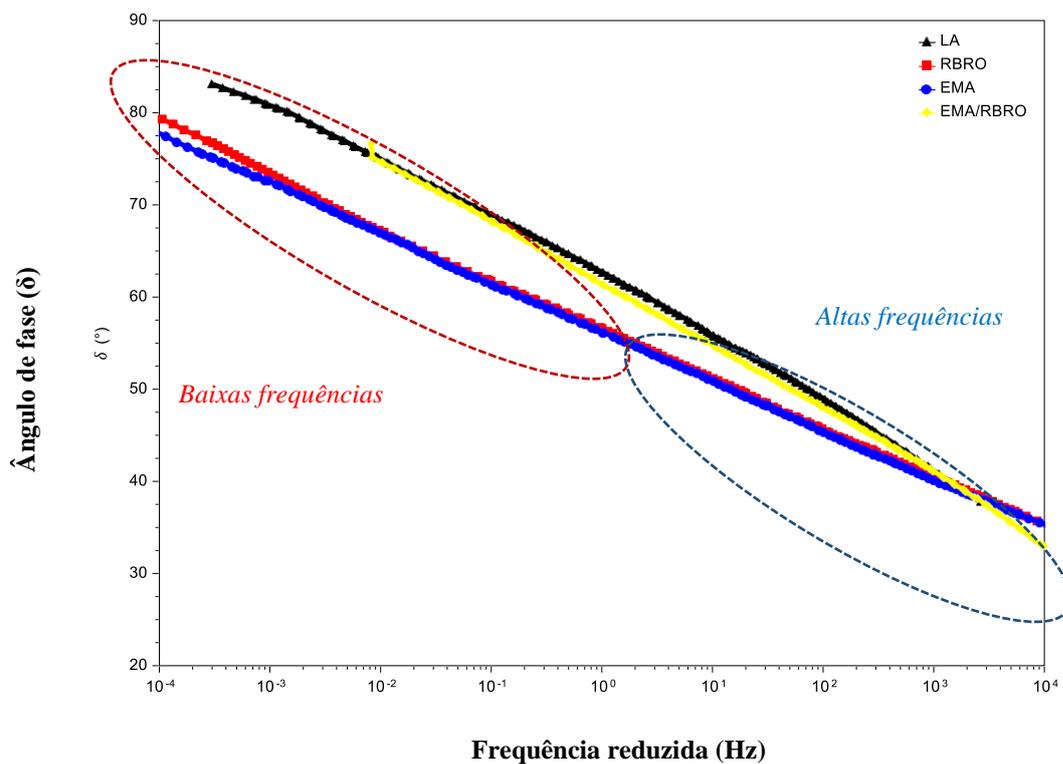


Figura 52 - Curva mestra do  $\delta$  a temperatura de referência de 20°C das amostras f/b=0,54 após envelhecimento PAV.



Fonte: Autor.

Figura 53 - Curva mestra do  $\delta$  a temperatura de referência de 40°C das amostras f/b= 0,72 após envelhecimento PAV.



Fonte: Autor.

Percebe-se que quando analisados os valores de  $\delta$  para os mástiques 0,36 (Figura 51), verifica-se que o mástique RBRO apresenta praticamente valores semelhantes ao ligante puro. O quando observados os valores de  $\delta$  na proporção 0,54 pode-se verificar que a amostra EMA+RBRO apresenta valores semelhantes ao ligante, podendo-se atribuir essa elasticidade ao resíduo RBRO.

Na Figura 53, percebe-se que todos os mástiques apresentam valores de ângulo de fase inferiores ao ligante em toda faixa de frequência, os resíduos tornaram o ligante mais elástico ao envelhecimento a longo prazo. Pode-se concluir que o aumento do teor de fíler nas amostras de mástiques envelhecidas no PAV contribuiu para uma maior elasticidade dos mástiques.

#### 4.2.3 Análise Pontual dos Parâmetros Reológicos nas Frequências relacionadas ao Tráfego Lento (0,1 Hz), Médio (1 Hz) e Rápido (10Hz)

Para avaliar a influência dos diferentes resíduos e de seus teores nas propriedades reológicas do mástique foi realizada a análise de variância para os valores de módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ) para a temperatura de 40°C, em três frequências de carregamento, 0,1; 1,0 e 10 Hz, que representam o tráfego lento, médio e rápido, respectivamente, conforme Tabela 21.

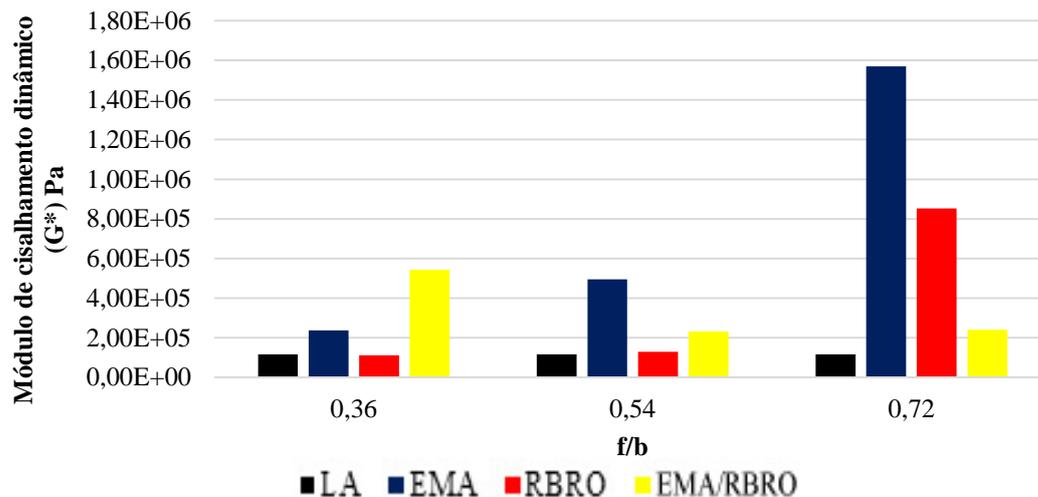
**Tabela 21 - Valores de módulo cisalhamento complexo ( $G^*$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ) para frequências de 0,1, 1,0 e 10Hz a 40°C após envelhecimento RTFOT**

Mástique	f/b	Módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) Pa			Ângulo de fase $\delta$		
		0,1	1,0	10	0,1	1,0	10
<b>Ligante puro</b>	<b>0</b>	1,16E5	5,40E5	2,27E6	67,81	62,11	55,79
<b>EMA</b>	<b>0,36</b>	2,37E5	1,51E6	6,89E6	84,21	77,67	70,11
	<b>0,54</b>	4,95E5	2,76E6	1,31E7	80,72	75,22	68,63
	<b>0,72</b>	1,57E6	6,59E6	2,43E7	62,49	59,48	56,02
<b>RBRO</b>	<b>0,36</b>	1,11E5	7,08E5	3,77E6	73,48	68,58	62,36
	<b>0,54</b>	1,29E5	7,74E5	3,82E6	70,03	65,60	61,25
	<b>0,72</b>	5,21E5	2,83E6	1,38E7	68,81	63,53	57,66
<b>EMA/RBRO</b>	<b>0,36</b>	5,44E5	3,04E6	1,33E7	70,03	64,85	58,99
	<b>0,54</b>	2,32E5	1,56E6	7,79E6	85,73	80,35	73,45
	<b>0,72</b>	2,40E5	1,69E6	6,54E6	87,44	81,71	74,11

Fonte: Autor.

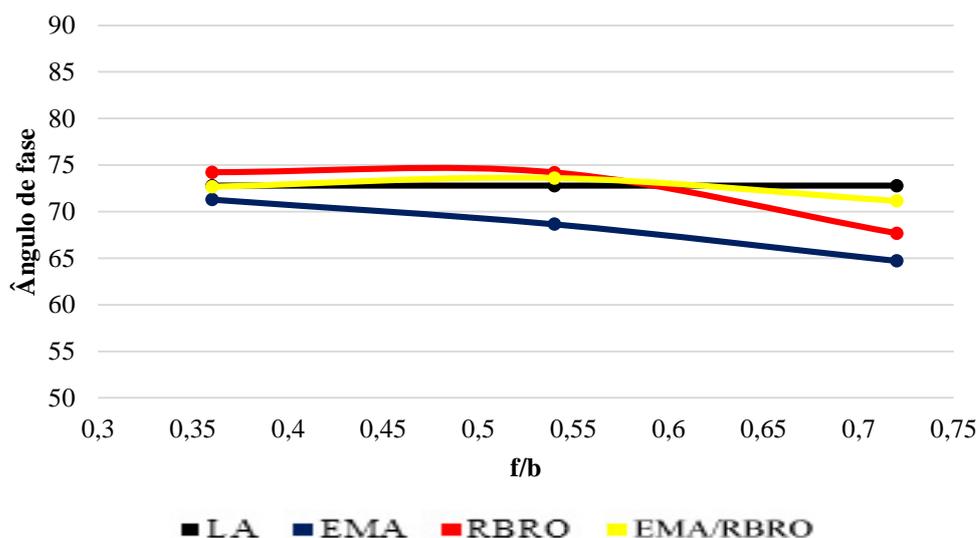
De uma forma geral, o aumento do teor de fíler resultou num aumento dos valores de módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ), Figura 54. Além disso, verifica-se que os valores de ângulo de fase ( $\delta$ ) se mantiveram ou reduziram, Figura 55.

Figura 54 - Módulo cisalhamento dinâmico à 40°C, 0,1Hz após RTFOT



Fonte: Autor.

Figura 55 - Ângulo de fase 40°C, 0,1Hz após RTFOT

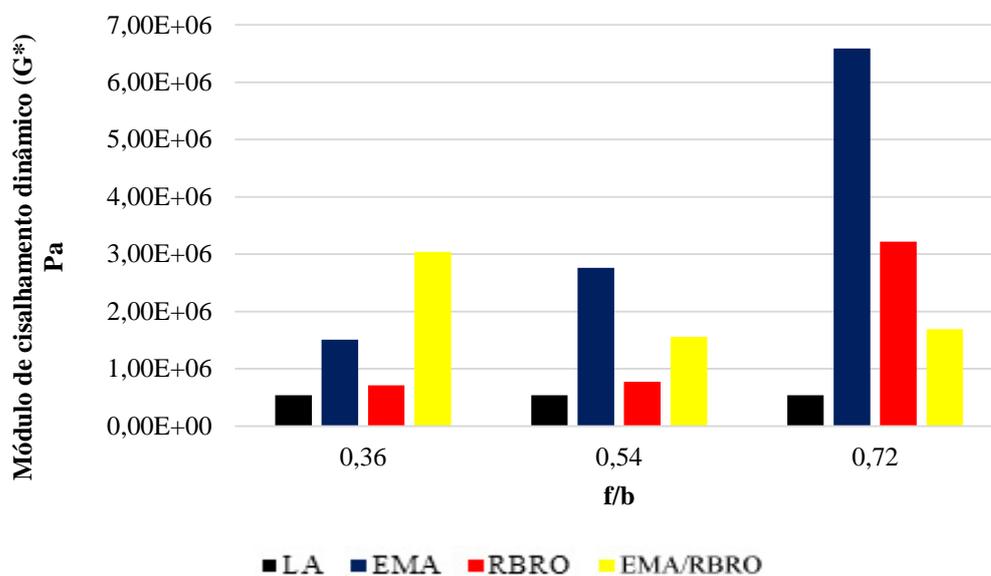


Fonte: Autor.

Na frequência de 0,1Hz os mástiques de uma forma geral, obtiveram valores semelhantes ou inferiores de  $\delta$  ao ligante asfáltico, tornando a mistura mais elástica. A elasticidade dos resíduos pode ser atribuída aos minerais que compõe o material, como a calcita, mineral muito presente na Cal. Sabe-se que a cal hidratada tem a habilidade de reduzir o envelhecimento do ligante asfáltico através da interação com os compostos polares reativos presentes, reduzindo assim produtos da oxidação do tipo carboxil formados durante o envelhecimento e reduzindo a razão dos asfaltenos pelos produtos da oxidação formados (BRINGEL, 2007 *apud* LITTLE, 1996).

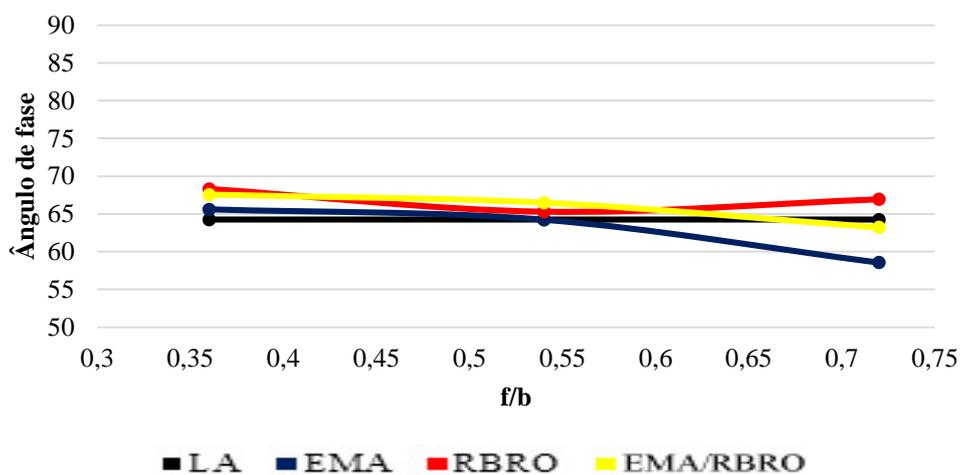
Para frequência de 1Hz, tráfego médio (Figuras 56 e 57), os mástiques apresentam valores de  $\delta$  superiores ao ligante asfáltico, ao contrário do mástique EMA 0,72 (Figuras 58 e 59).

Figura 56 - Módulo cisalhamento dinâmico à 40°C, 1Hz após RTFOT



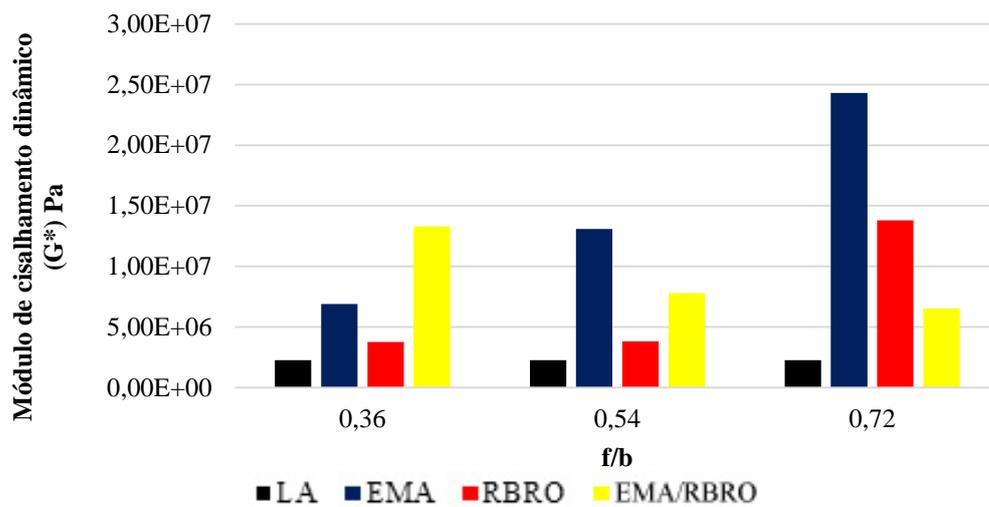
Fonte: Autor.

Figura 57 - Ângulo de fase à 40°C, 1Hz após RTFOT



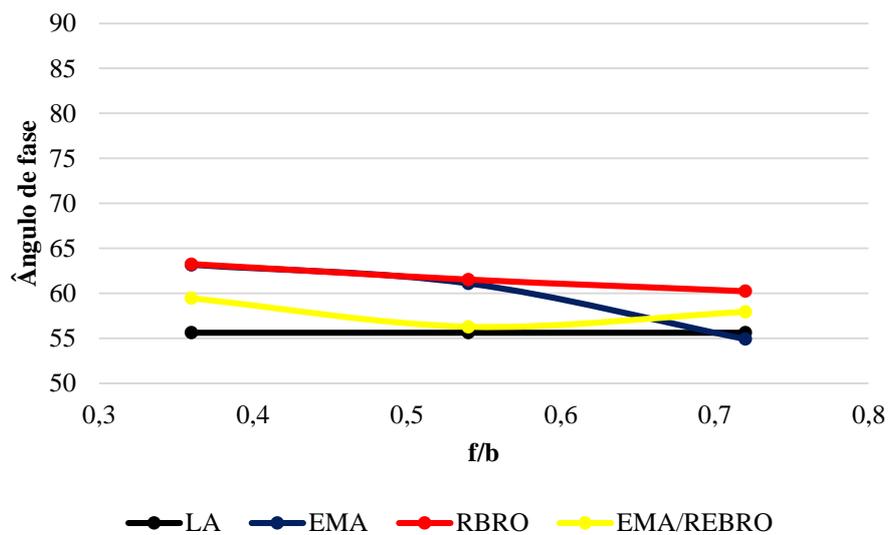
Fonte: Autor.

**Figura 58 - Módulo cisalhamento dinâmico à 40°C, 10Hz após RTFOT**



Fonte: Autor.

**Figura 59 - Ângulo de fase à 40°C, 10Hz após RTFOT**



Fonte: Autor.

Em frequência alta (10Hz) todos os mástiques apresentaram comportamento constitutivo viscoso superior ao ligante puro, mostrando que nesta condição de alta frequência/baixa temperatura, os mástique são menos elásticos que o ligante asfáltico.

### 4.3 Resultados de fluência e recuperação (MSCR)

#### 4.3.1 Resultados de fluência e recuperação para amostras com $f/b=0,36$

A Tabela 22 mostra os percentuais de recuperação do CAP 50/70 e dos ligantes com resíduos (RBRO e EMA) a  $f/b=0,36$ , para materiais na condição envelhecidas RTFOT.

Tabela 22 - Percentuais de Recuperação (R) das amostras com  $f/b=0,36$ .

	Resultados a 100 Pa, em %					Resultados a 3200 Pa, em %				
	52 °C	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C	52 °C	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C
<b>CAP 50/70</b>	19,37	14,88	11,91	-	-	17,03	9,95	4,79	-	-
<b>EMA</b>	26,22	19,25	13,55	9,12	-	22,79	13,95	7,18	3,02	-
<b>RBRO</b>	14,32	9,58	6,19	-	-	12,56	6,27	2,68	-	-
<b>EMA/RBRO</b>	35,55	26,74	20,35	13,59	7,93	29,41	19,74	11,90	5,76	-

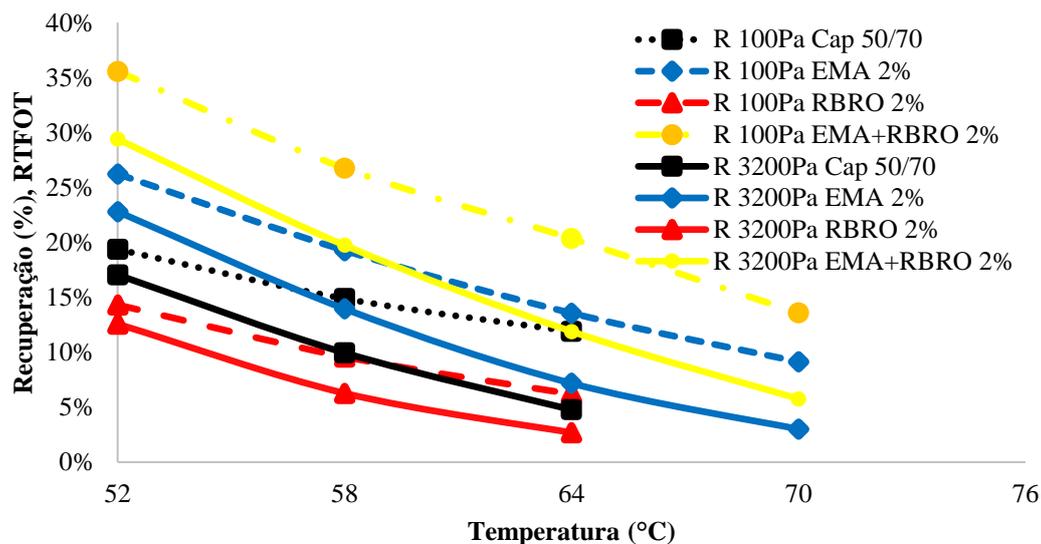
Nota: Valores de percentuais de recuperação próximo ou igual a zero indica que o material não sofre qualquer recuperação sob a deformação acumulada.

Fonte: Autor.

Os mástiques estudados, com exceção do resíduo RBRO apenas, possui percentuais mais elevados ao longo de toda faixa de temperaturas a 100 e 3.200 Pa, com valores que variam entre 7,93 e 35,55% a 100Pa e entre 2,32 e 29,41% a 3.200Pa, indicando uma menor tendência a deformação permanente para altas temperaturas de pavimento. O baixo percentual de recuperação do resíduo RBRO pode estar associado a uma série de características de suas partículas. A própria origem de fíler mineral do resíduo pode contribuir para um enrijecimento excessivo do mástique, como também suas partículas ultrafinas (abaixo de 25  $\mu\text{m}$ ), reduzindo a capacidade do mástique em se recuperar, conforme apresentado pela literatura. Já os maiores percentuais de recuperação apresentados pelos mástiques com a presença do resíduo EMA deve estar relacionado tanto a granulometria maior dos grãos do resíduo, conforme literatura, como também na forma dos grãos e ao menor teor de impurezas.

A Figura 60 mostra os gráficos do percentual de recuperação com a temperatura para o CAP 50/70, e os mástiques com relação  $f/b$  de 0,36, todos na condição envelhecida a curto prazo.

Figura 60 – Percentuais de Recuperação do CAP 50/70 e resíduos para  $f/b=0,36$



Fonte: Autor.

O mástique de EMA/RBRO apresentou maiores resultados de recuperação, conforme radicado na Tabela 22. Os decréscimos do percentual de recuperação seguem tendências aproximadamente lineares para a tensão de 100 Pa. O CAP 50/70, que apresenta reduções do percentual de recuperação significativas na tensão de 3.200Pa.

A Tabela 23 mostra as compliâncias não-recuperáveis do CAP 50/70 e dos ligantes com resíduos (RBRO e EMA) a 0,36, para materiais na condição envelhecida RTFOT.

Tabela 23 - Compliâncias não recuperáveis (Jnr) das amostras com  $f/b=0,36$ .

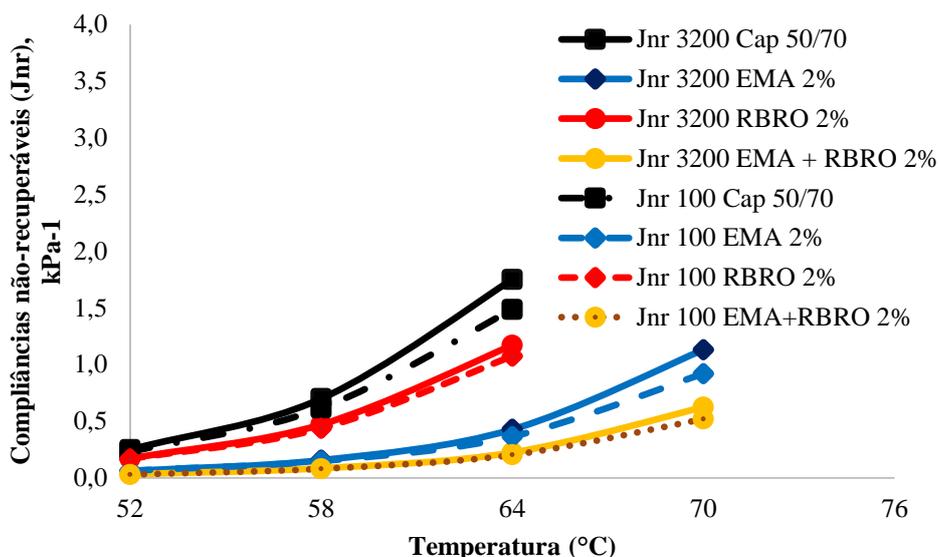
	Resultados a 100 Pa, em kPa-1					Resultados a 3.200 Pa, em kPa-1				
	52 °C	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C	52 °C	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C
<b>CAP 50/70</b>	0,23	0,61	1,49	-	-	0,25	0,70	1,75	-	-
<b>EMA</b>	0,06	0,15	0,36	0,92	-	0,06	0,16	0,43	1,13	-
<b>RBRO</b>	0,17	0,44	1,07	-	-	0,17	0,47	1,17	-	-
<b>EMA/ RBRO</b>	0,03	0,08	0,20	0,52	-	0,03	0,09	0,22	0,62	-

Fonte: Autor.

O CAP 50/70 possui os valores mais elevados de compliância não-recuperável em todas as temperaturas a 100 e a 3.200 Pa, com resultados numéricos entre 0,23 e 6,32 Kpa-1 a 100 Pa e entre 0,25 e 8,83 a 3.200 Pa. O mástique EMA+RBRO possui os valores mais baixos para esta propriedade em qualquer temperatura e tensão, seguido pelo mástique de EMA e por final, mástique RBRO.

A Figura 61 ilustra os gráficos de Jnr com a temperatura para o CAP 50/70 e os mástiques 0,36 todos na condição RTFOT.

Figura 61 – Compliância não-recuperáveis (Jnr) do CAP 50/70 e dos mástiques para  $f/b=0,36$



Fonte: Autor.

Os valores de Jnr são pequenos, inferiores a 1,0 kPa-1 conforme tabela 25, para todos os mástiques nas temperaturas de até 58°C a 100 e a 3.200Pa, o que dificulta a distinção entre os modificadores.

Levando em consideração os valores de percentuais de recuperação (R) e compliâncias não-recuperáveis (Jnr), pode-se concluir que o mástique EMA+RBRO apresenta uma menor suscetibilidade deste material à deformação permanente e uma maior recuperação elástica de sua deformação total para teores de fíler a 2%, pois apresentou maiores percentuais de recuperação e menores compliâncias não-recuperáveis do que os outros materiais. Em outro extremo, o CAP 50/70 possui maiores valores de Jnr e menores valores de R (%), o que demonstra a insuficiência do material em atender às condições mais severas de carregamento de tráfego, seguido dos mástiques de EMA e RBRO.

A Tabela 24 apresenta as diferenças percentuais entre as compliâncias (Jnr,diff) dos mástiques. Nenhuma das amostras apresentam resultados de Jnr,diff superiores ao valor de 75% estipulado pela norma AASHTO MP19, sendo que o CAP 50/70 é o que possui maior valor de Jnr,diff. As incorporações dos resíduos acarretaram uma diminuição dos parâmetros Jnr,diff, o que pode ser traduzido em uma menor sensibilidade ao incremento do nível de tensão de 100 para 3.200 Pa.

**Tabela 24 - Diferenças percentuais entre as compliâncias não recuperáveis (Jnr,diff) das amostras com f/b=0,36.**

	Valores de Jnr, diff por formulação (em %)				
	52 °C	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C
<b>CAP 50/70</b>	8,16	13,53	17,88	-	-
<b>EMA</b>	-1,39	6,36	17,41	23,08	-
<b>RBRO</b>	1,84	7,87	8,88	-	-
<b>EMA + RBRO</b>	12,40	7,10	10,36	19,71	-

Fonte: Autor.

A Tabela 25 apresenta a classificação das amostras quanto ao nível de serventia, os resultados apresentam esta classificação tanto para temperaturas PG, como em outras temperaturas abordadas neste capítulo. Está sendo apresentado também a classificação encontrada por outros autores (Domingos, 2011; Filho, 2015; Pamplona, 2013) para o CAP 50/70 para as diferentes refinarias. Observa-se que para a temperatura de PG do ligante REGAP em estudo, apresentou serventia superior aos das refinarias LUBNOR (FILHO, 2015), REPLAN e REDUC, e apenas inferior ao CAP 50/70 LUBNOR (PAMPLONA, 2013).

**Tabela 25 - Níveis adequados de tráfego ao CAP 50/70 e às formulações com f/b=0,36 em função da compliância não-recuperável (Jnr).**

	Níveis de tráfego (S, H, V ou E) em função de Jnr a 3.200 Pa*				
	52 °C	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C
<b>CAP 50/70 REGAP</b>	E	V	H	-	-
<b>EMA</b>	E	E	E	H	-
<b>RBRO</b>	E	E	H	-	-
<b>EMA + RBRO</b>	E	E	E	E	-
<b>CAP 50/70 LUBNOR (Filho, 2015)</b>	V	H	S	-	-
<b>CAP 50/70 LUBNOR (Pamplona, 2013)</b>	E	E	E	H	S
<b>CAP 50/70 REDUC (Pamplona, 2013)</b>	E	H	S	-	-
<b>CAP 50/70 REPLAN (Domingos, 2011)</b>	-	-	S	-	-

\* A ausência das letras (S = padrão, H = pesado, V = muito pesado, E = extremamente pesado) em uma ou mais temperaturas ocorre quando o valor de Jnr do material é superior a 4,0 kPa-1.

Fonte: Produção do autor.

### 4.3.2 Resultados de fluência e recuperação para amostras com $f/b=0,54$

A Tabela 26 mostra os percentuais de recuperação do CAP 50/70 e dos ligantes com resíduos (RBRO e EMA) para relação  $f/b=0,54$ , para materiais na condição envelhecida RTFOT.

Tabela 26 - Percentuais de Recuperação (R) das amostras com  $f/b=0,54$ .

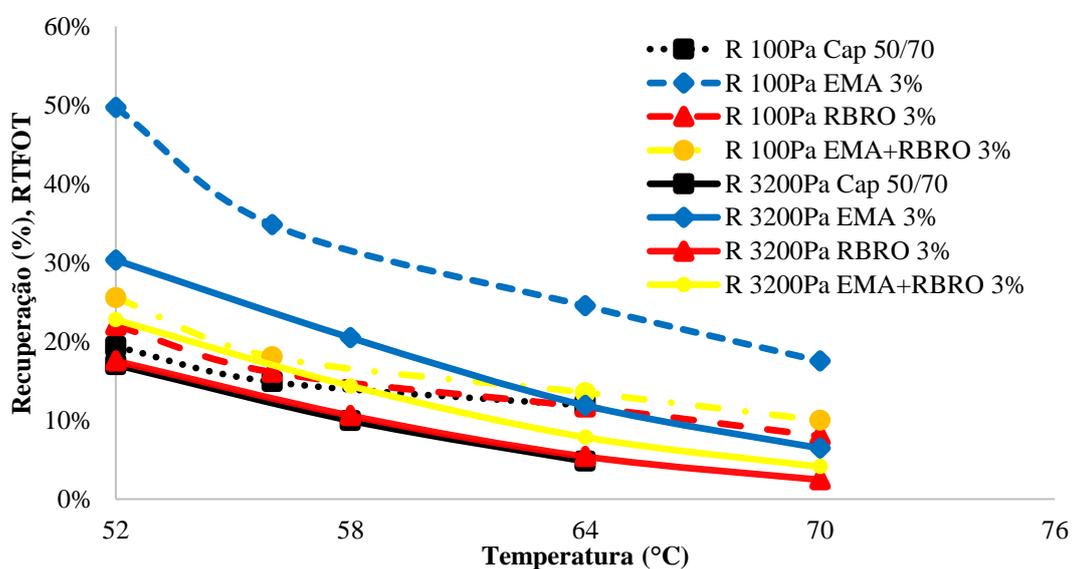
	Resultados a 100 Pa, em %					Resultados a 3200 Pa, em %				
	52 °C	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C	52 °C	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C
CAP 50/70	19,37	14,88	11,91	-	-	17,03	9,95	4,79	-	-
EMA	49,71	34,81	24,52	17,53	-	30,35	20,48	11,88	6,45	-
RBRO	22,01	16,09	11,68	8,00	-	17,51	10,59	5,40	2,46	-
EMA/RBRO	25,56	18,05	13,53	9,99	-	22,77	14,36	7,85	4,12	-

Fonte: Autor.

Pode-se perceber que o incremento do teor de fíler no mástique elevou os valores de percentuais de recuperação (R) ao longo de toda faixa de temperaturas a 100 e 3.200 Pa, para os ligantes com resíduos de EMA e RBRO com valores que variam entre 14,44 e 49,71% a 100Pa e entre 3,05 e 30,35% a 3.200Pa para o resíduo EMA e, 5,70 e 22,01% a 100Pa e entre 1,09 e 17,51% a 3.200Pa para resíduo RBRO. Em contrapartida, o mástique EMA/RBRO apresentou uma redução nos valores de recuperação.

A Figura 62 mostra os gráficos do percentual de recuperação com a temperatura para o CAP 50/70, e os mástiques com relação  $f/b$  de 0,54, todos na condição envelhecida a curto prazo.

Figura 62 - Percentuais de Recuperação do CAP 50/70 e mastiques com  $f/b=0,54$



Fonte: Autor.

O aumento do teor de resíduo na mistura fez com que o percentual de recuperação aumentasse, onde foi possível que todos os mástiques apresentassem valores de recuperação superiores ao CAP 50/70 em todas as temperaturas de ensaio. O mástique de EMA apresentou maiores resultados de recuperação conforme Tabela 26, o que pode estar relacionado a maior presença de partículas maiores no mástique. Os decréscimos do percentual de recuperação seguem tendências aproximadamente lineares para na tensão de 100 Pa e 3.200Pa. Novamente, os resultados aqui encontrados corroboram como os resultados do módulo de cisalhamento dinâmico, demonstrando uma menor tendência à deformação permanente dos mástiques com adição de EMA em relação aos outros mástiques e ao CAP.

A Tabela 27 mostra as compliâncias não-recuperáveis do CAP 50/70 e dos ligantes com resíduos (RBRO e EMA) 0,54, para materiais na condição envelhecidas RTFOT.

**Tabela 27 - Compliâncias não recuperáveis (Jnr) de amostras com f/b=0,54.**

	Resultados a 100 Pa, em kPa-1					Resultados a 3.200 Pa, em kPa-1				
	52 °C	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C	52 °C	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C
<b>CAP 50/70</b>	0,23	0,61	1,49	-	-	0,25	0,70	1,75	-	-
<b>EMA</b>	0,02	0,08	0,21	0,51	-	0,04	0,10	0,27	0,66	-
<b>RBRO</b>	0,05	0,12	0,29	0,65	-	0,05	0,13	0,31	0,75	-
<b>EMA/RBRO</b>	0,06	0,16	0,40	0,96	-	0,06	0,17	0,45	1,11	-

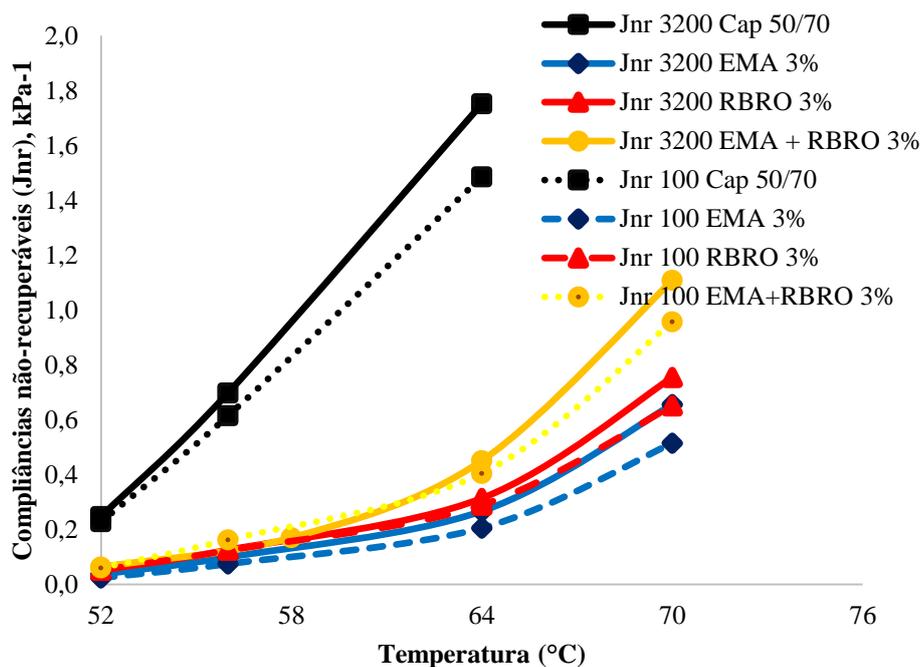
Fonte: Autor.

Observa-se que mesmo com o aumento de teor de fíler nos mástiques, o CAP 50/70 continuou a possuir os valores mais elevados de compliância não-recuperável em todas as temperaturas a 100 e a 3.200 Pa. O mástique EMA apresenta os valores mais baixos para esta propriedade em qualquer temperatura e tensão desta vez, seguido pelo mástique de RBRO e por final, mástique EMA+RBRO.

Com base nestes valores, pode-se dizer que o CAP 50/70 apresenta maior suscetibilidade à deformação permanente e que o mástique EMA/RBRO passou a apresentar mais suscetibilidade à deformação com o aumento do teor de fíler em relação aos outros mástiques, provavelmente ocasionado pelo aumento de partículas ultrafinas do resíduo RBRO.

A Figura 63 ilustra os gráficos de Jnr com a temperatura para o CAP 50/70 e os mástiques 0,54, todos na condição RTFOT.

Figura 63 - Compliância não-recuperáveis (Jnr) do CAP 50/70 e dos mástiques com  $f/b=0,54$



Fonte: Autor.

Os valores de Jnr são pequenos, inferiores a 1,0 kPa-1 conforme Tabela 27, para todos os mástiques nas temperaturas de até 64°C a 100 e a 3.200Pa, o que dificulta a distinção entre os modificadores. O teor de resíduo fez com que diminuísse os valores de Jnr dos mástiques de EMA e RBRO apenas, ao contrário da amostra EMA+RBRO que apresentou um aumento na compliância não recuperável.

Levando em consideração os valores de percentuais de recuperação (R) e compliâncias não-recuperáveis (Jnr), pode-se concluir que o mástique EMA apresenta uma menor suscetibilidade deste material à deformação permanente e uma maior recuperação elástica de sua deformação total considerando teores de fíler a 0,54, pois apresentou maiores percentuais de recuperação e menores compliâncias não-recuperáveis do que os outros materiais. Em outro extremo, o CAP 50/70 possui maiores valores de Jnr e menores valores de R, o que demonstra a insuficiência do material em atender às condições mais severas de carregamento de tráfego, seguido dos mástiques de EMA+RBRO e RBRO.

A Tabela 28 apresenta as diferenças percentuais entre as compliâncias (Jnr,diff) dos mástiques. Nenhuma das amostras apresentam resultados de Jnr,diff superiores ao valor de 75% estipulado pela norma AASHTO MP19, sendo que o CAP 50/70 é o que possui maior de Jnr,diff. O aumento do teor dos resíduos para 0,54 acarretou substancialmente a sensibilidade do mástique EMA a tensão na temperatura do PG, enquanto para o

mástique de RBRO praticamente foi mantido essa sensibilidade, portanto, demonstrando a menor sensibilidade a tensão dentro as amostras.

**Tabela 28 - Diferenças percentuais entre as compliâncias não recuperáveis (Jnr,diff) de amostras com f/b=0,54**

	Valores de Jnr, diff por formulação (em %)				
	52 °C	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C
<b>CAP 50/70</b>	8,16	13,53	17,88	-	-
<b>EMA</b>	49,89	31,78	29,53	27,38	-
<b>RBRO</b>	-1,34	0,64	8,37	15,82	-
<b>EMA/RBRO</b>	4,14	4,45	11,42	15,86	-

Fonte: Autor.

Os mástiques com f/b=0,54 de resíduo foram classificados conforme Tabela 29.

**Tabela 29 - Níveis adequados de tráfego ao CAP 50/70 e às formulações com f/b=0,54 em função da compliância não-recuperável (Jnr).**

	Níveis de tráfego (S, H, V ou E) em função de Jnr a 3.200 Pa*				
	52 °C	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C
<b>CAP 50/70</b>	E	V	H	-	-
<b>EMA</b>	E	E	E	V	-
<b>RBRO</b>	E	E	E	V	-
<b>EMA + RBRO</b>	E	E	E	H	-
<b>CAP 50/70 LUBNOR (Filho, 2015)</b>	V	H	S	-	-
<b>CAP 50/70 LUBNOR (Pamplona, 2013)</b>	E	E	E	H	S
<b>CAP 50/70 REDUC (Pamplona, 2013)</b>	E	H	S	-	-
<b>CAP 50/70 REPLAN (Domingos, 2011)</b>	-	-	S	-	-

\* A ausência das letras (S = padrão, H = pesado, V = muito pesado, E = extremamente pesado) em uma ou mais temperaturas ocorre quando o valor de Jnr do material é superior a 4,0 kPa-1.

Fonte: Autor.

### 4.3.3 Resultados de fluência e recuperação para amostras com $f/b=0,72$ .

A Tabela 30 mostra os percentuais de recuperação do CAP 50/70 e dos ligantes com resíduos (RBRO e EMA) a 0,72, para materiais na condição envelhecidas RTFOT.

**Tabela 30 - Percentuais de Recuperação (R) das amostras com  $f/b=0,72$ .**

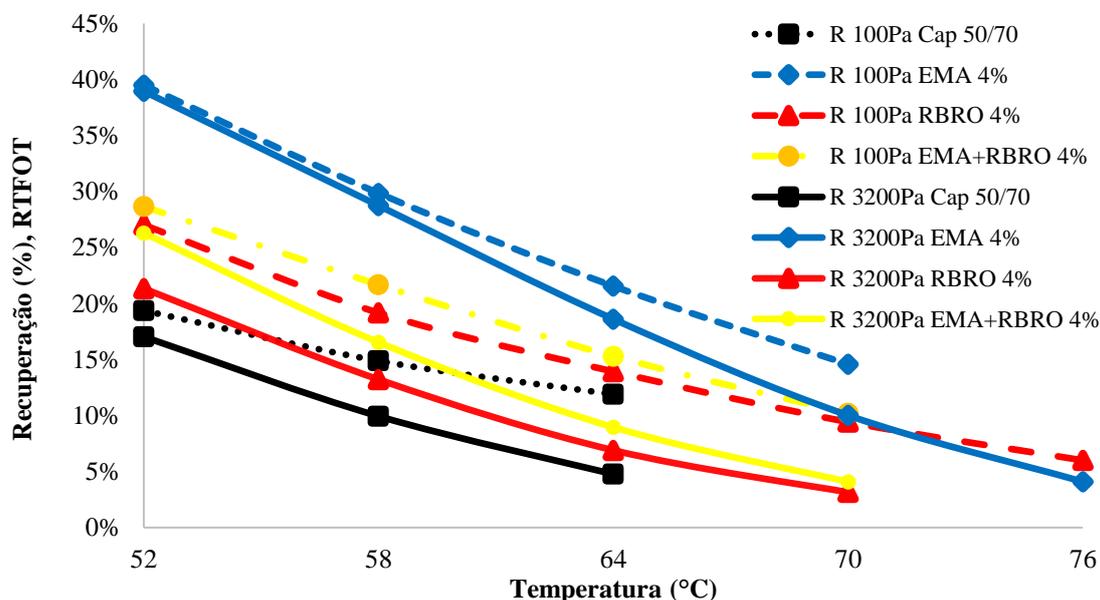
	Resultados a 100 Pa, em %					Resultados a 3200 Pa, em %				
	52 °C	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C	52 °C	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C
<b>CAP 50/70</b>	19,37	14,88	11,91	-	-	17,03	9,95	4,79	-	-
<b>EMA</b>	39,47	29,83	21,55	14,58	-	38,93	28,73	18,61	10,02	-
<b>RBRO</b>	27,01	19,17	13,93	9,43	6,00	21,32	13,21	6,90	3,15	1,36
<b>EMA/RBRO</b>	28,64	21,67	15,29	10,19	-	26,28	16,52	8,95	4,08	-

Fonte: Autor.

Pode-se perceber que o incremento do teor de filer no mástique elevou suavemente os valores de percentuais de recuperação (R) do mástique de RBRO, porém percebe-se uma redução do percentual de recuperação (R) do mástique EMA ao longo da faixa de temperaturas a 100, mas um aumento deste percentual a 3.200 Pa, estes valores ainda são superiores a CAP puro e aos demais mástiques.

A Figura 64 mostra os gráficos do percentual de recuperação com a temperatura para o CAP 50/70, e os mástiques com relação  $f/b$  de 0,72, todos na condição envelhecida a curto prazo.

**Figura 64 - Percentuais de Recuperação do CAP 50/70 e mastiques com  $f/b=0,72$**



Fonte: Autor.

O aumento do teor de resíduo na mistura fez com que o percentual de recuperação aumentasse mais significativamente para o mástique EMA. Pouco foi o aumento na recuperação nas amostras com resíduo de RBRO.

A Tabela 31 mostra as compliâncias não-recuperáveis do CAP 50/70 e dos ligantes com resíduos (RBRO e EMA) a 0,72 para materiais na condição envelhecidas RTFOT.

**Tabela 31 - Compliâncias não recuperáveis (Jnr) para amostras com f/b=0,72.**

	Resultados a 100 Pa, em kPa-1					Resultados a 3.200 Pa, em kPa-1				
	52 °C	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C	52 °C	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C
<b>CAP 50/70</b>	0,23	0,61	1,49	-	-	0,25	0,70	1,75	-	-
<b>EMA</b>	0,03	0,07	0,19	0,50	-	0,03	0,07	0,20	0,54	-
<b>RBRO</b>	0,04	0,10	0,25	0,59	1,32	0,04	0,10	0,27	0,68	1,49
<b>EMA/ RBRO</b>	0,04	0,10	0,24	0,57	-	0,04	0,10	0,26	0,69	-

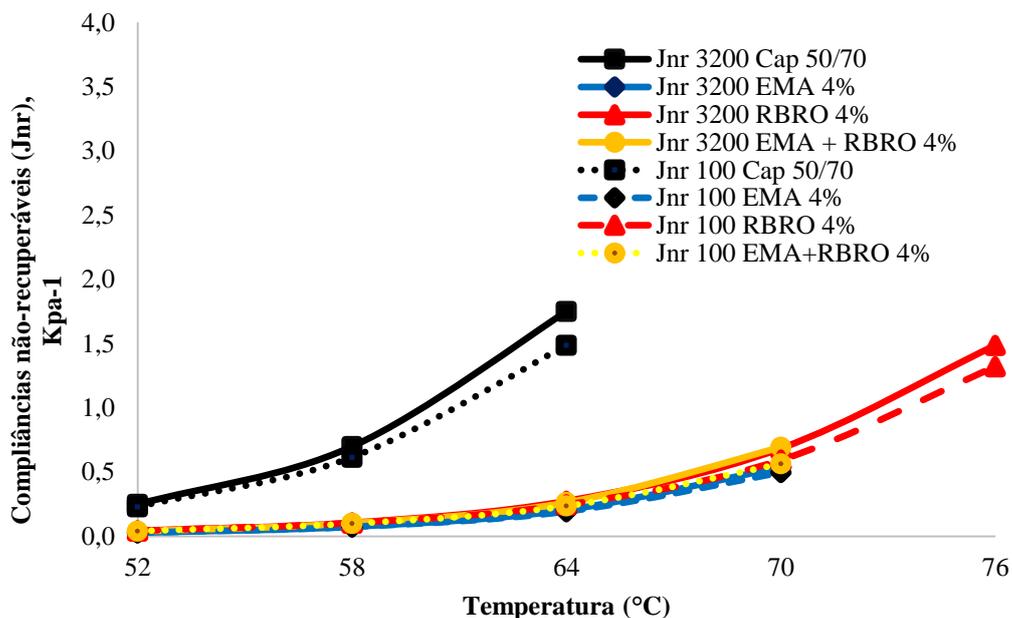
Fonte: Autor.

Observa-se que mesmo com o aumento de teor de fíler de 0,54 para 0,72 nos mástiques, os mesmos apresentaram menores valores de Jnr e o CAP 50/70 continuou a possuir os valores mais elevados de compliância não-recuperável em todas as temperaturas a 100 e a 3.200 Pa. O mástique EMA manteve os valores mais baixos para esta propriedade em qualquer temperatura e tensão.

Com base nestes valores, pode-se dizer que o CAP 50/70 continuou a ter maior suscetibilidade à deformação permanente, já os mástiques EMA+RBRO e RBRO passaram a apresentar a mesma suscetibilidade a deformação com o aumento do teor de fíler em relação aos outros mástiques.

A Figura 65 ilustra os gráficos de Jnr com a temperatura para o CAP 50/70 e os mástiques 0,72 todos na condição RTFOT.

Figura 65 - Compliância não-recuperáveis (Jnr) do CAP 50/70 e dos mástiques com  $f/b=0,72$



Fonte: Autor.

Os valores de Jnr são pequenos, inferiores a 1,0 kPa-1 conforme Tabela 31, para todos os mástiques nas temperaturas de até 70°C a 100 e a 3.200Pa, o que dificulta a distinção entre os modificadores. O teor de resíduo fez com que se mantivesse praticamente iguais os valores de Jnr dos mástiques de EMA e RBRO apenas, quanto a amostra EMA+RBRO apresentou pouco aumento na compliância não recuperável.

Levando em consideração os valores de percentuais de recuperação (R) e compliâncias não-recuperáveis (Jnr), pode-se concluir que o mástique EMA apresenta uma menor suscetibilidade à deformação permanente e uma maior recuperação elástica de sua deformação total considerando em todos os teores analisados, pois apresentou maiores percentuais de recuperação e menores compliâncias não-recuperáveis do que os outros materiais.

A Tabela 32 apresenta as diferenças percentuais entre as compliâncias (Jnr,diff) dos mástiques. Nenhuma das amostras apresentam resultados de Jnr,diff superiores ao valor de 75% estipulado pela norma AASHTO MP19, sendo que o CAP 50/70 é o que possui maior de Jnr,diff, mesmo com o aumento do teor dos resíduos de 0,54 para 0,72.

**Tabela 32 - Diferenças percentuais entre as compliâncias não recuperáveis (Jnr,diff) de amostras com f/b=0,72.**

	Valores de Jnr, diff por formulação (em %)				
	52 °C	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C
<b>CAP 50/70</b>	8,16	13,53	17,88	-	-
<b>EMA</b>	-0,36	2,20	6,18	8,34	-
<b>RBRO</b>	1,84	1,56	11,58	15,39	12,64
<b>EMA/RBRO</b>	-4,66	3,85	11,41	22,64	-

Fonte: Autor.

Quanto ao nível de serviço essas amostras foram classificadas conforme a Tabela 33.

**Tabela 33 - Níveis adequados de tráfego ao CAP 50/70 e às formulações com f/b=0,72 em função da compliância não-recuperável (Jnr).**

	Níveis de tráfego (S, H, V ou E) em função de Jnr a 3.200 Pa*				
	52 °C	58 °C	64 °C	70 °C	76 °C
<b>CAP 50/70</b>	E	V	H	-	-
<b>EMA</b>	E	E	E	V	-
<b>RBRO</b>	E	E	E	V	H
<b>EMA + RBRO</b>	E	E	E	V	-
<b>CAP 50/70 LUBNOR (Filho, 2015)</b>	V	H	S	-	-
<b>CAP 50/70 LUBNOR (Pamplona, 2013)</b>	E	E	E	H	S
<b>CAP 50/70 REDUC (Pamplona, 2013)</b>	E	H	S	-	-
<b>CAP 50/70 REPLAN (Domingos, 2011)</b>	-	-	S	-	-

*Nota: A ausência das letras (S = padrão, H = pesado, V = muito pesado, E = extremamente pesado) em uma ou mais temperaturas ocorre quando o valor de Jnr do material é superior a 4,0 kPa-1.*

Fonte: Autor.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no estudo realizado, podem-se fazer as seguintes constatações:

#### 5.1 Com relação à caracterização química, física, mineralógica e microestrutural

- A caracterização química, física, mineralógica e microestrutural foram satisfatórias em demonstrar que ambos os resíduos se enquadram na granulometria de fíleres. Porém, o resíduo EMA apresenta grãos maiores e mais angulosos do que o resíduo RBRO. Partículas muito finas, como as encontradas na análise granulométrica e microestrutural do RBRO atuam como fíler ativo e contribuem para um maior enrijecimento do mástique.
- Analisando os minerais que compõe esses resíduos, destaca-se a presença de óxido de cálcio, presente em maior quantidade nos resíduos RBRO em relação ao resíduo EMA, mineral este que agrega boas propriedades de recuperação elástica ao asfalto. Ainda quanto a mineralogia, deve-se destacar a presença de óxido de ferro, mineral esse que pode ser responsável pelo aumento de rigidez do ligante asfáltico. O alto teor de sílica em ambos os resíduos deve ser visto com preocupação. O resíduo RBRO apresentou maiores teores de impureza do que o resíduo EMA, o que pode prejudicar a interação fíler-ligante reduzindo a adesividade na interface destes materiais.
- As micrografias apresentaram uma tendência mais lamelar ao fíler de RBRO e mais anguloso para o resíduo EMA.

#### 5.2 Com relação ao comportamento reológico dos mastiques

- O resíduo de EMA proporcionou ao ligante um incremento do  $G^*$  maior do que para o mástico produzido com o resíduo RBRO. Porém vale destacar que o  $G^*$  para mastiques com resíduo de RBRO foi mais sensível ao aumento do teor de fíler, apresentando maiores incrementos no  $G^*$  a medida que a relação  $f/b$  crescia.
- Os maiores valores de  $G^*$  do mástique com o uso de EMA pode estar relacionado à maior concentração de óxido de ferro e menor teor de impurezas (sílica) do que o resíduo RBRO, este fator pode ter contribuído mais para o

enrijecimento do mástique do que a maior concentração de grãos finos do resíduo RBRO.

- Os ensaios de fluência e recuperação demonstraram que os mástiques com resíduo EMA tem menor susceptibilidade a deformação permanente do que os que contém RBRO, provavelmente ocasionado pelo aspecto anguloso dos grãos de fíleres do resíduo EMA, dando maior estabilidade ao sistema. O mástique RBRO não apresentou resultado satisfatório no teor de 0,36, obtendo valores de recuperação inferiores ao ligante puro.
- As curvas mestras de ângulo de fase apontaram que resíduo tem a tendência de tornar o ligante mais viscoso. Quando analisados as amostras envelhecidas a curto prazo, os mástiques com adição de EMA envelhecidos no RTFOT apresentaram maior viscosidade do que o ligante puro, enquanto que o resíduo RBRO tendeu a tornar o ligante mais elástico. O aumento do teor de fíler mostrou uma tendência de redução do  $\delta$  nas amostras envelhecidas no PAV, onde todas as amostras apresentaram menores valores de  $\delta$  se comparado ao ligante puro. De forma geral, o resíduo RBRO tornou o ligante mais elástico do que o resíduo EMA.
- A incorporação dos resíduos de RBRO e EMA aumentaram em 6°C a temperatura alta do PG, se comprado ao ligante puro, com exceção ao mástique de RBRO 0,36 e 0,72.
- Os resultados de viscosidade pelo método Casola, demonstraram que os resíduos proporcionaram uma redução nos valores de temperatura de usinagem (TU) e de compactação (TC), com exceção ao mástique RBRO 0,36 e EMA 0,54 que apresentaram os mesmos valores de TU e TC, e o mástique de RBRO 0,72 que apresentou valores superiores.
- Ao tentar comparar os ensaios reológicos com os ensaios mecânicos de Gottardi *et al.* (2015), percebe-se correlação entre o  $\delta$  e o valores de fluência, as misturas com EMA obtiveram maiores valores de fluência e menores valores de  $\delta$ , o que era de esperar. No entanto, é difícil comparar o módulo cisalhamento dinâmico e a estabilidade, pois o mástique tem comportamento diferente em diferentes temperaturas e frequências, parâmetro este não avaliado no ensaio de estabilidade.

### 5.3 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar um estudo reológico com fíleres de RBRO e EMA com diâmetros de partículas diferentes para análise da influência destas partículas grossas e ultrafinas nas propriedades reológicas dos mástiques.
- Estudo da interação química e microestrutural entre os resíduos RBRO e EMA com o ligante asfáltico, verificar a afinidade de interação dos componentes que compõe com resíduos com o ligante asfáltico.
- Caracterização ambiental dos resíduos de RBRO e EMA.
- Estudo da viabilidade ambiental e econômica da produção dos resíduos RBRO e EMA.
- Realização de ensaios de varredura de amplitude linear para avaliação do comportamento do resíduo ao dano de fadiga dos mástiques.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCHAR, W.; VIEIRA, F. A.; HOTZA, D. *Effect of marble and granite sludge in clay materials. Materials Science Engineering*. v. 319, p. 306-309, 2006.
- AKBULUT, H.; GÜRER, C.; CETIN, S.; ELMACI, A. *Investigation of using granite sludge as filler in bituminous hot mixtures*. *Constructions and Building Materials*. v. 36, p. 430-436, 2012.
- ALEXANDRE, J.; BEISSER, R.; GEISELER, J.; KUHN, M.; MOTZ, H.; JUKES, L. M.; KOLLER, W.; PIRET, J. *Utilization of BOF slag in Europe meets high standards*. s.d.
- ALMEIDA, T.; LEITE, F.; HOLANDA, J. *Caracterização de resíduo de pó de mármore para aplicação em materiais cerâmicos*. Encontro de engenharia, ciência de materiais e inovação do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.
- ALYAMAÇ, K. E.; INCE, R. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. *Construction and Building Materials*. v. 23, p. 1201–1210, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. O setor. Informe 12/2012. São Paulo. 2006. Disponível em: <<http://www.vitoriastonefair.com.br/site/2012/pt/setor>>. Acesso em: 27 fev. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro, 2004.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *AASHTO M320: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder*. Washington, D.C, 2010.
- AIREY, G. D. *Rheological properties of styrene-butadiene-styrene polymer modified road bitumens*. In: *Fuel*, v.82, p. 1709-1719, 2003.
- AL-QUADI, I.L.; SAYED, T.; ALNUAIME, N.; MASAD, E. *Efficient transportation and pavement systems: Characterization, mechanisms, simulation and modeling*. London: Taylor & Francis Group, 2009.
- Al-Suhaibani, A.; J. Al-Mudaiheem e F. Al-Fozan. *Effect of filler type and content on properties of asphalt concrete mixes*. In: MEININGER, R.C. (Ed.). *Effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance*. ASTM Special Technical Publication 1147, p.107-130. 1992.
- AMARAL, S. C. *Estudo de misturas densas com agregados do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (Betuflex B 65/60)*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 2000.
- ANDERSON, D.A.; BAHIA, H.U; DONGRE, R. *Rheological properties of mineral filler-asphalt mixtures*. *Association of Asphalt Paving Technologists*, v.42, p 37-66. USA. 1992.
- ANDERSON, M. *et al. MSCR: a better tool for characterizing high-temperature performance properties*. In: *Asphalt – The magazine of the Asphalt Institute*. Lexington, KY, v.25, p. 15-16.18.21-23. ISSN 0004-4594. 2010.

AASHTO. 2000. Hot-mix asphalt paving handbook. American Association of State Highway Transportation Officials. Washington, DC: United States National Research Council (U.S.), 219 p.

BALTAZAR, R. P. Caracterização do Fator Expansão de uma Escória de Aciaria em diferentes Processos de Cura para Uso em Pavimentação. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 77p, 2001.

BARDINI, V. S. S. *Influência do fíler mineral em propriedades de misturas asfálticas densas*. 344 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transporte e Área de concentração em Infra-Estrutura de Transporte. 2013. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

BARDINI, V., Klinsky, L. e Junior., J. *A importância do fíler para o bom desempenho das misturas asfálticas*. In: Minerva. São Carlos. São Paulo. 2009.

BAHIA. Secretaria da indústria, comércio e mineração. Guia setorial de rochas ornamentais. 2012. Disponível em: <http://www.sicm.ba.gov.br>, acesso em 07 de janeiro de 2013.

BAHIA, H.U. *et al. NCHPP Report 459: Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design*. In: National Cooperative Highway Research Program, Washington. 2001.

BAHIA H. U., HANSON, D. I. *Project NCHRP 9 – 10 – Superpave protocols for modified asphalt binders*. National Cooperative Highway Research Program, Washington. 2000.

BAHIA, H. U. *Critical evaluation of asphalt modification using strategic highway research program concepts*. In: Transportation Research Record, Washington. N 1488, p. 82-88, 1995.

BARNERS H. A., HUTTON J. F., WALTERS K. *An introduction to rheology*. In: Elsevier, Amsterdam, 1989.

BARRA. B. S., *Avaliação do Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas Densas Utilizando Materiais do Estado do Pará com o Emprego de Pó Calcário*. Dissertação de Mestrado. 177 p., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

BARRA, B. S.; MOMM, L.; BERNUCCI, L. L. B. *Influência do pó calcário calcítico do estado do Pará na dosagem dos mástiques e na viscosidade dos cimentos asfálticos de petróleo*. In: 36 Reunião Anual de Pavimentação, Curitiba, 2005.

BARRA, B. S.; MOMM, L. *Avaliação das características químicas e físicas dos fileres pó calcário e pó de brita na formulação dos mástiques asfálticos*. In: 39 Reunião Anual de Pavimentação, Recife. 2008.

BARRA, B. S.; MOMM, L.; GUERRERO, Y.; BERNUCCI, L. *Characterization of granite and limestone powders for use as fillers in bituminous mastics dosage*. In: Anais da Academia Brasileira de Ciências, 2014.

BECHARA, M. F.; FAXINA, A. L.; FABRRI, G. T.P.; GIGANTE, A. C.; NASCIMENTO, D.R. *Propriedades reológicas de mástiques asfálticos a altas temperaturas*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 39., 2008, Recife. Anais... Recife, 2008.

- BLEICHER, L. e J.M. SASAKI, 2000, “Introdução à difração de raios-X em cristais”. Universidade Federal do Ceará.
- BRETAS, R. E. S. e M. A. D’AVILA. *Reologia de Polímeros Fundidos*. Ed. da UFSCar, São Carlos, São Paulo, Brasil. 2000.
- BRINGEL, R. M. *Estudo químico e reológico de ligantes asfálticos modificados por polímeros e aditivos*. 174 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciência. Departamento de química orgânica e inorgânica, Fortaleza, Ceará, 2007.
- Brun, D.W. e Yuan, W.C. Caracterização e aproveitamento dos resíduos siderúrgicos principais gerados pela aciaria elétrica. Porto Alegre: PPGEMM/UFRGS, 1994, 34p
- CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; SOUZA, F. L. S.; SILVA, S. A. C.; MATTOS, F. V. Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2, 1997, Salvador. *Anais...* Salvador: ANTAC, 1997, p. 64-75.
- CALMON, J. L.; SILVA, S. A. C. Mármore e granito no Espírito Santo: problemas ambientais e soluções. In: Domingues, A. F.; Boson, P. H. G.; Alípaz, S. (Org.). A gestão dos recursos hídricos e a mineração. Brasília. Agência Nacional das Águas e Instituto Brasileiro de Mineração. Capítulo 5, p. 199-231, 2006.
- CARNEIRO, F.A.V., *Emprego de escórias siderúrgicas integradas na construção civil*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1993.
- CASTELO BRANCO, V. T. F. *A unified method for the analysis of non-linear viscoelasticity and fatigue cracking of asphalt mixtures using the dynamic mechanical analyzer*. Thesis (PHD), Texas, A&M University, College station, Texas, USA. 2008.
- CASTELO BRANCO, V. T. F. (2004) *Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado*. Dissertação (mestrado), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 2004.
- CHEUNG, C.Y. (1995) *Mechanical Behavior of Bitumens and Bituminous Mixtures*. Tese de Doutorado – University of Cambridge, UK, Cambridge.
- COCHI, M.C. Análise da incorporação de lama manufaturada do mármore em cerâmica estrutural. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 17., 2006, Foz do Iguaçu. *Anais...*Paraná: CBECIMat: 2006.
- COLANGELO, F.; MARROCCOLI, M.; CIOFFI, R. Properties of self-levelling concrete made with industrial wastes. RILEM proceedings pro, v. 40, p. 580-589, 2010.
- COLLINS, J. H.; M. G. BOULDIN; R. GELLES, A. BERKER. *Improved Performance of Paving Asphalts by Polymer Modification*. In: Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 60, p. 43-79. 1991.
- COUTINHO, R. P. *Utilização da parte fina de misturas asfálticas para avaliação do dano por fadiga*. 109 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciência. Departamento de química orgânica e inorgânica, Fortaleza, Ceará, 2012.

- CRAUS, J.; ISHIAI I.; SIDES A. (1978). *Guidelines for use of dust in hot-mix Asphalt concrete mixtures*. Proceedings of Asphalt Association of Pavinf Technologists. v. 56, pp. 492-516.
- CUNHA, M. B.; ZEGARRA, J. E. ; FERNANDEs Jr.,J. L.. *Revisão da Seleção do Grau de Desempenho (PG) de Ligantes Asfálticos por Estados do Brasil*. ANPET, 2007.
- DAMO, A. J. (1990), *Influence of Aggregate Morphology on Mechanical Behaviour of Asphalt Mixtures*, in Transportation Research Record (TRR) n° 1259 (USA).
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994j, ME 262 “Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários”.
- DNER-EM 367/97 (1997). Material de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997.
- DNIT 031/2006 - ES DNIT Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço.Origem: Revisão da norma DNIT 031/2004 – ES.
- DOMINGOS, M. D. I. *Caracterização do comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados virgens e envelhecidos*. 300 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transporte e Área de concentração em Infra-Estrutura de Transporte. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.
- D’ANGELO, J.; DONGRÉ, R. *Practical use of multiple stress creep and recovery test: characterization of styrene-butadiene-styrene dispersion and other additives in polymer-modified asphalt binders*. In: Transportation Research Record. Washington, n.2126, p.73-82. 2009.
- FAXINA, A.L.; SÓRIA, M.H.; FABBRI, G.T.P.; *Propriedades reológicas relacionadas à deformação permanente de ligantes asfálticos modificados*. In: Minerva. 2009. Departamento de transportes, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2009.
- FREIRE, A. S.; MOTTA, J. F. M. Potencialidades para o aproveitamento econômico do rejeito da serragem do granito. In: *Revista Rochas de Qualidade*, São Paulo, ano XXV, Edição 123, p. 98-108, jul./ago. 1995.
- FREITAS, H.B. *Misturas Asfálticas de Módulo Elevado com Uso de Escória de Aciaria como Agregado*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2007.
- FREITAS, R. D. *Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente*. 180 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. 2010.
- GEYER, R.M.T., 2001, *Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto*. Tese de doutorado. UFRGS, Porto Alegre, RS. 2001.
- GEISELER, J. Use of steelworks slag in Europe. Waste Management. Vol. 16, Nos 1-3, pp. 59-63. 1996.

GEISELER, J., SCHLOSSER, R. Investigation concerning the structure and properties of steel slags, In: 3rd International Conference on Molten Slags and Fluxes, Iron and Steel Slags - Properties and utilization - Junho, 1988, Escócia

GOBBO, L. A.; MELLO, I. S. C. Reciclagem dos resíduos finos da serragem de mármore e granitos pela indústria de cimento. Anais. 1st International Congress of Dimension Stones. 6p, 2005.

GONÇALVES, J. P.; MOURA, W.A. Reciclagem do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais na construção civil. In: Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 3, 2002, Recife. *Anais...* Recife, 2002, p. 179-189.

GONÇALVES, J. P. *Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para a produção de concretos*. 2000. 135p. Dissertação (Mestrado) – Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

GOTTARDI, E. V.; CALMON, J. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L. O uso de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e de escória de aciaria como fíler em misturas asfálticas. In: 42º Reunião Anual de Pavimentação, 2013, Gramado. Anais. Gramado: RAPv, 2013.

GOTTARDI, E. V.; CALMON, J. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L. O uso de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e de escória de aciaria como fíler em misturas asfálticas. In: Revista Pavimentação, 2015.

GUIMARÃES, J. E. P. (1952), *Calcário no Estado de São Paulo*. Instituto Geográfico e Geológico; Boletim 32. São Paulo (SP).

HINTZ, C., VELASQUEZ, R., JOHNSON, C., BAHIA, H. *Modification and validation of the linear amplitude Sweep test for binder fatigue specification*. In: Journal of transportation Research board, vol. 1, 99-106. 2011.

HOMEM, T, R. *Comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras*. 129 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

IABR - Instituto Aço Brasil, Número de Mercado - Estatísticas. Disponível em <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas.asp?par=201112>. Acesso em: março de 2012, 2012.

ISHAI, I., J. CRAUS and A. SIDES, 1980. *A model for relating filler properties to optimal behavior of bituminous mixtures*. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 49: 416.

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

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS - JIS. Esclarecimento da norma JIS A 5015/92 – Escória siderúrgica para construção de estradas, 1992.

JOHNSON C. M. *Estimating asphalt binder fatigue resistance using an accelerated test method*. Tese de doutorado, University of Wisconsin, Madison, WI. 2010.

JOOST, M. *The Utilization of Steel Slag in Waterway Construction*. In: 3 EUROPEAN SLAG CONFERENCE. 2 nd to 4 th October, 2002. Keyworth, UK. Proceedings of the

3 rd European Slag Conference. Duisburg: EUROSLAG, 2003.

KARASBAHIN, M.; TERZI, S. Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete. *Construction and Building Materials*. v. 21, p. 616-620, 2007.

Kavussi, A.; HICKS, R. G. *Properties of bituminous mixtures containing different fillers*. In: ASPHALT ASSOCIATION PAVING TECHNOLOGISTS, 1997. *Proceeding...* 1997.

KIM, Y.R.; LITTLE, D.N.; SONG, I. *Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental material characteristics – mechanic evaluation*. Washington: Transportation Research Record, 2003. N.1832, P. 1-8.

KLOMPEN, E.T.J.; GOVAERT, L.E. (1999) *Nonlinear Viscoelastic Behaviour of Thermorheologically Complex Materials*. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, Vol. 3, No 1, p. 49-69.

KUEHN, M.; DRISSEN, P.; SCHREY, H. Treatment of Liquid Steel Slags. In: 2nd European slag conference – Euroslag. Dusseldorf, 2000

LANZELLOTTI, R.F.A. *desenvolvimento de fluxograma para beneficiamento de resíduos da construção civil*. 2005. Tese (doutorado), PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO - PUC-RIO, 2005.

LEITE, L. F. M. (1999) *Estudo de preparo e caracterização de asfalto modificados por polímeros*. 267p. Dissertação (Mestrado). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 1999.

LIBERATORI, Leandro de Aguiar; CONSTANTINO, Rômulo Santos. Melhoradores de Adesividade para Misturas Asfálticas – Estado da Arte. In: 18º ENCONTRO DE ASFALTO, 2005, Rio de Janeiro-RJ. Anais

LIMA, C. S.; TOMÉ, L. G.A.; SANT’ANA, H.B.; SOARES, S. A. (2008) *Estudo do comportamento reológico por meio de curvas mestres dos ligantes asfalto-borracha*”. 19 encontro de asfalto, IBP, 9 – 11 junho, Rio de Janeiro, 2008.

LIMA, C. S., *Caracterização de ligantes asfálticos modificados com borracha de pneu e aditivo*. p.159. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2008.

LITTLE, D.N.; EPPS, J.A.; SEBAALY, P. E. *The benefits of hydrated lime in hot mix Asphalt*. Report por National Lime Association, 2006.

LUCENA, A.E.F.L, RODRIGUES, J.K.G., LIMA, F.C.A.A.; NETO, P.N.S. (2004). *Influência o tipo de filler em cimentos asfálticos de petróleo e em misturas asfálticas*. In: 17º Encontro de Asfalto, 2004, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IBP. p: 22 - 29.

MACHADO, A.T., *Estudo comparativo dos métodos de ensaios para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria*. Tese de doutorado. Poli/USP, São Paulo, 2000.

MAGALHÃES, S. T., 2004. *Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho*. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 184 p.

MARCACCINI, G. C. S. *Estudo experimental de laboratório para emprego da escória de aciaria como agregado em camadas de base de pavimento flexível*. Trabalho de

Conclusão de Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2009.

MÁRMOL, I.; BALLESTER, P.; CERRO, S.; MONRÓS, G.; MORALES, J.; SÁNCHEZ, L. Use of granite sludge wastes for the production of coloured cementbased mortars. *Cement & Concrete Composites*. v. 32, p. 617-622, 2010.

MARTIN, S. C.; Ribeiro, R. C.; CORREIA, J. C. G.; *Utilização do Rejeito Oriundo do Corte de Rochas Ornamentais como Agregado Mineral em Pavimentação Asfáltica*. In: XLVIII Congresso Brasileiro de Química. Rio de Janeiro. 29/09 a 3/10 de 2008.

MARTIN J. R., WALLACE H. A, *Design and construction of asphalt pavements*. In: McGraw-Hill Book Company, New York , 1958.

MASUERO, A. B. *Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento*. 267 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2001.

MATTA, P. M. *Indústria de Rochas Ornamentais: Rejeitos x produção limpa*. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM/BA, Salvador, 2003.

MELLO, R.M., AGOSTINHO, L.F.D. Avaliação da utilização da lama proveniente do acabamento de mármore e granitos como matéria prima em cerâmica vermelha. In: Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, 1.; Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais, 2., 2005, Guarapari. Anais...Espírito Santo, 2005.

MORAES, I. V. M. Mármore e granito: lavra, beneficiamento e tratamento de resíduos. Dossiê Técnico. Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

Morales, M. G.; Partal, P.; Navarro, F. J. Viscous Properties and Microstructure of Recycled EVA Modified Bitumen. *Fuel*, vol. 83, p. 31-38, 2004.

MORENO, F.; RUBIO, C.; ECHEVARRIA, M. J. M. Reuse of sludge from the decorative quartz industry in hot bituminous mixes. *Constructions and Building Materials*. v. 25, p. 2465-2471, 2011.

MORIKAWA, E.; KOIDE, H.; MORISHITA, S.; KOCHIHIRA, G. Recent developments on recycling processes for BOF slag and ferrous waste at Sumimoto Metals, 1998.

MORISHITA, S.; KOIDE, H.; KOMAI, K. The development of a new aging process of steel-making slag, Sumimoto Metal Industries & Kawasaki Heavy Industries, Japão. 1995.

Morilha, A. J. Estudo sobre a Ação de Modificadores no Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos e nas Propriedades Mecânicas e de Fadiga das Misturas Asfálticas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2004.

MOTHÉ FILHO, H. F.; POLIVANOV, H.; MOTHE, C. G. Reciclagem dos resíduos sólidos de rochas ornamentais. In: *Anuário do Instituto de Geociências*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, v. 28-2, p. 139-151, 2005.

MOTTA, L. M. G., M. F. P., OLIVEIRA, P. M. F., SOUZA, A. M. *O ensaio Creep estático e dinâmico na avaliação das misturas asfálticas*. In: 30 reunião anual de pavimentação, p.115-135. Salvador, 1996.

MOTTA, L. M. G., TONIAL, I., LEITE, L. F., CONSTANTINO R. S. *Princípio do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas*. Tradução comentada: Background of SUPERPAVE Asphalt Mixture Design and Analysis, nº FHWA-AS-95-003, Petrobrás, Rio de Janeiro, RJ, Brasil 1996.

MOTTA LMG e LEITE LFM. 2000. Efeito do fíler nas características mecânicas das misturas asfálticas. Gramado, RS: 11º Congresso Pan-Americano de Engenharia de Trânsito e Transporte, p. 1019-1030.

MOTZ, H; GEISELER, J. – Products of steel slag an opportunity to save natural resources, In: Waste Management 21, Duisburg, Alemanha, 2001, p. 285-293.

MOURA, W. A.; LIMA, M. B. L.; CALMON, J. L.; MORATTI, M.; SOUZA, F. L. S. Produção de pisos intertravados com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais. In: Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 11, 2006, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: ENTAC, 2006, p. 4227-4236.

OSEKI, S. Properties and usage of steel plant slag. Steel technology center. NKK Corporation. s.d.

PARANHOS, C. A.; LEAL, J. F. (1990), Compatibilidade das Emulsões asfálticas com a Natureza Mineralógica dos Agregados. 10º Encontro de Asfalto; Instituto Brasileiro do Petróleo (IBP). Rio de Janeiro (RJ).

PARTAL, P.; MARTÍNEZ-BOZA, F.; CONDE, B.; GALLEGOS, C. *Rheological characterisation of synthetic binders and unmodified bitumens*. In: Fuel, vol. 78, p.1-10, 1999.

POLACCO, G.; VACIN, O.J.; BIONDI, D.; STASTNA, J.; ZANZOTTO, L. *Dynamic master curve of polymer modified asphalt from three different geometries*. In: Applied Rheology, vol. 13, n. 3, p. 118-124, 2003.

PINILLA, A. (1965) O sistema fíler-betume, algumas considerações sobre sua importância nas misturas densas. Conselho Nacional de Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

QUEIROZ, J., RIBEIRO, R., SOUZA, N. Utilização de resíduos de rochas ornamentais na completação de poços de petróleo. 54º Congresso Brasileiro de Química. Rio Grande do Norte, 2014.

RAPOSO, C. O. L., Estudo Experimental de Compactação e Expansão de Uma Escória de Aciaria LD Para Uso em Pavimentação. Dissertação de M.Sc., UFES, Vitória, ES, Brasil, 2005.

ROCHA, F.L.L. *Utilização do agregado siderúrgico (escoria de aciaria) em revestimento asfáltico tipo tratamento superficial*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia – NUGEO, 2011.

RADFORD TA. 1916. The construction of road and pavements. New York: Edited by McGraw-Hill Company, Inc. 5th ed., 432 p.

RAO SK AND SEN BR. 1973. Evaluation of mineral fillers for asphalt paving mixtures. Highway Research Record 468: 100-108.

REIS, R. C.; SOUSA, W. T. Métodos de lavra de rochas ornamentais. Revista Escola de Minas. Mineração. v. 56, p. 207-209, 2003.

RUBIO, C.; MORENO, F.; BELMONTE, A.; MENÉNDEZ A. Reuse of waste material from decorative quartz solid surfacing in the manufacture of hot bituminous mixes. Construction and Building Materials. v. 25, p. 2465-2471, 2010.

SANTANA, H. *Considerações sobre os nebulosos conceitos e definições de fíler em misturas asfálticas*. In: REUNIÃO Anais. ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., 1995, Cuiabá. Associação Brasileira de Pavimentação, 1995.

SCHAPERLY, R.A. *On the characterization of nonlinear viscoelastic material*. In: Polymer Engineering and Science, vol. 9, 295-310. 1969.

SEGADÃES, A. M.; CARVALHO, M. A.; ACCHAR, W. Using marble and granite rejects to enhance the processing of clay products. Applied Clay Science. v. 30, p. 42-52, 2005.

SHAMES, I.H. *Elastic and Inelastic Stress Analysis*, In: Taylor and Francis, revised printing, Washington DC, Estados Unidos. 1997.

Shenoy, A. Prediction of High Temperature Rheological Properties of Aged Asphalts From the Flow Data of the Original Unaged Samples. Construction and Building Materials, vol. 16, p. 509–517, 2002.

SILVA, J.B.; HOTZA, D.; SEGADÃES, A.M.; ACCHAR, W. Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. Cerâmica, 51, p. 325-330, 2005.

SMITH, B. J.; HESP, S. A. M. *Crack pinning in Asphalt mastic and concrete: effect of rest periods and polymer modifiers on the fatigue life*. In: EURASPHALT AND EUROBITUME CONGRESS, 2., 2000, Barcelona . Proceedings... Barcelona, 2000.

SOUSA, G.M.; ALMEIDA, M.M; FERNANDES, G.; GOMES, R.C. *Estudo do comportamento da escória de aciaria a ser utilizada como lastro de ferrovia através de Ensaio de carga pontual*. In: Simpósio brasileiro de jovens geotécnicos, 1., 2004, São Carlos. Anal... São Carlos: ABMS, 2004.

SOUZA, J. N.; RODRIGUES, J. K. G.; NETO, P. N. S. Utilização do resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas como material de enchimento em concretos asfálticos usinados a quente. Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

SPÍNOLA, V. *Potencial Exportador e Política Pública para uma Evolução Virtuosa: a Indústria de Rochas Ornamentais da Bahia. Dissertação*. (Mestrado em Economia). Universidade Federal da Bahia – UFBA, Salvador, 2002, 179 p.

STASTNA, J.; ZANZOTTO, L.; HO, K. *Fractional complex modulus manifested in Asphalt*. In: Rheologica Acta, vol. 33, p. 344-354, 1994.

Tavares, Diogo Santos Avaliação Laboratorial de Mistura Asfáltica do Tipo SMA com Agregado Siderúrgico / Diogo Santos Tavares. - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012. XIX, 138 p.: il.; 29,7 cm. Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta Dissertação (mestrado) - UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2012. Referências

Bibliográficas: p. 124-135. 1. Misturas Asfálticas. 2. SMA (Stone Matrix Asphalt). 3. Agregado Siderúrgico. I. Motta, Laura Maria Goretti. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

TAYEBALLI, A.A., DEACON J.A., COPLANTZ, J. S. E MONISMITH C. L. *Modeling Fatigue Response of Asphalt Aggregate Mixtures*. In: Proceedings the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 62, p. 285-421. 1993.

TEBALDI, G. *Crack propagation and fracture energy in hot mix asphalt*. 41 Reunião Annual de Pavimentação. Fortaleza. CE. 2012.

THOMAS G. H. Progress in the utilization of steel slags in the UK. In: 2nd European slag conference – Euroslag. Dusseldorf. 2000

Tonial, I. A. Influência do Envelhecimento do Revestimento Asfáltico na Vida de Fadiga de Pavimentos. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 2001.

TUNNICLIFF, D.G. (1962) “A Review of Mineral Filler” Proceedings of Asphalt Association of Paving Technologists. v. 31, pp. 118 – 150.

TS61. Determination of the Linear Viscoelastic Region of a Polymer using a Strain Sweep on the DMA 2980. TA INSTRUMENTS.

YILDIRIM, Y., M. SOLAIMANIAN, T. W. KENNEDY. *Mixing and compaction temperatures for hot mix asphalt*. In: Transportation Research Board. NCHRP – Report 648. 2000.

YUJI, W. The effect of hydration products in steam treated steel slag on the hydration of steel slag Portland blended cement. In: 8º International Congress on the Chemistry of Cement, 1986, Vol. III, p. 36-40

ZANZOTTO, L.; STASTNA, J.; HO, K *Characterization of regular and modified bitumens via their complex modulus*. In: Journal of Applied Polymer Science, Vol. 59, p.1897-1905, 1996.

ZEGARRA, J. R. E. (2007). *Avaliação de misturas produzidas com ligantes asfálticos peruanos convencionais PEN 60/70 e modificados por polímero SBS tipo I 60/60 e PG 76-22*. 264p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transporte e Área de concentração em Infra-Estrutura de Transporte. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.

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

## **BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. DA; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. *Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobras & ABEDA, 2006.

DEDAVID, B. A., *Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores [recurso eletrônico]*. Berenice Anina Dedavid, Carmem Isse Gomes, Giovanna Machado. – Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

NAGATANI, T.; SAITO S.; SATO, M.; YAMADA, M. *Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and in-lens system.* Scanning Microscopy. v.11, 901-909, 1987.