



**ASFALTOS E MISTURAS MODIFICADAS COM  
MATERIAIS ALTERNATIVOS**

**JUAN GABRIEL BASTIDAS MARTINEZ**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**ASFALTOS E MISTURAS MODIFICADAS COM  
MATERIAIS ALTERNATIVOS**

**JUAN GABRIEL BASTIDAS MARTINEZ**

**ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr.**  
**CO-ORIENTADORA: LÊDA CHRISTIANE DE F.L. LUCENA, DSc.**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.TD-138/17**

**BRASÍLIA / DF: 22 DE NOVEMBRO / 2017**

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

**ASFALTOS E MISTURAS MODIFICADAS COM MATERIAIS  
ALTERNATIVOS**

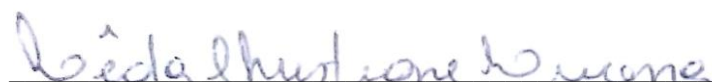
**JUAN GABRIEL BASTIDAS MARTINEZ**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

**APROVADA POR:**

---

**JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr. (UnB)  
(ORIENTADOR)**



---

**LÊDA CHRISTIANE DE F.L. LUCENA, DSc. (UFCG)  
(CO-ORIENTADORA)**

---

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**WASHINGTON PERES NÚÑEZ, DSc. (UFRGS)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

---

**HUGO ALEXANDER RONDÓN QUINTANA, DSc. (Udistrital –Colômbia)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 22 de novembro de 2017**

## FICHA CATALOGRÁFICA

BASTIDAS, JUAN GABRIEL

Asfaltos e misturas modificadas com materiais alternativos.

xxv 207 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2017)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

- |                           |                         |
|---------------------------|-------------------------|
| 1. Asfaltos modificados   | 2. Misturas asfálticas  |
| 3. Materiais alternativos | 4. Pavimentos flexíveis |
| I. ENC/FT/UnB             | II. Título (série)      |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BASTIDAS, J.G. (2017). Asfaltos e misturas modificados com materiais alternativos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-138/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 206 p.


## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Juan Gabriel Bastidas Martinez

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Asfaltos e misturas modificadas com materiais alternativos.

GRAU / ANO: Doutor / 2017

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



**Juan Gabriel Bastidas Martínez**

Universidade de Brasília, Secretaria de coordenação de Pós-Graduação em Geotecnia  
Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Prédio SG-12  
Universidade de Brasília

CEP 700.882.381-99 – Brasília/DF

San Juan de Pasto - Colombia

[jbastidasmartinez@gmail.com](mailto:jbastidasmartinez@gmail.com)

*Se o Senhor não constrói a casa, em vão se cansam os construtores (Sal 127).*

## DEDICATÓRIA

*A meus pais Gloria e Oliver, minhas irmãs pelo amor, compressão e apoio.*

## AGRADECIMENTOS

- À Deus, pelo dom da vida e sabedoria para realizar este trabalho.
- Ao meu orientador, professor José Camapum, pelos ensinamentos técnicos e para a vida durante o tempo de orientação durante o mestrado e doutorado.
- A minha coorientadora, professora Lêda Christiane de F.L. Lucena, pela motivação, ajuda e disposição.
- Ao professor Márcio Muniz de Farias, pela disponibilização do laboratório INFRALAB para a viabilização dos ensaios e por toda a ajuda e apoio incondicional durante minha estadia no Brasil.
- À Universidade de Brasília, ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, especialmente aos professores Hernán Martinez e André Brasil.
- Ao CNPq pelo apoio financeiro e material.
- Ao laboratório de FURNAS em Goiânia, em especial ao Renato Batista de Oliveira pelo apoio e ajuda nas análises no microscópio eletrônico de varredura.
- Aos laboratórios de Química da Universidade de Brasília e da Universidade Federal de Campinha Grande pela realização dos ensaios.
- À CAESB, pelo fornecimento das amostras dos resíduos lodos.
- À CENTRO OESTE ASFALTOS, pelo fornecimento das amostras do cimento asfáltico.
- A meus colegas do laboratório e demais pesquisadores que me ajudaram: Leticia Nunes, Ferney Quiñones, Jaime Obando, Alejandra Gomez, Liosber Medina, Igor Beja, Igor Rodrigues, Juliana Gomes, Barbara e Julia porto.
- A todos os colegas e amigos pela amizade durante esta pesquisa e em especial à Ivone, Nelson, Carlos Moreno, Juliana Alarcon, Jairo, Eduarda, Barbara, Julian, Robinson, Maria Paz, Rafael e à distância ao David e ao Walter.
- À todas as pessoas que apoiaram a realização desta etapa na minha vida.

## RESUMO

A disposição final dos resíduos sólidos de forma ambientalmente e tecnicamente correta é um desafio mundial. No Brasil a lei 12.305 de 2010 teve por objetivo regulamentar esta disposição a fim de preservar o meio ambiente. O presente estudo teve como principal objetivo analisar a possibilidade técnica de disposição dos resíduos industriais provenientes das Estações de Tratamento de Água (lodos de ETA) e de rejeitos do beneficiamento de ferro em camadas de revestimento de pavimentos, com fins rodoviários. Além disto, se estudo uma técnica alternativa de fabricação do asfalto modificado com borracha proveniente dos pneus usados. A solução proposta contemplou a incorporação de diferentes teores dos resíduos finos na matriz do ligante asfáltico CAP 50/70. Em princípio, foram realizados ensaios químicos e mineralógicos para determinar as principais características dos materiais alternativos. Em seguida, foram realizados dois grupos de estudo, o primeiro com a incorporação do fíler convencional tipo cal e fíleres alternativos (lodos de ETA e os rejeitos de minério de ferro RMF) e o segundo grupo com asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha na forma convencional (AB8) e com um composto de borracha por meio de um fíler estabilizador do tipo cal (AB CB). Os asfaltos modificados foram submetidos a ensaios clássicos de caracterização física de asfaltos e reológicos nas condições antes e após o envelhecimento *Rolling Thin Film Oven Test* RTOFT. Após esta etapa, foram feitas as dosagens de Concreto Betuminoso Usinado a Quente-CBUQ e Camada Porosa de Atrito-CPA para cada grupo de asfaltos modificados e realizados os ensaios de caracterização mecânica: resistência à tração, módulo de resiliência, *creep* estático, vida de fadiga por compressão diametral, resistência ao dano por umidade induzida e desgaste por abrasão Cântabro. Os resultados dos ligantes asfálticos modificados com os fíleres apresentaram maior consistência em função do teor adicionado, obtendo melhor desempenho mecânico nas misturas asfálticas CBUQ e CPA em termos da vida de fadiga e deformação permanente. No caso dos asfaltos modificados com o AB CB observaram-se aumentos da consistência e dos parâmetros reológicos, as misturas asfálticas CBUQ apresentaram melhor desempenho mecânico, devido às interações entre a superfície da borracha-asfalto, enquanto que as misturas CPA apresentaram menores desempenhos em relação às amostras de referência. Portanto, a adição dos materiais alternativos estudados nas misturas asfálticas pode ser considerada uma prática viável do ponto de vista técnico e ambiental, contribuindo com alternativas seguras de disposição final de resíduos.

**Palavras Chaves:** Composto de borracha; lodo de ETA; rejeito de minério de ferro.



## ABSTRACT

The final disposal of solid waste in an environmentally and technically correct way is a global challenge. In Brazil, Law 12,305 of 2010 aims to regulate that in order to preserve the environment. This study aims to analyze the technical feasibility of the disposal of industrial waste generated in the Water Treatment Station (STW sludge) and residues originated by the use of iron in asphalt pavement. Also, an alternative technique of manufacturing modified rubber asphalt from used tires was studied. The proposed solution contemplates the incorporation of different contents of fine waste in asphalt cement AC 50-70. Initially, chemical and mineralogical tests were carried out to determine the main characteristics of the alternative materials. Two studies were performed, the first adding conventional mineral filler as lime and alternative mineral fillers (STW sludge and iron mining waste). The second group, using asphalts modified by elastomers as rubber (conventional form AC 8) and rubber compound (adding lime as stabilizer mineral filler ACR). The modified asphalts were subject of physical and rheological characterization tests in different conditions, before and after short-term aging in Rolling Thin Film Oven Test (RTOFT). Dense hot asphalt HMD and open-graded friction course (OGFC) trials were made for each group. Mechanical characterization tests were performed like tensile strength, modulus of resilience, static creep, fatigue life, diametral compression; resistance to damage induced and wear cantabro. The modified asphalts with the mineral fillers presented greater consistency depending on the added content, obtaining better mechanical performance in the asphalt mixtures in terms of fatigue and rutting. In the case of asphalts modified with ACR, an increase in the consistency and rheological parameters was observed. The HMD presented better mechanical performance due to the interactions between the surface of the rubber grain and the asphalt, while the draining mixtures presented lower performances in relation to the control samples. Therefore, the addition of the alternative materials studied in the asphalt mixtures can be considered as a viable practice from the technical and environmental point of view, contributing with safe alternatives of final waste disposal.

**Keywords:** Rubber compound; STW sludge, iron mining waste.

## RESUMEN

La disposición final de residuos sólidos de forma ambiental y técnicamente correcta es un desafío mundial. En Brasil, la ley 12.305 de 2010 tiene como objetivo reglamentar esta disposición a fin de preservar el medio ambiente. Este estudio tiene como objetivo analizar la posibilidad técnica de la disposición de los residuos industriales originados en las Estaciones de Tratamiento de Agua (lodos de ETA) y de los residuos originados en el aprovechamiento del hierro en carpetas asfálticas de pavimentos. Por otra parte, se estudió una técnica alternativa de fabricación de asfalto modificado con grano de caucho proveniente de las llantas usadas. La solución propuesta contempló la incorporación de diferentes contenidos de los residuos finos en la matriz del cemento asfáltico CA 50/70. Inicialmente, fueron realizados ensayos químicos y mineralógicos para determinar las principales características de los materiales alternativos. Después, fueron realizados dos grupos de estudio, el primero con incorporación de llenante mineral convencional tipo cal y llenantes minerales alternativos (lodos de ETA y los residuos de minería de hierro) y el segundo grupo, con asfaltos modificados con elastómeros tipo grano de caucho de forma convencional AC8 y con un compuesto de caucho por medio de un llenante mineral estabilizador de tipo cal (AC CC). Los asfaltos modificados fueron sometidos a ensayos de caracterización física y reológica en la condición antes y después del envejecimiento a corto plazo. Después de esta etapa, fueron realizados los diseños de las mezclas asfálticas densas y drenantes en caliente para cada grupo de asfaltos modificados. Se realizaron los ensayos de caracterización mecánica tales como: resistencia a la tracción, módulo de resiliencia, *creep* estático, vida de fatiga por compresión diametral, resistencia al daño por humedad inducida y desgaste cántabro. Los resultados de los asfaltos modificados con los llenantes minerales presentaron mayor consistencia en función del contenido adicionado, obteniendo mejor desempeño mecánico en las mezclas asfálticas en términos de la vida de fatiga y deformaciones permanentes. En el caso de los asfaltos modificado con AC CC se observó aumento de la consistencia y de los parámetros reológicos. Las misturas asfálticas densas presentaron mejor desempeño mecánico debido a las interacciones entre la superficie del grano de caucho y el asfalto, mientras que las mezclas drenantes presentaron menores desempeños en relación a las muestras de control. Por lo tanto, la adición de los materiales alternativos estudiados en las mezclas asfálticas puede ser considerada como una práctica viable desde el punto de vista técnico y ambiental, contribuyendo con alternativas seguras de disposición final de residuos.

**Palabras claves:** Compuesto de caucho; lodo de ETA, residuo de minería de hierro.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVAÇÃO .....	3
1.2	OBJETIVO.....	4
1.3	ESTRUTURA DA TESE.....	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS .....	6
2.1.1	Resíduos das estações de tratamento de água.....	6
2.1.2	Rejeito de minério de ferro.....	10
2.1.3	Considerações sobre a borracha de pneus usados e o asfalto borracha.....	14
2.2	LIGANTE ASFÁLTICO.....	16
2.2.1	Caraterísticas químicas dos ligantes asfálticos.....	16
2.2.2	Asfaltos modificados.....	19
2.2.3	Ensaio de caracterização convencionais.....	23
2.2.4	Ensaio de caracterização reológica.....	24
2.3	INTERAÇÃO ASFALTO FÍLER - MÁSTIQUE ASFÁLTICO.....	34
2.4	MISTURAS ASFÁLTICAS .....	37
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>42</b>
3.1	MATERIAIS ALTERNATIVOS MODIFICADORES DO LIGANTE ASFÁLTICO .....	43
3.1.1	Ensaio de caracterização física .....	46
3.1.2	Ensaio de caracterização química.....	47
3.2	LIGANTE ASFÁLTICO.....	48
3.2.1	Ligantes asfálticos modificados com elastômero tipo borracha.....	49
3.2.2	Ligantes asfálticos modificados com fíleres alternativos e comerciais.....	50
3.2.3	Caraterização física de ligantes asfálticos.....	51
3.2.4	Ensaio de estabilidade à estocagem ou armazenamento .....	52
3.2.5	Efeito do envelhecimento a curto prazo dos ligantes asfálticos .....	53
3.2.6	Caraterização reológica de ligantes asfálticos.....	55
3.2.6.1	<i>Viscosidade rotacional.....</i>	<i>55</i>
3.2.6.2	<i>Curvas Isocronas .....</i>	<i>57</i>
3.2.6.3	<i>Curva mestre do ligante asfáltico .....</i>	<i>57</i>
3.2.6.4	<i>Fluência e recuperação sob tensão múltipla, (Multiple Stress Creep and Recovery - MSCR).....</i>	<i>61</i>
3.2.6.5	<i>Ensaio de varredura de amplitude linear (LAS).....</i>	<i>62</i>
3.3	AGREGADOS PETREOS PARA MISTURAS ASFALTICAS .....	63
3.4	DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS .....	64
3.4.1	Misturas de Concreto Betuminoso Usinado a Quente CBUQ.....	64
3.4.2	Camada Porosa de Atrito CPA.....	69
3.5	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	74

3.5.1	Resistência à tração por compressão diametral - RT.....	75
3.5.2	Estabilidade e fluência Marshall .....	77
3.5.3	Módulo de resiliência .....	78
3.5.4	Creep estático .....	79
3.5.5	Fadiga por compressão diametral.....	81
3.5.6	Resistência ao dano por umidade induzida .....	83
3.5.7	Desgaste por abrasão Cântabro .....	85
3.6	TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS .....	86
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS DOS LIGANTES</b>	
	<b>ASFALTICOS .....</b>	<b>88</b>
4.1	CARATERIZAÇÃO DE MATERIAIS .....	88
4.1.1	Caraterização Física .....	88
4.1.2	Caraterização Química .....	89
4.1.2.1	<i>Composição química elementar.....</i>	89
4.1.2.2	<i>Difração de Raios X.....</i>	90
4.1.2.3	<i>Análise Térmica Diferençal (ATD).....</i>	92
4.1.2.4	<i>Análise Térmica Gravimétrica (TG).....</i>	93
4.1.2.5	<i>Determinação da carga elétrica da superfície das partículas de fíleres .....</i>	95
4.1.2.6	<i>Caracterização dos fíleres por microscopia eletrônica de varredura MEV.....</i>	96
4.2	CARATERÍSTICAS FÍSICAS DOS LIGANTES ASFALTICOS MODIFICADOS .....	98
4.2.1	Efeito do envelhecimento a curto prazo – ensaio RTOFT .....	98
4.2.2	Ensaio de Penetração.....	100
4.2.3	Penetração Retida.....	103
4.2.4	Ensaio de Ponto de Amolecimento .....	105
4.2.5	Índice de Suscetibilidade Térmica (IST) ou Índice de Penetração (IP) .....	107
4.2.6	Ensaio de Ductilidade.....	109
4.2.7	Ensaio de Viscosidade rotacional.....	111
4.2.8	Ensaio de Estabilidade à estocagem ou armazenamento.....	119
4.2.9	Análise estatística dos resultados da caraterização física dos ligantes asfálticos modificados com fíleres .....	121
4.2.10	Considerações finais sobre a consistência e viscosidade dos asfaltos modificados com fíleres e elastômeros .....	123
4.3	ESTUDO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO – DSR .....	125
4.3.1	Curvas isócronas .....	125
4.3.2	Curvas mestras .....	130
4.3.3	Fluência e recuperação sob tensão múltipla, <i>Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)</i> . 136	
4.3.4	Ensaio de Varredura de Amplitude Linear (LAS).....	145
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS DE MISTURAS</b>	
	<b>ASFÁLTICAS.....</b>	<b>150</b>
5.1	PARÂMETROS DE DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS .....	150
5.1.1	Ensaio Marshall de misturas asfálticas CBUQ.....	150
5.1.2	Dosagem de misturas asfálticas CPA.....	159

5.2	<b>CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS .....</b>	<b>167</b>
5.2.1	Resistência à tração por compressão diametral .....	168
5.2.1.1	<i>Misturas asfálticas com ligantes modificados com elastômeros.....</i>	<i>168</i>
5.2.1.2	<i>Misturas asfálticas com ligantes modificados com fíleres .....</i>	<i>169</i>
5.2.1.3	<i>Análises das causas de alteração da resistência à tração .....</i>	<i>170</i>
5.2.2	Estabilidade Marshall .....	173
5.2.2.1	<i>Misturas asfálticas com ligantes modificados com elastômeros.....</i>	<i>173</i>
5.2.2.2	<i>Misturas asfálticas com ligantes modificados com fíleres .....</i>	<i>174</i>
5.2.2.3	<i>Análises das causas de alteração da estabilidade Marshall.....</i>	<i>175</i>
5.2.3	Módulo de resiliência .....	178
5.2.3.1	<i>Misturas asfálticas com ligantes modificados com elastômeros.....</i>	<i>178</i>
5.2.3.2	<i>Misturas asfálticas com ligantes modificados com fíleres .....</i>	<i>180</i>
5.2.4	Creep estático .....	183
5.2.4.1	<i>Misturas asfálticas com ligantes modificados com elastômeros.....</i>	<i>183</i>
5.2.4.2	<i>Misturas asfálticas com ligantes modificados com fíleres .....</i>	<i>187</i>
5.2.5	Ensaio de vida de fadiga por compressão diametral .....	190
5.2.5.1	<i>Misturas asfálticas com ligantes modificados com elastômeros.....</i>	<i>190</i>
5.2.5.2	<i>Misturas asfálticas com ligantes modificados com fíleres .....</i>	<i>192</i>
5.2.6	Resistência ao dano por umidade induzida .....	193
5.2.6.1	<i>Misturas asfálticas com ligantes modificados com elastômeros.....</i>	<i>193</i>
5.2.6.2	<i>Misturas asfálticas com ligantes modificados com fíleres .....</i>	<i>194</i>
5.2.6.3	<i>Análises das causas de alteração da relação da resistência à tração RRT .....</i>	<i>195</i>
5.2.7	Desgaste por abrasão .....	198
5.2.7.1	<i>Misturas asfálticas com ligantes modificados com elastômeros.....</i>	<i>198</i>
5.2.7.2	<i>Misturas asfálticas com ligantes modificados com fíleres .....</i>	<i>199</i>
5.2.7.3	<i>Análises das causas de alteração do desgaste à abrasão .....</i>	<i>201</i>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....</b>	<b>205</b>
6.1	CONCLUSÕES.....	205
6.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	207
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>209</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Características físico-químicas de lodos de ETA.....	8
Tabela 2.2 Características dos óxidos presentes no rejeito de minério de ferro. ....	12
Tabela 2.3 Composição química do ligante asfáltico.....	16
Tabela 2.4 Principais componentes do ligante asfáltico (Bernucci <i>et al.</i> , 2008). ....	17
Tabela 2.5 características dos principais tipos de polímeros (Rondon 2016).....	20
Tabela 2.6 Modelos básicos de comportamento unidimensional (modificado - Carvalho, 2014). .....	25
Tabela 2.7 ensaios e equipamentos de avaliação de ligantes asfálticos segundo a metodologia SUPERPAVE.....	27
Tabela 2.8 Critérios para o controle da ocorrência dos defeitos nos revestimentos de pavimentos asfálticos.....	29
Tabela 2.9 Valores de $ G^* .sen(\delta)$ (ASSTHO, 2009). ....	30
Tabela 2.10 Ensaio de vida de fadiga no ligante asfáltico.....	31
Tabela 2.11 Ensaio de deformação permanente no ligante asfáltico.....	33
Tabela 2.12 Classificação do ligante asfáltico quanto ao valor de $J_{nr}$ (FHWA) .....	33
Tabela 3.1. Percentuais de matérias constituintes dos ligantes modificados .....	50
Tabela 3.2 Dosagem gravimétrica e volumétrica dos asfaltos modificados com fíleres. ....	51
Tabela 3.3. Especificações Brasileiras para ensaios de caracterização convencional de asfaltos. .....	51
Tabela 3.4 Condições do ensaio de estabilidade ao armazenamento de asfaltos modificados segundo diferentes normativas. ....	52
Tabela 3.5 Variações admissíveis após do ensaio RTFOT (ANP, 2005). ....	54
Tabela 3.6 Parâmetros do modelo sigmoidal – CAP 50/70 .....	60
Tabela 3.7 Ensaio de caracterização dos agregados .....	63
Tabela 3.8 Tipos de misturas asfálticas com ligantes modificados com elastômeros e fíleres.....	64
Tabela 3.9 Faixa granulométrica tipo C - DNIT 031 (DNIT, 2006).....	65
Tabela 3.10 Cálculo do Teor ótimo de asfalto teórico da mistura CBUQ. ....	66
Tabela 3.11 Traço granulométrico da mistura CBUQ na faixa de 4 a 6% de ligante asfáltico. .....	67
Tabela 3.12. Especificações de Concreto Asfáltico CBUQ –DNIT 031 (DNIT, 2006). ....	69
Tabela 3.13 Faixa granulométrica tipo V - DNIT 386 (DNIT, 1999).....	70
Tabela 3.14 Traço granulométrico da mistura CPA na faixa de 4 a 6% de ligante asfáltico...	71

Tabela 3.15 Cálculo do teor ótimo de asfalto teórico da mistura CPA.....	71
Tabela 3.16 Especificações exigidas CPA –DNIT 383 (DNIT, 1999). .....	74
Tabela 3.17 Ensaio de caracterização mecânica de misturas asfálticas. ....	74
Tabela 3.18 Intervalos para a determinação do tipo de correlação entre variáveis para o teste de <i>Pearson</i> .....	87
Tabela 4.1 Caracterização física do ligante asfáltico e dos materiais fíleres modificadores. ....	88
Tabela 4.2 Composição química elementar pela FRX.....	89
Tabela 4.3 Determinação da carga elétrica da superfície das partículas de fíleres .....	95
Tabela 4.4 Modelos exponenciais para a viscosidade versus o teor de aditivo volumétrico. ....	113
Tabela 4.5 Análise estatística das características físicas dos asfaltos modificados com fíleres. ....	122
Tabela 4.6 Temperaturas de usinagem e compactação dos asfaltos modificados com fíleres. ....	123
Tabela 4.7 Temperaturas de usinagem e compactação ponderadas em relação ao teor de CAP 50/70 presente nos asfaltos modificados com fíleres. ....	124
Tabela 4.8 Valores dos coeficientes A e B dos modelos de fadiga a 25°C para os ligantes modificados com elastômeros. ....	146
Tabela 4.9 Valores dos coeficientes A e B dos modelos de fadiga a 25°C para os ligantes modificados com fíleres. ....	148
Tabela 5.1 Parâmetros de dosagem Marshall das misturas CBUQ com asfaltos modificados com elastômeros e amostra de referência CAP 50/70.....	154
Tabela 5.2 Parâmetros dosagem Marshall de misturas CBUQ com asfaltos modificados com fíleres.....	158
Tabela 5.3 Parâmetros dosagem de misturas CPA com asfaltos modificados com elastômeros. ....	162
Tabela 5.4 Parâmetros dosagem de misturas CPA com asfaltos modificados com fíleres....	167
Tabela 5.5 Parâmetros da lei de fadiga das misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com elastômeros – Tensão controlada. ....	191
Tabela 5.6 Parâmetros da lei de fadiga das misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com fíleres – Tensão controlada.....	192

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Fluxograma do processo de tratamento de água potável. ....	7
Figura 2.2 Fluxograma do processo de beneficiamento do minério de ferro.....	11
Figura 2.3 Distribuição das exportações de minerais (DNPM, 2016). ....	11
Figura 2.4 Comportamento do coloide: (a) estado Gel; (b) estado Sol.....	18
Figura 2.5 Estrutura do ligante asfáltico proposto pelo SHPR (Jones & Kennedy, 1991). ....	18
Figura 2.6. Modo de operação do reometro de cisalhamento dinâmico: (a) aplicação do carregamento; (b) defasagem entre tensão e deformação (Bernucci <i>et al.</i> , 2008). ....	28
Figura 2.7 Interação físico-química no mástique – Modificado (Davis & Castorena, 2015). .	34
Figura 2.8 Sistema de funcionamento da camada porosa de atrito CPA (Oliveira, 2003).....	38
Figura 3.1. Estudo em laboratório de ligantes asfálticos modificados.....	42
Figura 3.2. Estudo em laboratório de misturas asfálticas com ligantes modificados.....	43
Figura 3.3 Amostra do rejeito de mineração. ....	44
Figura 3.4. Resíduos de lodos de ETA: (a) disposição final; (b) secagem inicial ao ar; (c) secagem final ao ar. ....	44
Figura 3.5 Perda de massa <i>versus</i> temperatura de calcinação do lodo de ETA (Martinez, 2014). ....	45
Figura 3.6 Perda de massa <i>versus</i> tempo na temperatura de 165 °C.....	45
Figura 3.7 Fabricação do composto de borracha.....	49
Figura 3.8 Sequência do ensaio de estabilidade ao armazenamento de asfalto: (a) Recipientes adaptados do ensaio; (b) Calibração da caixa de areia – controle de temperatura; (c) aquecimento dos materiais; (d) Peso do asfalto modificado. ....	53
Figura 3.9 Ensaio de envelhecimento a curto prazo RTFOT: (a) Frascos antes do ensaio; (b) Frascos após o ensaio; (c) Estufa de envelhecimento a curto prazo. ....	54
Figura 3.10 Ensaio de viscosidade brookfield: (a) colocação da amostra; (b) tamanhos dos <i>spindles</i> .....	56
Figura 3.11 Rêometro de cisalhamento dinâmico DSR: (a) Sistema do equipamento; (b) corpo de prova de diâmetro 8 mm.....	57
Figura 3.12 Curvas isotermas do CAP 50/70 para as temperaturas de estudo.....	59
Figura 3.13 Curvas Isóbaras e mestra do CAP 50/70 para as temperaturas de estudo. ....	60
Figura 3.14 Tensão e deformação cisalhante para os ciclos de carga de 0.1kPa; 160 kPa; 320 kPa - ensaio MSCR.....	62
Figura 3.15 Modelo de vida de fadiga (Johnson, 2010).....	63
Figura 3.16 Faixa granulométrica C – DNIT 031 (DNIT 2006).....	65



Figura 3.17 Metodologia Marshall: (a) quantidades das frações dos agregados; (b) aquecimento dos materiais; (c) mistura dos materiais – usinagem; (d) compactação do corpo de prova; (e) pré-condicionamento das amostras; (f) determinação da Estabilidade e Fluência Marshall. ..	69
Figura 3.18 Faixa granulométrica tipo V - DNIT 386 (DNIT, 1999). .....	70
Figura 3.19 Esquema do volume de vazios na camada porosa de atrito CPA. ....	72
Figura 3.20 Determinação da densidade aparente: (a) colocação do filme de PVC no corpo de prova; (b) corpos de prova com e sem filme de PVC. ....	73
Figura 3.21 Ensaios de comportamento mecânico: (a) corpos de prova; (b) resistência à tração por compressão diametral; (c) módulo de resiliência; (d) creep estático; (e) acondicionamento de amostras no ensaio <i>Lottaman Modificado</i> ; (f) resistência à abrasão Cântabro. ....	75
Figura 3.22 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral – Ensaio Brasileiro. ....	76
Figura 3.23 Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. ....	76
Figura 3.24 Ensaio de estabilidade e fluência Marshall. ....	77
Figura 3.25 Ensaio de módulo de resiliência. ....	78
Figura 3.26 Aplicação de cinco ciclos de carga e deslocamentos obtidos na para a determinação do módulo de resiliência. ....	79
Figura 3.27 Ensaio creep estático: (a) Equipamento de ensaio; (b) corpos de prova. ....	79
Figura 3.28 Aplicação do carregamento, descarregamento e deformação axial vertical da mistura asfáltica no tempo – ensaio creep estático. ....	80
Figura 3.29 Esquema das componentes de deformação para o material visco-elasto-plástico, submetido ao estado de tensão controlada (Sides <i>et al.</i> , 1985). ....	81
Figura 3.30 Vida de fadiga de misturas asfálticas. ....	82
Figura 3.31 Sequência do ensaio de vida de fadiga por compressão diametral. ....	83
Figura 3.32 Ensaio de resistência ao dano por umidade induzida: (a) Equipamento para a saturação; (b) determinação da saturação; (c) - (d) ciclo de congelamento; (e) condicionamento no banho Maria a 60°C; (f) ensaio de resistência à tração por compressão diametral. ....	84
Figura 3.33 Sequência do ensaio de abrasão Cântabro. ....	85
Figura 4.1 Difratoograma de Raios X – resíduo de lodo de ETA. ....	91
Figura 4.2 Difratoograma de Raios X – Rejeito de Minério de Ferro RMF. ....	91
Figura 4.3 Difratoograma de Raios X – Cal. ....	92
Figura 4.4 Análise Termodiferençal ATD: (a) borracha de pneus usados; (b) materiais fíleres. ....	93
Figura 4.5 Análise Termo Gravimétrica TG: (a) borracha de pneus usados; (b) materiais fíleres. ....	94
Figura 4.6 Ensaio de adesividade do ligante asfáltico modificado ao agregado graúdo. ....	96

Figura 4.7 Imagens do MEV dos fíleres: (a) cal; (b) RMF; (c) lodo de ETA.....	97
Figura 4.8 Perda de massa por envelhecimento a curto prazo RTFOT do asfalto modificado com elastômeros.....	98
Figura 4.9 Perda de massa por envelhecimento a curto prazo RTFOT do asfalto modificado com fíleres. ....	99
Figura 4.10. (a) penetração antes e após RTFOT de ligantes asfálticos modificados com elastômeros; (b) relação penetração/penetração CAP 50/70.....	100
Figura 4.11 Penetração de ligantes asfálticos modificados com fíleres: (a) antes o RTFOT; (b) penetração/penetração CAP 50/70 antes o RTFOT; (c) após o RTFOT; (d) penetração/penetração CAP 50/70 após o RTFOT. ....	102
Figura 4.12 Penetração retida antes de asfaltos modificado com elastômeros. ....	103
Figura 4.13 Penetração retida de asfaltos modificado com fíleres.....	104
Figura 4.14 (a) Ensaio de ponto de amolecimento antes e após RTFOT de ligantes asfálticos modificados com elastômeros; (b) relação ponto de amolecimento/ponto de amolecimento CAP 50/70.....	105
Figura 4.15 Ponto de amolecimento de ligantes asfálticos modificados com fíleres: (a) antes o RTFOT; (b) ponto de amolecimento/ponto de amolecimento CAP 50/70 antes o RTFOT; (c) após o RTFOT; (d) ponto de amolecimento/ponto de amolecimento CAP 50/70 após o RTFOT. ....	106
Figura 4.16 Índice de Susceptibilidade Térmica de ligantes asfálticos modificados com elastômeros.....	107
Figura 4.17 Índice de Susceptibilidade Térmica de ligantes asfálticos modificados com fíleres. ....	108
Figura 4.18 (a) Ensaio de ductilidade antes e após RTFOT de ligantes asfálticos modificados com elastômeros; (b) relação ductilidade/ductilidade CAP 50/70. ....	109
Figura 4.19 Ductilidade de ligantes asfálticos modificados com fíleres: (a) antes o RTFOT; (b) ductilidade/ductilidade CAP 50/70 antes o RTFOT; (c) após o RTFOT; (d) ductilidade/ductilidade CAP 50/70 após o RTFOT. ....	110
Figura 4.20 Ensaio de viscosidade de CAP 50/70 puro e modificado com elastômeros. ....	112
Figura 4.21 Variação da viscosidade com o teor de aditivo em volume: (a) antes e (b) após o RTFOT. ....	112
Figura 4.22 Temperaturas médias de: (a) compactação e; (b) usinagem de ligantes asfálticos modificados com elastômeros do tipo borracha. ....	113
Figura 4.23 Índice de susceptibilidade da viscosidade à temperatura de ligantes asfálticos modificados com elastômeros. ....	114
Figura 4.24 Viscosidade CAP 50/70 puro e modificado com tipo Cal. ....	115

Figura 4.25 Viscosidade CAP 50/70 puro e modificado com rejeito de minério de ferro RMF. ....	116
Figura 4.26 Viscosidade CAP 50/70 puro e modificado com lodo de ETA. ....	116
Figura 4.27 Viscosidade versus teor de aditivo em volume: (a) T: 135 °C antes RTFOT; (b) T: 135 °C após RTFOT; (c) T: 150 °C antes RTFOT; (d) T: 150 °C após RTFOT; (e) T: 177 °C antes RTFOT; (f) T: 177 °C após RTFOT .....	117
Figura 4.28 Temperaturas médias de: (a) compactação e (b) usinagem de ligantes asfálticos modificados com fíleres. ....	118
Figura 4.29 Índice de susceptibilidade da viscosidade à temperatura de asfaltos modificados com fíleres. ....	119
Figura 4.30 Diferença do ponto de amolecimento no ensaio de estabilidade ao armazenamento de ligantes asfálticos modificados com fíleres. ....	120
Figura 4.31 Curvas isócronas para os asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha. ....	125
Figura 4.32 Variação dos parâmetros reológicos com o teor de aditivo em volume: (a) Módulo de cisalhamento dinâmico e (b) ângulo de fase.....	126
Figura 4.33 Curvas Isócronas de asfaltos modificados com fíleres: (a-b) cal; (c-d) RMF; (e-f) Lodo de ETA. ....	127
Figura 4.34 Parâmetros reológicos <i>versus</i> teor de aditivo em volume: (a) G* a 40°C; (b) ângulo de fase a 40°C; (c) G* a 64°C; (d) ângulo de fase a 64°C; (e) G* a 88°C; (f) ângulo de fase a 88°C.....	129
Figura 4.35 Curvas mestras: CAP 50/70 puro e modificado com diferentes teores de CB. ..	130
Figura 4.36 Curvas mestras: CAP 50/70, AB-8 LA e AB CB 22. ....	131
Figura 4.37 Curvas mestras: CAP 50/70 puro e modificado com diferentes teores de cal....	132
Figura 4.38 Curvas mestras: CAP 50/70 puro e modificado com diferentes teores de cal....	133
Figura 4.39 Curvas mestras: CAP 50/70 puro e modificado com diferentes teores de lodos de ETA. ....	134
Figura 4.40 Curvas mestras: CAP 50/70 e ligantes asfálticos modificados com fíleres (a) 20% de teor gravimétrico e (b) 30% cal, 40% RMF e 20% de lodo de ETE em teores volumétricos. ....	135
Figura 4.41 Resultados do ensaio MSCR de ligantes modificados com elastômeros: (a-b) carregamento 0.1 kPa; (c-d) carregamento 1.6 kPa; (e-f) carregamento 3.2 kPa. ....	137
Figura 4.42 Resultados do ensaio MSCR – Jnr diff: (a) 0,1 kPa – 1,6 kPa; (b) 0,1 kPa - 3,2 kPa. ....	139
Figura 4.43 Resultados do ensaio MSCR de ligantes modificados com fíleres: (a-b) carregamento 0.1 kPa; (c-d) carregamento 1.6 kPa; (e-f) carregamento 3.2 kPa. ....	140

Figura 4.44 Resultados do ensaio MSCR – Jnr diff: (a) 0,1 kPa – 1,6 kPa; (b) 0,1 kPa - 3,2 kPa. .....	142
Figura 4.45 Recuperação elástica <i>versus</i> teor de aditivo nos ligantes asfálticos modificados: (a) Carregamento 0,1 kPa; (b) Carregamento 1,6 kPa; (c) Carregamento 3,2 kPa.....	143
Figura 4.46 Jnr <i>versus</i> teor de aditivo nos ligantes asfálticos modificados: (a) Carregamento 0,1 kPa; (b) Carregamento 1,6 kPa; (c) Carregamento 3,2 kPa. ....	144
Figura 4.47 Ensaio LAS os asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha. ....	145
Figura 4.48 Estimativa da vida de fadiga (25°C) em função da deformação para asfaltos modificados com elastômeros. ....	146
Figura 4.49 Ensaio LAS os asfaltos modificados com fíleres.....	147
Figura 4.50. Estimativa da vida de fadiga (25°C) em função da deformação para asfaltos modificados com fíleres. ....	148
Figura 5.1 Ensaio Marshall: (a) Volume de vazios [Vv]; (b) Volume de Agregado Mineral [VAM]; (c) Relação Betume Vazios [RBV]; (d) Estabilidade Marshall [E]; (e) Fluência Marshall [F]; (e) Relação [E/F] em misturas CBUQ. ....	151
Figura 5.2 (a) Estabilidade e (b) fluência Marshall <i>versus</i> volume de vazios. ....	152
Figura 5.3 Teor ótimo de asfalto em misturas CBUQ com asfaltos modificados com elastômeros.....	153
Figura 5.4 Ensaio Marshall: (a) Volume de vazios [Vv]; (b) Volume de Agregado Mineral [VAM]; (c) Relação Betume Vazios [RBV]; (d) Estabilidade Marshall [E]; (e) Fluência Marshall [F]; (e) Relação [E/F] em misturas CBUQ. ....	155
Figura 5.5 (a) Estabilidade e (b) fluência Marshall <i>versus</i> volume de vazios. ....	157
Figura 5.6 Teor ótimo de asfalto em misturas CBUQ com asfaltos modificados com fíleres. .....	158
Figura 5.7 Parâmetros de dosagem: (a) Volume de vazios (Vv); (b) Volume de vazios comunicantes (Vvc); (c) Resistência à tração; (d) Desgaste à abrasão <i>versus</i> teor de asfalto. .....	159
Figura 5.8 Parâmetros de dosagem: (a) Volume de vazios comunicantes (Vvc); (b-c) Resistência à tração; (d-e) Desgaste à abrasão <i>versus</i> volume de vazios.....	161
Figura 5.9 Teor ótimo de asfalto para misturas CPA com asfaltos modificados com elastômeros.....	162
Figura 5.10 Parâmetros de dosagem: (a) Volume de vazios (Vv); (b) Volume de vazios comunicantes (Vvc); (c) Resistência à tração; (d) Desgaste à abrasão <i>versus</i> teor de asfalto. .....	163
Figura 5.11 Desgaste à abrasão <i>versus</i> (a) Teor de CAP 50/70; (b) Resistência à tração; (c) Vv; (d) Vvc - Resistência à tração <i>versus</i> (e) Vv; (f) Vvc. ....	165

Figura 5.12 Volume de vazios comunicantes ( $V_{vc}$ ) versus Volume de vazio ( $V_v$ ) de misturas CPA com ligantes asfálticos modificados com fíleres. ....	166
Figura 5.13 Teor ótimo de asfalto em misturas CPA com asfaltos modificados com fíleres. ....	167
Figura 5.14 Resistência à tração de misturas asfálticas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha. ....	168
Figura 5.15 Resistência à tração e trabalho para misturas asfálticas CBUQ com asfaltos modificados com fíleres. ....	169
Figura 5.16 Resistencia à tração <i>versus</i> (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios. ....	170
Figura 5.17 Resistencia à tração <i>versus</i> (a) ligante asfáltico/ $V_v$ ; (b) CAP 50-70/ $V_v$ . ....	171
Figura 5.18 Resistencia à tração <i>versus</i> (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios. ....	172
Figura 5.19 Resistencia à tração <i>versus</i> (a) ligante asfáltico/ $V_v$ ; (b) CAP 50-70/ $V_v$ . ....	172
Figura 5.20 Resistencia à tração <i>versus</i> (a) ligante asfáltico/ $V_v$ ; (b) CAP 50-70/ $V_v$ . ....	173
Figura 5.21 Estabilidade Marshall e desvio padrão para misturas asfálticas CBUQ com asfaltos puro e modificados com elastômeros do tipo borracha. ....	173
Figura 5.22 Estabilidade Marshall e desvio padrão para misturas asfálticas CBUQ com asfaltos puro e modificados com fíleres. ....	174
Figura 5.23 Estabilidade Marshall <i>versus</i> (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios. ....	175
Figura 5.24 Estabilidade Marshall <i>versus</i> (a) ligante asfáltico/ $V_v$ ; (b) CAP 50-70/ $V_v$ . ....	175
Figura 5.25 Estabilidade Marshall <i>versus</i> (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios. ....	177
Figura 5.26 Estabilidade Marshall <i>versus</i> (a) ligante asfáltico/ $V_v$ ; (b) CAP 50-70/ $V_v$ . ....	177
Figura 5.27 Estabilidade Marshall <i>versus</i> % volumétrica de fíler/ $V_v$ . ....	178
Figura 5.28 Módulo de resiliência e desvio padrão para misturas asfálticas CBUQ com asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha. ....	178
Figura 5.29 Modulo de resiliência <i>versus</i> (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios. ....	179
Figura 5.30 Modulo de resiliência <i>versus</i> (a) ligante asfáltico/ $V_v$ ; (b) CAP 50-70/ $V_v$ . ....	180
Figura 5.31 Módulo de resiliência de misturas CBUQ com asfaltos modificados com fíleres. ....	180
Figura 5.32 Modulo de resiliência <i>versus</i> (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios. ....	181
Figura 5.33 Modulo de resiliência <i>versus</i> (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios. ....	182
Figura 5.34 Modulo de resiliência <i>versus</i> % volumétrica de fíler/ $V_v$ . ....	182
Figura 5.35 Ensaio <i>creep</i> estático de misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com elastômeros. ....	183
Figura 5.36 Recuperação elástica para misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha. ....	185

Figura 5.37 Deformação máxima <i>versus</i> (a) Vv/ligante asfáltico; (b) Vv/CAP 50/70. ....	186
Figura 5.38 Compliance <i>versus</i> (a) Vv/ligante asfáltico; (b) Vv/CAP 50/70. ....	186
Figura 5.39 Recuperação elástica <i>versus</i> (a) ligante asfáltico/Vv; (b) CAP 50/70/Vv. ....	187
Figura 5.40 Comportamento das misturas CBUQ com asfaltos modificados com fíleres frente à deformação axial antes e após o descarregamento. ....	188
Figura 5.41 Deformações recuperáveis e permanentes no ensaio do módulo de creep estático para misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com fíleres. ....	188
Figura 5.42 Deformação máxima <i>versus</i> (a) Vv/ligante asfáltico; (b) Vv/CAP 50/70. ....	189
Figura 5.43 Compliance <i>versus</i> (a) Vv/ligante asfáltico; (b) Vv/CAP 50/70. ....	190
Figura 5.44 Recuperação elástica <i>versus</i> (a) ligante asfáltico/Vv; (b) CAP 50/70/Vv. ....	190
Figura 5.45 Vida de fadiga misturas com asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha: (a) misturas CBUQ; (b) misturas CPA. ....	191
Figura 5.46 Vida de fadiga misturas com asfaltos modificados com fíleres: (a) misturas CBUQ; (b) misturas CPA. ....	192
Figura 5.47 Resistência ao dano por umidade induzida de misturas com asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha. ....	193
Figura 5.48 Resistência ao dano por umidade induzida de misturas com asfaltos modificados com fíleres. ....	194
Figura 5.49 Relação da resistência à tração <i>versus</i> (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios. ....	195
Figura 5.50 Relação da resistência à tração <i>versus</i> (a) ligante asfáltico/Vv; (b) CAP 50-70/Vv. ....	196
Figura 5.51 Relação da resistência à tração <i>versus</i> (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios. ....	197
Figura 5.52 Relação da resistência à tração <i>versus</i> (a) ligante asfáltico/Vv; (b) CAP 50-70/Vv. ....	197
Figura 5.53 Relação da resistência à tração <i>versus</i> % volumétrica de fíler/Vv. ....	198
Figura 5.54 Desgaste à abrasão em misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha. ....	198
Figura 5.55 Desgaste à abrasão em misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com fíleres. ....	200
Figura 5.56 Desgaste à abrasão <i>versus</i> (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios. ....	201
Figura 5.57 Desgaste à abrasão <i>versus</i> (a) ligante asfáltico/Vv; (b) CAP 50-70/Vv. ....	202
Figura 5.58 Desgaste à abrasão <i>versus</i> (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios. ....	202
Figura 5.59 Desgaste à abrasão <i>versus</i> (a) ligante asfáltico/Vv; (b) CAP 50-70/Vv. ....	203

Figura 5.60 Desgaste à abrasão *versus*: (a) % volumétrica de fíler/Vv; (b) % Volumétrica de fíler. .... 204

# LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

## ABREVIATURAS

AB	Asfalto Borracha
AB8	Asfalto Borracha Viscosidade 800 Cp
AB TB	Asfalto Borracha Terminal Blend
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADOT	<i>Arizona Department of Transportation</i>
AMBS	<i>Activated Mineral Binder Stabilizer</i>
ANIP	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
ATD	Análise Térmica Diferencial
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CB	Composto de borracha
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CPA	Camada Porosa de Atrito
CONAMA	Conselho Nacional de Médio Ambiente
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura dos Transportes
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
LA	Ligante Asfáltico
LAB	Laboratório
LAS	<i>Linear Amplitude Sweep</i>
MCSR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
MG	Minas Gerais
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
NBR	Norma Técnica Brasileira
RAR	<i>Reacted and Activated Rubber</i>



RMF	Rejeito de Minério de Ferro
RMP	Revoluções por Minuto
RTFOT	<i>Rolling thin oven test</i>
SARA	Saturados Aromáticos Resinas e Asfaltenos
TG	Térmica Gravimétrica

## SÍMBOLOS

g	Gramas
g/cm <sup>3</sup>	Gramas/centímetro cúbico
G*	Módulo de Cisalhamento Dinâmico
Hz	Hertz
Jnr	<i>Compliance</i> não recuperável
Kg	Quilograma
Kgf	Quilograma-força
kN/m <sup>3</sup>	Quilonewton/metro cúbico
kPa	Quilopascal
mm	Milímetros
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
máx	Máximo
mim	mínimo
MPa	Megapascal
N	Newton
N/A	Não Aplica
p/p	Proporção em peso
Pa	Pascal
Rad/s	Radianos por segundo
°	Graus
°C	Grau Celsius

## Letras Gregas

$\delta$	Ângulo de fase
$\gamma_{\text{máx}}$	Tensão Cisalhante Máxima

# 1 INTRODUÇÃO

A preservação e conservação do meio ambiente, em termos de gerenciamento de resíduos sólidos, é um desafio mundial. O Brasil regulamentou, em 2010, a lei 12.305 que institui a política Nacional de Resíduos Sólidos a fim estabelecer diretrizes para o correto gerenciamento destes. A disposição ambientalmente adequada dos resíduos e rejeitos incentiva o desenvolvimento de novas políticas de reciclagem que viabilizem a redução de impactos ambientais e melhorem a qualidade ambiental e proteção da saúde pública. Pesquisas científicas e tecnológicas tornam-se necessárias para atingir soluções economicamente viáveis em termos de disposições seguras dos materiais sólidos e rejeitos gerados pelas indústrias. A disposição final regulada pela política de resíduos sólidos brasileira contempla a construção ordenada de aterros seguindo especificações que evitem danos e riscos à saúde e minimizem os impactos ambientais. Entretanto, desastres e catástrofes têm acontecido pelo incremento de elevadas quantidades de resíduos sólidos nas áreas de deposição o que torna necessário a busca por alternativas de novas disposições seguras.

Os projetos de pavimentação, comparados com outros projetos de engenharia, requerem grandes extensões de áreas e mobilização de materiais geotécnicos (Lucena, 2012). Este fato possibilita uma alternativa para a disposição de resíduos sólidos em misturas asfálticas substituindo de forma parcial ou total os materiais convencionalmente utilizados. Entretanto, essas incorporações geralmente provocam alterações das propriedades físicas, químicas, reológicas e no comportamento mecânico dos materiais compósitos. Essas substituições não devem inviabilizar a trabalhabilidade do material e devem garantir propriedades que contribuam para minimizar os defeitos mais comuns dos pavimentos, tais como o afundamento de trilha de roda e as trincas por fadiga.

O desenvolvimento econômico e a integração nacional de um país são influenciados pelo setor dos transportes. Na história do Brasil, o setor dos transportes foi iniciado com a navegação marítima, seguido pelo sistema ferroviário até a expansão e o predomínio do sistema rodoviário, especificamente marcado pelo uso de pavimentos flexíveis. Os dados estatísticos da pesquisa, realizada pela confederação Nacional de Transporte (CNT, 2017), indicam que o Brasil tem uma malha rodoviária composta por 1.720.756 quilômetros, dos quais 78,6% são não pavimentadas; 12,3% pavimentadas; e 9,1% são constituídos por rodovias em planejamento. A necessidade de melhorar e ampliar a malha rodoviária torna imperativa a realização de novas pesquisas para desenvolver técnicas e materiais de construção que apresentem menores custos de construção e

manutenção e que, ao mesmo tempo, sejam duráveis e contribuam para o desenvolvimento sustentável.

Diferentes pesquisas indicam que o encapsulamento dos resíduos sólidos ou líquidos na matriz do ligante asfáltico ou do concreto asfáltico melhoram as características mecânicas dos revestimentos asfálticos durante sua vida útil e imobilizando os resíduos na mistura asfáltica. Entre os principais materiais alternativos incorporados ao ligante asfáltico, tem-se: grãos de borracha provenientes dos pneus usados que são estudados no mundo desde a década de 70 (Bahia & Davies, 1994, Way, 2012, Wang *et al.*, 2017, Roseno, 2005; Mello, 2008; Sinisterra, 2014, Camargo & Bernucci, 2017, Nunes, 2017, Casagrande *et al.*, 2007); líquido da castanha do cajú (Rodrigues, 2010; Fernandes, 2011; Ribeiro, 2011; Oliveira, 2015); óleo de mamona (Souza, 2012); fibras de coco (Vale, 2007); resíduos das Estações de Tratamento de Água - ETA e esgoto - ETE (Martinez, 2014); resíduos de chapas de gesso acartonado (Gouveia, 2013), bi-óleo derivado do óleo de cozinha e outros materiais alternativos (Rondón *et al.*, 2008).

O presente estudo teve como principal objetivo estudar a disposição final de resíduos sólidos, do tipo elastômeros e materiais fíleres, incorporando-os ao Cimento Asfáltico de Petróleo CAP vislumbrando o uso desses resíduos e o melhor desempenho dos revestimentos asfálticos. Os materiais elastômeros utilizados neste estudo correspondem à borracha proveniente dos pneus usados e a criação de composto de borracha com cal realizado por via seca, sendo ambos incorporados ao cimento asfáltico por via úmida.

Apesar de o asfalto borracha ser muito estudado por diversos pesquisadores, a proposta do asfalto de quarta geração de Sousa (2012) com a adição de um fíler estabilizador tem como vantagem a redução de temperaturas de fabricação de misturas asfálticas. Entretanto, outros materiais e técnicas de fabricação devem ser estudados e analisados para sua validar a técnica proposta. Os materiais fíleres estudados correspondem à cal, como material de referência, ao rejeito de minério de ferro RMF e ao subproduto das estações de tratamento de água conhecidos como Lodo de ETA como materiais alternativos. A pesquisa contempla a adição dos materiais elastômeros e fíleres aos ligantes asfálticos e posteriormente a incorporação no Concreto Betuminoso Usinado a Quente CBUQ faixa C DNIT 031 (DNIT, 2006) e na Camada Porosa de Atrito CPA faixa V DNIT 389 (DNIT, 1999). Como parte da criação de práticas da engenharia sustentável que contribuam para a preservação do meio ambiente, apresenta-se nesta pesquisa uma proposta de disposição de materiais alternativos avaliando as características físicas e químicas dos materiais alternativos, assim como também a interação física e reológica com o ligante asfáltico CAP 50/70 e o desempenho mecânico de misturas CBUQ e CPA. A hipótese que sustenta

a pesquisa é a da expectativa de afinidade físico-química entre os compósitos dos materiais alternativos com a matriz do ligante asfáltico, encapsulando-os e fixando-os nas misturas asfálticas, a fim de garantir uma disposição final segura.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A motivação desta pesquisa deve-se aos elevados volumes de resíduos sólidos produzidos no Brasil, principalmente nas estações de tratamento de água, mineração e pneus usados de veículos. No caso da geração dos resíduos de lodo de ETA, não se tem dados totais da produção no Brasil, mas estima-se uma estimativa da produção anual em cada ETA em torno de 100.000 toneladas (Geraldo *et al.*, 2017), sendo que as poucas alternativas de disposição são na recuperação de áreas degradadas ou lançamento na rede de esgoto. A disposição em aterros ou em áreas degradadas é considerada um adiamento do impacto ambiental já que metais pesados podem migrar para o lençol freático e para o solo, maximizando a contaminação ambiental (Lucena, 2012).

Apesar da mineração ser uma atividade promissora e de extrema importância para o Brasil, pode gerar impactos ambientais significativos, principalmente no que concerne à disposição dos rejeitos gerados no processo de beneficiamento do minério de ferro. A previsão da produção de minério de ferro no Brasil para o ano de 2016 foi de 809 milhões de toneladas que podem originar cerca de 280 milhões de toneladas do rejeito de minério de ferro (IBRAM, 2012). O assunto torna-se ainda mais importante em virtude da grande quantidade de acidentes relacionados às barragens de rejeitos, principal forma de disposição dos resíduos de mineração no Brasil. A grande vantagem de disposição dos resíduos incorporando-os na matriz asfáltica, proposta nesta pesquisa, é o fato de permitir o encapsulamento e fixação dos mesmos na matriz do ligante asfáltico, o que a coloca como uma solução ambientalmente correta requerendo estudos para verificar se é tecnicamente viável.

Atualmente, uma das alternativas para a disposição de resíduos sólidos referente aos pneus usados de veículos é a sua incorporação às misturas asfálticas. Segundo a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP, 2016) no terceiro trimestre do ano 2016 foram produzidos 17,5 milhões de pneus de veículos de passeio e de carga, tendo como grande desafio a disposição segura após a sua vida útil. No entanto, ainda existem algumas limitações técnicas relacionadas à fabricação do asfalto borracha, referentes às elevadas temperaturas de misturas entre os materiais (borracha e asfalto). Neste caso, estudou-se nesta pesquisa a solução dessa limitação por meio da introdução de um fíler estabilizador, a cal, no asfalto-borracha, objetivando obter menores tempos de fabricação, fazendo-se uso de temperaturas mais baixas.

## 1.2 OBJETIVO

A pesquisa visa estudar em laboratório o comportamento do ligante e de misturas asfálticas modificados com elastômeros, tais como borracha dos pneus usados e o composto de borracha, assim como também os fileres do tipo cal e materiais alternativos, nominalmente rejeito de mineiro de ferro e o lodo das estações de tratamento de água ETA para a utilização em revestimentos de pavimentos flexíveis, a fim sugerir uma destinação segura para esses materiais alternativos de modo a propiciar a redução dos passivos ambientais e preservação do meio ambiente.

Dentre os objetivos específicos desta pesquisa destacam-se:

- a caracterização físico-química e mineralógica dos materiais alternativos para revestimentos de pavimentos flexíveis;
- a caracterização física e reológica do ligante convencional CAP 50/70 e modificado com diferentes teores de elastômeros e fileres;
- a avaliação das características volumétricas, parâmetros de resposta à carga monotônica e determinação do teor ótimo de ligante asfáltico em misturas asfálticas CBUQ e CPA utilizando os ligantes modificados com elastômeros e fileres;
- a avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas CBUQ e CPA utilizando os ligantes puros e modificados por meio de ensaios de: módulo de resiliência, resistência à tração por compressão diametral, resistência Marshall, vida de fadiga por compressão diametral e creep estático.
- a avaliação da aderência das misturas asfálticas CBUQ e CPA utilizando os ensaios de resistência ao dano por umidade induzida e o ensaio Cântabro.

## 1.3 ESTRUTURA DA TESE

A tese está dividida em seis capítulos. No primeiro capítulo encontra-se a introdução e motivação, baseada no panorama geral da geração e disposição dos materiais alternativos, assim como o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre o tema, descrevendo as principais pesquisas realizadas com a utilização de materiais alternativos em pavimentação asfáltica, assim como os processos e geração dos resíduos sólidos e suas aplicações na atualidade. Apresentam-se também considerações relevantes sobre ligantes e misturas asfálticas, tais como as características reológicas, metodologias usadas para a determinação do teor ótimo do ligante asfáltico, desempenho mecânico em estruturas de pavimentos flexíveis.

O terceiro capítulo apresenta os materiais utilizados nesta pesquisa e a metodologia adotada para a incorporação dos materiais alternativos no ligante asfáltico, assim como também a execução dos ensaios de caracterização física e reológica dos ligantes modificados, metodologia de dosagem e determinação das propriedades mecânicas e de adesividade das misturas asfálticas CBUQ e CPA; a fim de avaliar a influência dos materiais alternativos no comportamento do concreto asfáltico segundo as normas atuais.

O quarto capítulo contém a análise e discussão dos resultados das características físicas e químicas dos materiais utilizados na pesquisa, assim como também o estudo das características físicas e reológicas dos ligantes asfálticos modificados com os materiais alternativos e convencionais, tendo em consideração o envelhecimento por oxidação.

O quinto capítulo apresenta as dosagens dos concretos asfálticos CBUQ e CPA realizados pela metodologia Marshall utilizando os ligantes asfálticos modificados pela adição de elastômeros tipo borracha e dos fíleres alternativos, assim como também o estudo das propriedades mecânicas e de adesividade referentes ao desempenho do comportamento mecânico.

No sexto e último capítulo encontram-se as conclusões obtidas na pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são tratados os princípios teóricos para o desenvolvimento da tese. Inicialmente é analisada a problemática dos resíduos sólidos, principalmente os resíduos industriais, abordando as origens e destinação atual. Além disso são apresentadas pesquisas versando sobre o aproveitamento de materiais alternativos em pavimentação. Em seguida são abordados aspectos teóricos sobre os ligantes asfálticos originais e modificados, destacando a composição química e seu comportamento reológico. Por último, são apresentadas as características das misturas asfálticas à quentes.

### 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, por meio da Lei 12.305/2010, define resíduo sólido como material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, que tem uma destinação final em qualquer estado da matéria. Os rejeitos também são considerados resíduos que esgotam as possibilidades de tratamento e recuperação, não apresentando outra possibilidade que a disposição final ambientalmente adequada. De acordo com a NBR 10.004/2004 os resíduos são classificados, segundo sua periculosidade, em perigosos, não-inertes e inertes. Os resíduos sólidos perigosos apresentam características físicas e químicas que concebem um risco significativo à saúde pública e à qualidade ambiental. Tais riscos à saúde pública são minimizados nos resíduos sólidos não perigosos (não inertes e inertes), mas apesar da diminuição dos riscos não se excluem os impactos ambientais. As principais origens dos resíduos são áreas urbanas, indústrias, serviços de saúde, construção civil, mineração e agrossilvicultura. Diferentes pesquisas têm sido desenvolvidas viabilizando a utilização de materiais alternativos na construção civil e criando práticas ambientalmente sustentáveis da engenharia sustentável (Bolden *et al.*, 2013). O presente estudo foca na análise do potencial de uso nas misturas asfálticas dos resíduos das estações de tratamento de água (lodo de ETA), rejeitos do beneficiamento de ferro (RMF) e borracha de pneus usados.

#### 2.1.1 Resíduos das estações de tratamento de água

As estações de tratamento de água geram o subproduto denominado lodo de ETA, considerado pela norma NBR 10.004 (2004) como resíduo sólido. Os resíduos sólidos gerados no tratamento da água são compostos basicamente pelas impurezas presentes na água bruta, tais como algas, vírus, partículas orgânicas em suspensão, coloides, areias, argilas, siltes, cálcios, magnésio, ferro,

manganês (Delgado, 2016). Também o integra os componentes químicos utilizados no tratamento da água, que é majoritariamente realizado por meio de óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro, argilas silicatadas, contaminantes e matéria orgânica (Delgado, 2016).

O tratamento de água comumente utilizado considera as diferentes etapas a seguir: captação, coagulação, floculação, decantação, filtração, fluoretação e distribuição. A Figura 2.1 apresenta o fluxograma do sistema convencional de tratamento de água e da consequente geração dos lodos de ETA.

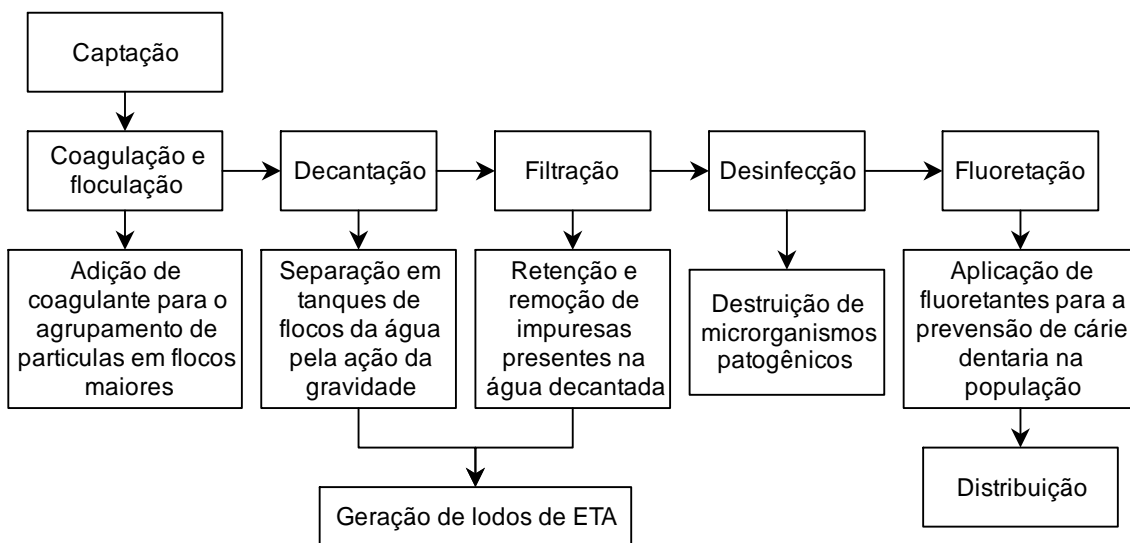


Figura 2.1 Fluxograma do processo de tratamento de água potável.

Devido ao elevado teor de umidade presente nos lodos de ETA após as etapas de decantação e filtração, surgem alternativas de tratamento que viabilizam a redução de volume e concentração de sólidos, proporcionando o estado sólido ou semissólido. O método de remoção de umidade pode empregar o adensamento por gravidade ou flotação e considera-se uma etapa previa ao processo de desidratação (Delgado, 2016). A desidratação do lodo de ETA pode ser de forma natural por meio de lagoas de lodo e leitos de secagem, ou mecânica utilizando centrifugas, filtros de vácuo, filtros de prensa e prensa desaguadora. Pequenas ETAs utilizam métodos de desidratação natural devido aos baixos custos econômicos, no entanto, podem estar limitadas às condições climáticas. As grandes ETAs precisam de tecnologias de desidratação mais eficientes, que permitam agilidade no processo e menores impactos ambientais.

Finalmente as características físico-químicas dos lodos de ETA dependem da água bruta a tratar, da qualidade final da água tratada, dos produtos químicos empregados no processo e dos processos adotados no tratamento (Delgado, 2016). Os sais de ferro ( $\text{Fe}^{+3}$ ) e alumínio ( $\text{Al}^{+3}$ ) são considerados



os principais coagulantes utilizados no tratamento de água, que desestabilizam as partículas devido às cargas e produzem a separação e sedimentação dos sólidos suspensos na água. A Tabela 2.1 apresentam as características físicas e químicas de lodos de ETA estudados por diversos pesquisadores.

Tabela 2.1 Características físico-químicas de lodos de ETA.

Pesquisador	Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	Limites de consistência (%)		Compostos químicos (%)				Perda ao fogo (%)
		LL	LP	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Outros	
Oliveira <i>et al.</i> (2004)	2,63	73	53	35,9	31,7	12,8	19,6	16,93
Paixão (2005)				12,6	8,6	72,9	5,9	----
Hoppen <i>et al.</i> (2005)	1,051			16,6	13,1	4,2	66,1	49,79
Reis (2006)				19,6	25,5	17,1	37,8	32,4
Margem (2008)		60	33	24,7	30,4	11,2	33,7	30,67
Lucena (2012)	2,4	NP	NP	33,1	37,3	26,0	3,6	-----
Delgado (2014)	2,092			12,3	29,2	8,0	50,5	47,00
Martinez (2014)	1,765	---	---	---	---	---	-----	42,84

Na Tabela 2.1 pode-se observar que os principais componentes químicos dos lodos de ETA são o dióxido de sílcio (SiO<sub>2</sub>), ou comumente conhecido como sílica; o óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); o óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e em menor proporção, embora não indicado de forma expressa nessa Tabela, o óxido de enxofre (SO<sub>3</sub>). A presença de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> podem desenvolver propriedades cimentantes ou pozolânicas, podendo aumentar a adesividade e contato entre os grãos em concretos hidráulicos ou asfálticos (Carrasco *et al.*, 2017) (Nassar *et al.*, 2016). Dias (2004) estudou a estabilização de solos com materiais asfálticos. Os resultados indicaram diminuição do teor de material asfáltico para a estabilização em solos argilosos com minerais que contem alta presença de ferro e alumio, fato atribuído ao contato e interação química do asfalto-solo. Os óxidos de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), geralmente são comumente utilizados como pigmentos colorantes de misturas asfálticas (Nguyen, 2009), entretanto, deve ser avaliado o efeito do envelhecimento causado pela oxidação do cimento asfáltico.

Apesar do Brasil apresentar precariedade no saneamento básico, a quantidade de lodo produzido tende a aumentar nos próximos anos com o aumento da rede de serviços e da população (Gonçalves *et al.*, 2016). No ano 2011 se estimou a produção de 4 milhões de toneladas de lodo de ETA por ano (Oliveira & Rondon, 2016).

O lodo de ETA não pode ser lançado nos cursos d'água sem prévio tratamento devido aos possíveis riscos à saúde pública e à vida aquática (Lucena, 2012). A falta de gerenciamento na disposição final dos lodos de ETA origina um grande problema ambiental pela alta toxicidade nas

concentrações de ferro, alumínio e matéria orgânica (Tafarel, *et al.*, 2016). Bednarik *et al.*, (2004) desenvolveram um procedimento para a estabilização e solidificação dos lodos de ETA por meio da adição de um aditivo de carbono negro altamente poroso e impermeabilização com um revestimento de emulsão asfáltica na superfície. A solução proposta permite a lixiviação dos poluentes e reduz a infecciosidade dos lodos estabilizados e solidificados, entretanto, precisam-se de grandes áreas para a construção de tanques para a aplicação da técnica.

As alternativas de disposição dos lodos de ETA têm sido em aterros sanitários, aterros exclusivos, disposição em áreas de reflorestamento, áreas agrícolas e incineração (Fytili & Zabaniotou, 2008). A implantação de aterros sanitários é considerada uma das principais técnicas utilizadas para disposição final dos resíduos lodos de ETA. Wang *et al.*, (1993) determinaram os parâmetros geotécnicos de dois tipos de lodos de ETA e observaram alta concentração de ferro e alumínio. Os resultados obtidos indicaram que os materiais são extremadamente plásticos e altamente compressíveis, apresentando baixos valores de resistência não drenada. Simulações de estabilidade de taludes para os aterros propõem valores mínimos de sólidos para a estabilidade das obras. Katayama, (2012) resume que os principais usos dos lodos de ETA consistem em: recuperação de áreas degradadas, agricultura, reciclagem de produtos para tratamentos biológicos de esgoto; incorporação na fabricação de cimento e tijolos; compostagem e preparação de solo jardinagem e substrato de áreas úmidas (*wetlands*) construídas. Diferentes pesquisadores têm utilizado os lodos de ETA incorporando-os aos materiais usados nas obras de engenharia civil, a fim de procurar soluções técnicas e seguras de disposição dos mesmos. Hidalgo *et al.*, (2016), após estudo dos possíveis usos de lodos de ETA, relatam que os mesmos podem ser utilizados como matéria filler para a construção de rodovias, uma vez que estes apresentam sendo que na forma de filler, os mesmos apresentam características de estabilidade, condutividade hidráulica e resistência mecânica similares a outros materiais utilizados como filleres.

Entre os principais trabalhos utilizando lodo de ETA, na área de engenharia civil, se destacam a substituição parcial de agregados para a confecção de concretos de cimento Portland com granulometrias densas, apresentando aumentos de até 50 % na resistência à tração, em relação aos concretos utilizando agregados convencionais (Fontes, 2003, 2008; Costa, 2011, Tafarel *et al.*, 2016). Os aumentos das resistências à compressão e flexão nos concretos são explicados pelo poder cimentício ou pozolânicos dos resíduos de lodo de ETA. Lin *et al.* (2006) estudaram a incorporação de lodos de ETA como agregados artificiais para a fabricação de blocos permeáveis para pavimentos. Os resultados indicaram que a adição do 20% de agregado por lodo de ETA, sobre uma condição de sinterização de 1150 °C por 30 minutos, pode gerar tijolos com resistência

à compressão de 25,6 MPa, sendo superior ao mínimo preconizado de 11,0 MPa. Suksiripattanapong *et al.*, (2015) avaliaram o desempenho de um geo-polímero criado a partir da incorporação de lodo de ETA para a substituição de cimento na elaboração de concretos, tendo como resultado aumento da resistência à compressão.

Lucena (2012), Oliveira, (2014) & Delgado (2016) utilizaram os resíduos de lodos de ETA e da indústria têxtil na estabilização de camadas de base e sub-base de pavimentos, obtendo melhoria das características de resistência e deformabilidade. Silva (2008) estudou a incorporação dos resíduos de ETA em forma de cinza, após incineração a 550 °C, a fim de ser aplicado como material fíler na granulometria do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Martinez (2014) utilizou o mesmo princípio obtendo material fíler, que foi adicionado ao ligante asfáltico por via úmida e como parte dos agregados por via seca, a fim de observar seu efeito no desempenho do CBUQ. Tecnicamente as duas pesquisas apresentaram melhor desempenho mecânico das misturas alternativas em relação às misturas asfálticas convencionais. A melhoria das propriedades mecânicas das misturas asfálticas pode ocorrer pelo aumento de pontos de contato entre os agregados, devido à presença da sílica gerada no tratamento térmico dos lodos de ETA.

### 2.1.2 Rejeito de minério de ferro

A mineração do ferro é o conjunto de processos e operações utilizadas para o beneficiamento e extração do minério de ferro a partir do maciço rochoso da jazida. O minério de ferro é o resultado da modificação das propriedades físicas de lavra e concentração química do elemento ferro, a fim de ser utilizado principalmente como matéria prima na indústria siderúrgica. A Figura 2.2 apresenta um fluxograma geral do processo de mineração de ferro.

Segundo Silva (2010) entre as principais operações de mineração do ferro se destacam:

- a operação de lavra: decapeamento e desmonte do minério, separando a parte estéril e o minério;
- a britagem, peneiramento e moagem: redução do tamanho dos grãos para liberação do mineral;
- a classificação e concentração: separação seletiva das partículas de minério e partículas de minerais de ganga (impurezas), através da presença de água e dos processos de densidade, forma, condutividade, magnetismo, superfície e cor;
- os espessamento, filtragem e secagem: redução do volume de água e obtenção das partículas com elevado teor de sólidos.

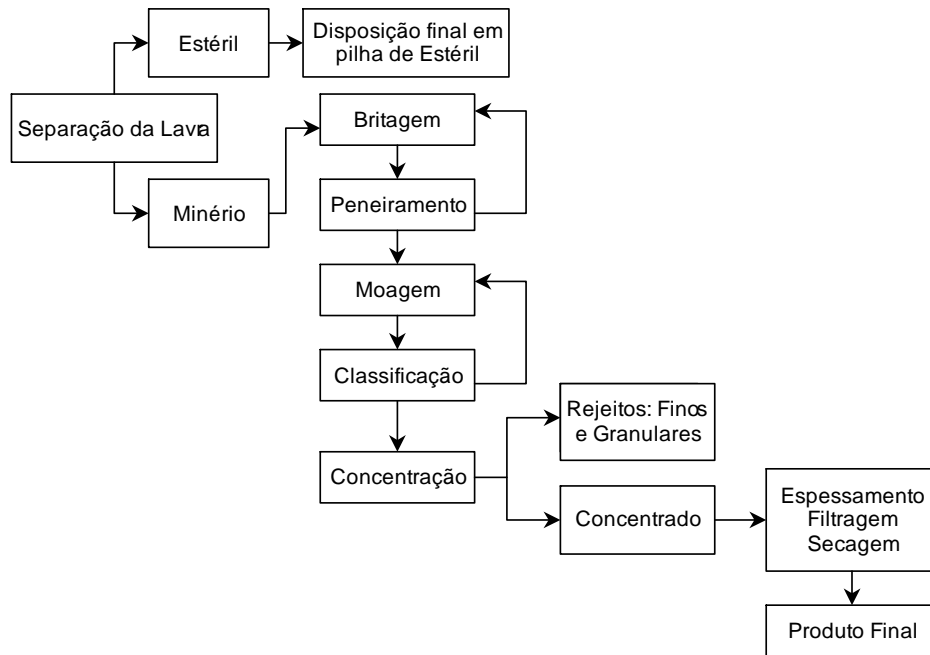


Figura 2.2 Fluxograma do processo de beneficiamento do minério de ferro.

No processo de mineração de ferro surgem subprodutos com baixo ou sem valor econômico, tais como os estéreis na operação da lavra e os rejeitos finos e granulares na separação e concentração de partículas de ferro (Silva, 2010). Os rejeitos gerados dependem do tipo do minério e do método utilizado no beneficiamento (Kuranchie, 2015). O rejeito de minério de ferro avaliado no presente estudo corresponde ao rejeito fino obtido na etapa de concentração.

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de minério de ferro. Atualmente o ferro ocupa o primeiro lugar na lista dos minerais exportados em território brasileiro. Em 2014, a produção de minério de ferro foi de 400 milhões de toneladas, com um percentual de participação de 55%, em relação ao total das exportações de minério do Brasil, conforme dados da diretoria de planejamento e desenvolvimento da mineração (IBRAM de 2015). A Figura 2.3 apresenta um panorama dos principais minérios exportados pelo Brasil em 2016 segundo a Diretoria Nacional de Planejamento e desenvolvimento da Mineração DNPM.

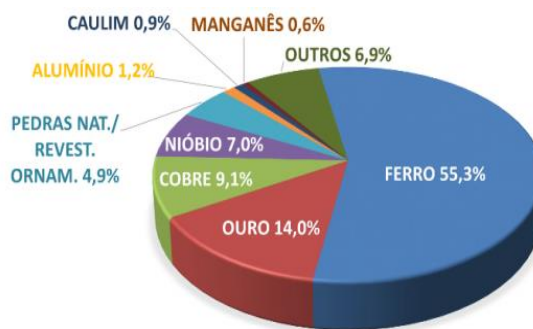


Figura 2.3 Distribuição das exportações de minerais (DNPM, 2016).

Na Figura 2.3 destaca-se o beneficiamento do ferro totalizando mais de 55% em relação aos outros minérios exportados. Em comparação com outros minérios, o minério de ferro também se sobressai na produção de rejeitos, sendo que de cada 10 toneladas de minério produzido são geradas cerca de 8,8 toneladas de rejeitos resultantes do seu beneficiamento e em termos volumétricos o volume de rejeito também supera o do minério extraído. O IBRAM estima a quantidade relativa deste rejeito em 41,38% do volume total produzido no Brasil entre 2010 e 2030.

Dantas (2015) caracterizou quimicamente o rejeito de minério de ferro por meio da análise de raios X por fluorescência FRX para obter os percentuais de óxidos no resíduo. A Tabela 2.2 apresenta a caracterização de óxidos do rejeito de minério de ferro da mina Bonito no estado do Rio Grande do Norte. A análise química da amostra apresentou teores médios de 80% de óxido de ferro, 10,8% de dióxido de sílica e 8,3% de óxido de alumínio. O alto valor da densidades real dos grãos e presença do ferro no rejeito de minério de ferro é atribuída à presença da hematita (Carrasco et al., 2017).

Nery *et al.*, (2017) estudaram o rejeito de minério de ferro do estado de Minas Gerais obtendo a composição química por meio da análise XRF de 63,9% de dióxido de silício, 35% de óxido de ferro e 1,2% de óxido de alumínio. A análises de difração de raios X indicam a presença de quartzo, hematita e caulinita em maior concentração. Os resultados indicam que as partículas finas de rejeito não são tóxicos e apresentam estrutura cristalina estável, inerte, sem presença de substâncias deletérias ou expansivas. Os elevados teores de óxido de ferro e sílica indicam o desenvolvimento de propriedades pozolânicas em partículas de tamanho muito fino (Carrasco *et al.*, 2017).

Tabela 2.2 Características dos óxidos presentes no rejeito de minério de ferro.

Composto químico	Aparência	Formula	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa molar (g/mol)	Ponto de fusão (°C)	Estrutura	Percentual médio (%)*
Óxido de ferro III ou óxido férrico - Hematita	Vermelho-castanho solido	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,242	159,69	1566	Romboédrica	80,0
Dióxido de silício ou sílica	Substância em forma de pó branco	SiO <sub>2</sub>	2,200	60,07	1713	Tetraedro	10,8
Óxido de Alumínio	Solido branco	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,940	101,96	2072	Octaedro	8,3
Óxido de manganês	Verde cristalino	MnO	5,450	70,94	1650	Cubica	0,8
Pentóxido de fosforo	Pó branco muito deliquescente odor pungente	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,390	283,89	340	Polimorfa	0,2

\*valores obtidos (Dantas, 2015).

Uma possibilidade de disposição dos rejeitos do beneficiamento de minério de ferro é o uso dos mesmos no preenchimento de cavas de minerações já exauridas ou abandonadas, pilhas controladas ou barragens de rejeitos (Campanha, 2011; Guerra, 2014). Em longo prazo é exigido um espaço cada vez maior para a estocagem em regiões próximas a grandes centros urbanos, cuja disponibilidade de áreas é cada vez mais escassa. Além dos impactos ambientais associados às barragens de rejeitos, os riscos de catástrofes, como o rompimento repentino das mesmas, vem despertando preocupação dos órgãos ambientais (Andradre *et al.*, 2016). Em contrapartida, pode-se dizer que a grande maioria dos acidentes acontece com depósitos com predominância de líquidos e não de sólidos. Um depósito com maior teor de sólidos é geralmente mais fácil de administrar, evitando possíveis acidentes.

Hoje, no Brasil, a construção de barragens de rejeitos é o método mais utilizado para a disposição dos rejeitos de mineração, o que não significa ser também o mais seguro e apropriado para o meio ambiente. Assim, o alto risco de um acidente ambiental provocado pelo rompimento de uma barragem, aliado ao prejuízo que isso pode trazer para a empresa e aos riscos de contaminação do solo e das águas de subsuperfície, certamente compensa um investimento a ser feito em métodos alternativos de disposição. Desta forma, os métodos que atenderão plenamente o futuro florescerão de investimentos no desenvolvimento de técnicas de aproveitamento econômico desses rejeitos de modo a garantir a sustentabilidade ambiental.

Pesquisas têm vislumbrado a utilização do rejeito de minério de ferro nas atividades decorrentes da engenharia civil, aplicando rejeitos do beneficiamento de minério de ferro em materiais granulares e coesivos para camadas de base e sub-base de estruturas de pavimentos, tanto a nível de laboratório (Fernandes, 2005; Dantas, 2015) como em trechos experimentais (Saraiva, 2006). Guerra (2014) utilizou o rejeito de minério de ferro *pellet feed*, como material filer na produção de blocos intertravados, substituindo proporções de 5% e 10% do cimento, obtendo maiores valores da resistência característica à compressão em comparação com o concreto convencional, indicando potencial cimentante nos blocos de concreto. Da mesma forma, encontra-se pesquisas estudando o efeito cimentante em razão da substituição da fração miúda de agregados para concretos por rejeito de minério de ferro *sinter feed*, obtendo valores similares de resistência em comparação aos materiais convencionais (Costa, 2009; Yi *et al.*, 2009; Bertocini, *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2013 *Apud* Guerra, 2014)

Nery *et al.*, (2017) recomendam a utilização do rejeito de minério de ferro como material de enchimento e na forma de agregados finos na utilização de compósitos a base de cimento. No concreto de cimento portland, o rejeito de minério de ferro contribui para o enchimento de vazios

e surgimento de reações pozolânicas pelas reações químicas entre os hidróxidos de cálcio no cimento e a sílica do rejeito, aumentando a coesão entre as partículas e consequentemente a resistência à tração (Carrasco et al., 2017).

Silva (2010) utilizou rejeitos de minério de ferro como fíler em misturas asfálticas, avaliando o desempenho mecânico por meio de ensaios de laboratório. Ao incorporar material de minério de ferro em forma de fíler às misturas asfálticas, o autor observou diminuição da rigidez e queda nos valores do módulo de resiliência, assim como também, diminuição nas deformações plásticas, avaliadas por meio do ensaio de creep estático em comparação a uma mistura asfáltica convencional. Entretanto, ainda não se tem conhecimento de resultados de pesquisas utilizando o rejeito como fíler modificador do ligante asfáltico com fins de pavimentação rodoviária

### **2.1.3 Considerações sobre a borracha de pneus usados e o asfalto borracha**

No Brasil, a resolução CONAMA 416 (CONAMA, 2009) dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sobre sua destinação ambiental adequada, e dá outras providências, considerando que os pneus dispostos inadequadamente constituem um passivo ambiental que pode resultar em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública. Em virtude disso foi criada a entidade Reciclanip associada à Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP) destinada à coleta e destinação de pneus inservíveis desde 1999.

O uso de borracha em pavimentação, como material modificador do ligante asfáltico, é uma prática utilizada desde 1902 na França. Na cidade de Cannes foi implantada a primeira estrada construída com borracha natural, a fim de misturar asfalto com polímeros e prolongar a vida útil dos pavimentos (Dias, 2005). A borracha tem a capacidade de incorporar-se ao o ligante asfáltico e atuar como um material elástico ante a solicitação de carregamentos cíclicos, permitindo maior flexibilidade nos revestimentos asfálticos. Pesquisas revelam melhoria do desempenho mecânico em misturas asfálticas, com à redução de trincas por fadiga e diminuição de deformações permanentes. No estudo do asfalto borracha tem-se analisado diferentes técnicas para a incorporação da borracha ao concreto asfáltico, tais como: via seca; via úmida e via terminal. Embora sua aplicação tenha sido em todas elas satisfatória, existem alguns problemas nos processos, tais como:

- falta de adesividade entre a borracha e os agregados na compactação da mistura por via seca;
- elevadas faixas de temperatura de usinagem e de compactação na via úmida;
- elevado custo dos equipamentos de usinagem para a fabricação do ligante modificado;

- reaquecimento do asfalto borracha após submissão a elevadas temperaturas em períodos de tempos longos;
- elevados custos econômicos do asfalto borracha, em comparação ao ligante convencional;
- óleos extensores aumentam as emissões de gases e fumaça causando problemas respiratórios ao pessoal operacional (Henrique & Pinheiro, 2005).

Devido aos fatores negativos apresentados no processo de incorporação da borracha ao concreto asfáltico, tem-se aplicações em Israel do novo tipo de borracha, denominada na indústria como *Rubind*, a qual é uma borracha reagida e ativada (*Reacted and Activated Rubber - RAR*) composta por ligante asfáltico convencional, uma fração de borracha fina, e fíler mineral ativo, utilizado como estabilizador do ligante asfáltico (*Activated Mineral Binder Stabilizer - AMBS*) pelo equilíbrio de cargas elétricas. A fabricação da Borracha Reagida Ativada - BRA realiza-se misturando seus componentes à quente, num intervalo de tempo curto e em proporções otimizadas, gerando o granulado ativo de borracha seco, que pode ser empregado em diferentes tipos de ligantes (PG 52 a PG 70 ou penetração entre 35/50 a 100/200) e concretos asfálticos a temperaturas baixas, entre 10 °C e 40 °C. Finalmente é feita a mistura asfáltica convencional adicionando o granulado de borracha (Sousa *et al.*, 2012).

O fíler estabilizador é resíduo gerado nas operações de indústrias mineiras de fosfato *Phosphate Industries* e materiais modificantes orgânicos, tendo mais do 60% de dióxido de silício. Pesquisas na China revelam que a forma da ativação do resíduo é alcançada com adição de pó de sílica pura (Wu *et al.*, 2012). O fíler é composto por micropartículas de sílica mineral de tamanho inferior a 40 micras, que reage com o ligante asfáltico na forma de mástique, apresentando nas misturas betuminosas elevada viscosidade em repouso e baixa viscosidade em movimento (Sousa *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2012). Aplicações com esta técnica apresentaram melhoria do comportamento mecânico, expressados por meio do aumento da resistência ao dano por umidade induzida e dos ensaios de deformação permanente em relação a misturas asfálticas convencionais e com a utilização de fibras de celulose (Wu *et al.*, 2012).

Campillo (2014) avaliou a adição de 25% em peso de grânulos de borracha pré-ativados em dois ligantes asfálticos do tipo PG 70-10 e PG 64-22. Os resultados da caracterização física e reológica não apresentaram melhora substancial às temperaturas baixas, enquanto para altas temperaturas, observou-se aumento do grau de desempenho. Nunes (2017) estudou o efeito da incorporação dos grânulos de borracha pré-ativados (quarta geração) no ligante asfáltico brasileiro



CAP 50/70 e posteriormente em misturas asfálticas com granulometria descontínua. Os resultados mostraram acréscimos nos valores da rigidez (modulo dinâmico) e redução da suscetibilidade em relação à frequência / temperatura implicando aumento da vida de fadiga e diminuição da sensibilidade ao dano no ligante asfáltico.

## 2.2 LIGANTE ASFÁLTICO

O ligante asfáltico é um material aglutinante de cor escura utilizado desde a antiguidade na construção civil por suas propriedades impermeabilizantes e adesivas. O uso do ligante asfáltico estendeu-se com o surgimento da indústria automotriz e pela necessidade da geração do combustível para veículos. Atualmente, grande parte dos combustíveis para os veículos são obtidos do refinamento do óleo cru do petróleo (Lima, 2008). Os asfaltos podem ser obtidos de forma industrial a partir da destilação do petróleo e de forma natural a partir de lagos e rochas asfálticas (Mallick & El-Korchi, 2013). Em função das características físicas, químicas e do processo de refino de petróleo, em especial dos teores das frações destiláveis e resíduo de vácuo, surgem diferentes tipos de ligantes asfálticos (Allen *et al.*, 2012) (Lucena, 2005). O desempenho mecânico, hidráulico e funcional da mistura asfáltica em revestimentos de pavimentos depende das características químicas, físicas e reológicas do ligante asfáltico.

### 2.2.1 Características químicas dos ligantes asfálticos

O asfalto ou ligante asfáltico é um material constituído predominantemente de hidrocarbonetos de peso molecular elevado, solúveis no bissulfeto de sódio e carbono e outros heteroátomos (oxigênio; nitrogênio e enxofre) em pequena proporção, assim como também por outros metais como níquel, vanádio e ferro unidos por enlaces covalentes (Lucena, 2005). A Tabela 2.3 apresenta os percentuais em peso dos principais elementos químicos constituintes do ligante asfáltico.

Tabela 2.3 Composição química do ligante asfáltico.

<b>Elemento Químico</b>	<b>% em peso</b>
Carbono	82 - 88
Hidrogênio	6 - 8
Enxofre	0 - 6
Oxigênio	0 - 1,5
Nitrogênio	0 - 1

Quimicamente o asfalto é formado por moléculas que apresentam entre 20 e 120 átomos de carbono e peso molecular entre 300 e 2000 (Lucena, 2005). De forma geral, as moléculas do

asfalto são classificadas em quatro grupos: saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos, comumente conhecidas como SARA (Corbett, 1969). Atualmente existem diferentes procedimentos Americanos e Europeus de laboratório que sistematizam o fracionamento químico das partículas do cimento asfáltico por meio dos princípios de solubilidade, reatividade química e adsorção.

Outros pesquisadores agrupam as moléculas constituintes do Cimento Asfáltico de Petróleo CAP em maltenos e asfaltenos (Bringel, 2007). Os maltenos constituídos pelos compostos saturados, aromáticos e resinas e se caracterizam por apresentarem: polaridade baixa, menor peso molecular, aspecto oleoso, viscosidade baixa e alta sensibilidade à oxidação. Enquanto que os asfaltenos apresentam maior polaridade e maior peso molecular. Os asfaltenos são partículas coloidais envolvidas por resinas que impedem sua floculação e estão dispersas em óleos maltenos (Alencar *et al.*, 2006); (Bernucci *et al.*, 2008). A Tabela 2.4 apresenta os principais componentes do ligante asfáltico e as principais influencias no ligante asfáltico.

Tabela 2.4 Principais componentes do ligante asfáltico (Bernucci *et al.*, 2008).

Componentes		Estado	%	Peso molecular	Caraterísticas
Asfaltenos		Sólido	5 a 15	Alto	Influenciam diretamente na caraterísticas físicas do ligante asfáltico (penetração, viscosidade e ponto de amolecimento).
Óleos maltenos	Resinas	Sólido ou semissólido			Junto com os asfaltenos determinam o comportamento Gel ou Sol do ligante asfáltico.
	Aromáticos	Líquido Viscoso	40 a 65	Baixo	Constituem o meio de dispersão dos asfaltenos e das resinas. Influenciam na susceptibilidade térmica do ligante asfáltico.
	Saturados	Óleos Viscosos	5 a 25		

A estrutura físico-química dos ligantes asfálticos tem sido esquematizada por diferentes modelos, destacando o modelo de micelas de Yen e o modelo elaborado pelo corpo de pesquisadores do SHRP (*Strategic Highway Research Program*). O método das micelas surgiu devido à observação por difração de raios X das moléculas de asfaltenos. O modelo de Yen assume a estrutura química do CAP como um meio coloidal composto por micelas, ou seja, asfaltenos envolvidos por resinas de grande peso molecular dispersas num meio oleoso (maltenos) de menor peso molecular. A proporção e distribuição das resinas e dos asfaltenos definem o comportamento Gel ou Sol do coloide como se apresenta na Figura 2.4.

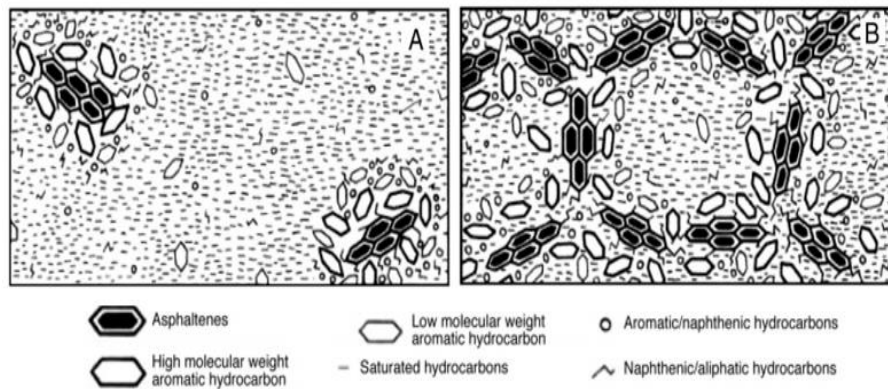


Figura 2.4 Comportamento do coloide: (a) estado Gel; (b) estado Sol (Shell, 2003).

No estado Gel ocorre uma aglomeração de micelas com vazios internos, apresentando maior resistência à aplicação de cargas e menos suscetíveis ao retorno, podendo facilitar o trincamento da camada asfáltica. O cimento asfáltico no estado Sol gera mobilidade adequada dos asfaltenos recobertos por micelas no meio intermicelar (maltenos) devido à presença de óleos intermicelares muito aromáticos. Entretanto, o asfalto apresenta maior suscetibilidade térmica e maior suscetibilidade à oxidação por meio do envelhecimento (Fernandes, 2011; Oliveira, 2015). Na prática, os ligantes asfálticos puros apresentam comportamento intermediário entre as estruturas Sol e Gel (Melo, 2014).

O modelo proposto pelo SHPR surgiu a partir de observações das análises de espectroscopia na região do infravermelho e cromatográfica de troca de íons IEC e das interações das moléculas dos ligantes, incluindo hidrogênio, ligações  $\pi$ - $\pi$ , forças de Van der Waals e atrações polares (Jones & Kennedy, 1991). O modelo proposto divide os componentes químicos em polares e não polares que são responsáveis pela formação de redes tridimensionais que explicam as características viscoelásticas do cimento asfáltico (Jones & Kennedy, 1991) (Bernucci *et al.*, 2008). A Figura 2.5 apresenta esquematicamente o modelo SHPR.

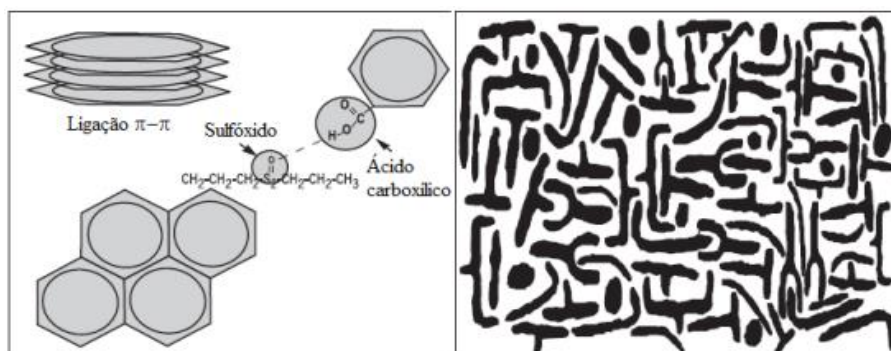


Figura 2.5 Estrutura do ligante asfáltico proposto pelo SHPR (Jones & Kennedy, 1991).

Os modelos da estrutura físico-química contribuem para o entendimento da interação das moléculas compósitas do ligante asfáltico. Entretanto, para o ligante asfáltico existem diferentes técnicas de laboratório que permitem determinar de forma direta ou indireta as composições e características químicas. As principais técnicas de caracterização química incluem: cromatografia gasosa, espectroscopia de massa, calorimetria de varredura, ressonância magnética nuclear e espectroscopia infravermelha de transformada de Fourier (Allen *et al.*, 2012). Para avaliar a microestrutura e superfície do ligante asfáltico existem diferentes técnicas tais como: difração de raios-X, cromatografia de exclusão por tamanhos, microscopia com elétrons de varrimento, contraste de fase, luz polarizada, leitura a laser, fluorescência e microscopia de força atômica.

### 2.2.2 Asfaltos modificados

Os asfaltos modificados atendem especificações particulares das misturas asfálticas, referente à ação do clima; temperatura; materiais e tráfego. Os materiais modificadores mais utilizados são polímeros. Os polímeros (do grego “muitas partes”) são compostos de monômeros, entendidos como macromoléculas extraídas da natureza (madeira, óleo lubrificante, cortiça, etc) ou sintéticas de estrutura simples e repetitiva ao longo da sua cadeia (Zegara, 2007). As macromoléculas são o resultado do encadeamento de dez mil ou mais átomos de carbono unidos por ligações covalentes de tipo natural ou sintéticas. A Tabela 2.5 apresenta a classificação e as principais características dos polímeros.

Entretanto, não são todos os polímeros que podem ser adicionados ao ligante asfáltico. Além das características do polímero, devem ser avaliadas as interações físicas e químicas com o ligante asfáltico para a adequada adesividade e dispersão na mistura asfáltica. Os polímeros no ligante asfáltico podem modificar a reologia em função do teor adicionado e dos elevados pesos moleculares, resultando em interações de cadeias polímero-asfalto (físicas ou químicas). Aproximadamente 75% dos asfaltos modificados com polímeros utilizaram elastômeros, 15% plastoméricos e 10% outros materiais tais como enxofre e ácido (Liu *et al.*, 2017). As incorporações de polímeros melhoram os desempenhos dos asfaltos e concretos asfálticos, em termos de deformação permanente, vida de fadiga, susceptibilidade à umidade, antienvelhecimento, entre outros. No entanto, nos últimos tempos diversos pesquisadores se concentram na introdução de nanomateriais para a modificação do ligante asfáltico, devido ao rápido desenvolvimento da nanotecnologia (Li *et al.*, 2017).

Tabela 2.5 características dos principais tipos de polímeros (Rondon 2016).

categorias	tipo	comportamento às variações térmicas	comportamento na mistura asfáltica	exemplos
	Elastômeros	quando aquecidos, se descompõem antes de amolecer	melhoram o comportamento de resiliência da mistura asfáltica quando são submetidas a ciclos de carga e descarga, apresentando recuperação na deformação	estireno-butadieno-estireno SBS; estireno-butadieno-borracha SBR; borracha proveniente de pneus usados
Plásticos	Termoplástico	após formados pela ação do calor, amolecem de forma reversível	aumentam a rigidez da mistura asfáltica, tendo aumento do grau de desempenho nas temperaturas de serviço	etileno-acetato de vinila EVA; polietileno, polipropileno atático, policloreto de vinila
	Termorrígidos	após formados pelo calor, endurecem obtendo uma rigidez irreversível		resina epóxica, poliuretano,
Elastômeros-Termoplásticos		em elevadas temperaturas apresentam comportamento termoplásticos, enquanto que a baixas temperaturas apresentam comportamento elástico		estireno-butadieno-estireno SBS

Tem-se utilizados fíleres naturais, como cal, cimento e sílica, a fim de aumentar a consistência dos mesmos. Alguns trabalhos relatam a utilização de fibras de vidro; asbestos; fibras de celulose e polimetacar (Leite, 1999). Ainda se tem outra alternativa de modificação, empregando asfaltos naturais, tais como gilsonita nos Estados Unidos e Colômbia (Rondón *et al.*, 2015); asfaltita na Argentina, em Trinidad (Leite, 1999) e Colômbia (Rondón & Reyes, 2012). Porém, é fundamental conhecer o comportamento físico, químico, reológico dos asfaltos modificados a fim de entender o interação asfalto-aditivo e o possível desempenho no concreto asfáltico. A modificação do ligante asfáltico com fíleres não é uma pratica direta. De forma indireta, no momento da usinagem para a fabricação da mistura asfáltica ocorre a interação do ligante asfáltico com as partículas de fíler proveniente dos agregados gerando o mástique (Lesueur, 2009). Entretanto, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas a fim de estudar o comportamento físico, químico e reológico do mástique e o seu desempenho em misturas asfálticas.

A presença de materiais modificadores no ligante asfáltico influi nas características dos asfaltenos, desta forma, quanto maior o percentual de asfaltenos, mais rígido e viscoso será o ligante asfáltico (Bernucci *et al.*, 2006). Os ligantes modificados com materiais elastômeros e

fíleres apresentam maior consistência pela incorporação de diferentes teores desses produtos, resultando em maiores valores do ponto de amolecimento, viscosidade e queda nos valores de penetração e ductilidade antes e após do RTFOT em relação ao CAP 50/70. As análises estatísticas dos asfaltos modificados com fíleres permitem concluir que os acréscimos de consistência são atribuídos ao teor de aditivo adicionado, e não ao tipo de fíler. Entretanto, é necessário estabelecer um percentual de aditivo ótimo, a fim de garantir uma consistência que contribua para diminuição de patologias posteriores no concreto asfáltico. Outros aspectos importantes dos asfaltos é garantir trabalhabilidade durante o processo de usinagem e compactação da mistura asfáltica, assim como também homogeneidade em termos de separação de fases (asfalto-material modificador) e adesividade entre a fase asfalto-material modificador-agregado.

Gouveia (2013) transformou os resíduos de chapas de gesso acartonado (CGA) componentes do sistema estrutural de construção *drywall* em fíler, a fim de ser inserido no ligante asfáltico e nas misturas asfálticas CBUQ faixa C. Para a incorporação do CGA, as proporções em massa utilizadas foram de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% em relação ao ligante asfáltico e ao material fíler convencional da mistura asfáltica. Os resultados da caracterização física dos asfaltos modificados com CGA apresentaram aumentos da consistência (ponto de amolecimento e diminuição da penetração) e viscosidade em função do teor adicionado. As características reológicas medidas no DSR indicaram aumento do módulo de cisalhamento dinâmico  $G^*$  e diminuição do ângulo de fase ( $\delta$ ) dos asfaltos modificados, em função do teor de CGA adicionado. Já na mistura asfáltica, com a substituição do fíler convencional por CGA, observaram-se aumentos significativos da resistência à tração, módulo de resiliência, vida de fadiga e diminuição de deformações permanentes em função do teor de fíler CGA adicionado. Na avaliação das características de adesividade determinadas segundo o ensaio da resistência ao dano por umidade induzida observaram-se que as misturas asfálticas com ligantes asfálticos modificados com teores menores que 20% de CGA apresentaram melhor desempenho mecânico. A autora concluiu que CGA pode ser utilizado em misturas asfálticas CBUQ na substituição de até do 20% do fíler convencional.

Martinez (2014) estudou os resíduos provenientes das estações de tratamento de água e de esgoto, comumente conhecidos como lodos de ETA e de ETE, a fim de ser incorporados no ligante asfáltico e posteriormente em misturas CBUQ faixa C. Inicialmente, realizou-se um tratamento térmico nos lodos de ETA e de ETE devido aos elevados teores de umidade e matéria orgânica neles presentes, para finalmente transformá-los em fíler. O tratamento térmico foi realizado

através de um forno tipo mufla, à temperaturas de 200 °C, 300 °C, 500 °C e 800 °C, a fim de avaliar a influência da incineração nas características físicas do ligante asfáltico. Após estudar as características físicas dos asfaltos modificados com lodos de ETA e de ETE, tais como: penetração, ponto de amolecimento e viscosidade, estabeleceu-se 500°C como temperatura de incineração. As dosagens Marshall das misturas asfálticas CBUQ com os lodos de ETA e de ETE incinerados a 500°C apresentaram menores teores ótimos de CAP 50/70 em relação à mistura de referência com materiais convencionais. As misturas asfálticas com adição de lodos de ETA e de ETE apresentaram aumentos de resistência à tração e módulo de resiliência, assim como também, valores permissíveis dos ensaios de resistência ao dano por umidade induzida e desgaste à abrasão Cântabro. No entanto, os aumentos de consistência no ligante asfáltico e aumento do desempenho mecânico podem ser atribuídos às interações químicas entre a sílica gerada no tratamento térmico e o ligante asfáltico. O autor conclui que a prática pode ser considerada viável do ponto de vista ambiental, por gerar alternativas de disposição segura evitando-se passivos ambientais.

Os materiais nanotecnológicos originam fenômenos associados a interações atômicas e moleculares que influenciam diretamente nas propriedades macroscópicas do material (You *et al.*, 2011; Yang & Tighe, 2013 & Li *et al.*, 2017). Os principais nano-materiais estudados e recomendados para modificação de ligantes asfálticos são: nano-sílica (SiO<sub>4</sub>), nano-argila, nano-fibras de carbono, nano-tubos de carbono, nano-zinc e nano-carvão (Li *et al.*, 2017).

A nano sílica cataloga-se como material inorgânico, caracterizado pela grande área superficial, facilidade de dispersão, elevada absorção, alta pureza química e excelente estabilizador. Existem diversas aplicações nas indústrias, devido aos baixos custos de produção e altas características de rendimento principalmente na construção civil (Yao *et al.*, 2012). Partículas de nano sílica podem ser utilizadas como aditivos modificadores de ligantes asfálticos a fim de aumentar o desempenho mecânico de misturas asfálticas (Yao *et al.*, 2012). Yussof *et al.*, (2014) estudaram a adição de partículas de nano-sílica no ligante asfáltico modificado com polímero (PG-76) em percentuais de 0%, 2% e 4% em relação ao peso do ligante asfáltico. A microscopia eletrônica de varredura revelou dispersão das partículas de nano-sílica ao longo da matriz do ligante asfáltico, assim como também redução significativa da susceptibilidade ao envelhecimento por oxidação. A introdução desta nas misturas asfálticas densas proporcionou maior vida de fadiga e aumento da deformação permanente a temperaturas intermediárias e altas em relação à amostra convencional.

A nanoargila é uma argila que possui uma espessura de 1 e 100 nm que pode ser obtida conforme os métodos de polimerização local, solução de mistura e fusão. A incorporação de

percentuais inferiores a 2% em peso de nanoargila ao ligante asfáltico de provoca aumento da resistência à umidade induzida e resistência à tração em misturas asfálticas densas. Os acréscimos de forças de adesividade podem ser atribuídos à presença de: cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ); cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) e cloreto de magnésio ( $\text{MgCl}_2$ ) no compósito da nanoargila (Goh *et al.*, 2011).

Materiais nano-reforçados como a nano-fibras de carbono redefinem o campo dos materiais em pavimentação em termos de custos efetivos e aumento do desempenho a longo prazo (Khattab *et al.*, 2012). Asfaltos modificados com a incorporação de nano-fibras de carbono em teores entre 1% e 2,5% em relação ao peso do ligante apresentam boa dispersão e estabilidade de fases, apresentando boas características visco-elásticas, tendo aumento da vida de fadiga e diminuição de microfissuras (Khattab *et al.*, 2012). Ziari *et al.*, (2014) estudaram a utilização de nano-tubos de carbono como modificadores do ligante asfáltico na faixa de 0,3% a 1,5% em relação ao peso do ligante asfáltico. Os resultados apresentam aumentos nas características físicas dos ligantes asfálticos e alterações nas características reológicas devidas ao aumento da rigidez e diminuição da elasticidade. Teores maiores que 1,2% de aditivo não apresentaram variações significativas da consistência ou comportamento reológico. Porém, os autores recomendam 1,2% de nano-tubos de carbono como teor ótimo de modificação do ligante asfáltico.

Melo (2014) incorporou materiais na escala nanométrica: nano-tubo de carbono e nano-argila, em teores de 3% e 2% no ligante asfáltico brasileiro CAP 50/70 respectivamente, a fim de estudar o comportamento reológico e desempenho mecânico de misturas asfálticas CBUQ. As misturas asfálticas nano-modificadas apresentaram aumento no módulo de cisalhamento dinâmico, menores ângulos de fase, maior resistência aos danos por umidade induzida, maior resistência à deformação permanente e fadiga em relação à mistura convencional. Além do aumento dos parâmetros mecânicos, apresentou incrementos na simulação numérica da vida de fadiga em 4.6 vezes na mistura com nano-argila, e 6,0 vezes na mistura com nano-tubos de carbono.

### 2.2.3 Ensaios de caracterização convencionais

O ligante asfáltico pode apresentar diferentes composições químicas e físicas, em função do processo de refinamento e da matéria bruta inicial. Comumente são realizados ensaios convencionais no ligante asfáltico, tais como: penetração, ponto de amolecimento, ductilidade, densidade, ponto de fulgor e combustão, a fim de classificá-lo e conhecer suas principais características. O ensaio de penetração e ponto de amolecimento descrevem a consistência ou



rigidez do ligante asfáltico. Pfeiffer & Van Dormall (1936) estabeleceram correlação entre os ensaios de penetração (25 °C) e o ponto de amolecimento permitindo determinar a susceptibilidade térmica de ligantes asfálticos. Os ligantes asfálticos devem apresentar pequenas variações nas propriedades mecânicas nas temperaturas de serviço, para evitar alterações de comportamento ante as variações climáticas de temperatura (Bernucci *et al.*, 2008).

Entretanto, apesar desses ensaios serem comuns para caracterização e controle de qualidade de ligantes asfálticos devido à facilidade de operação e ao baixo custo do processo (equipamentos e mão e obra), estes não descrevem os comportamentos dos materiais ante as solicitações reais de tráfego (cargas ou frequências de carga) e climas (temperaturas) a que o revestimento será submetido durante sua vida útil, o que requer estudos complementares por meio de ensaios de caracterização reológica.

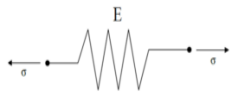
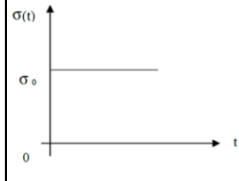
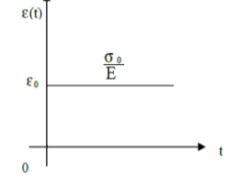
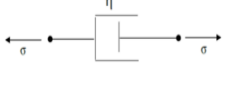
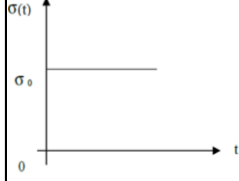
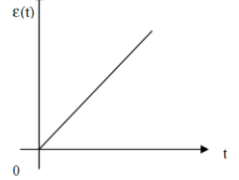
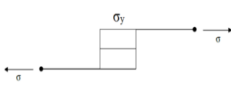
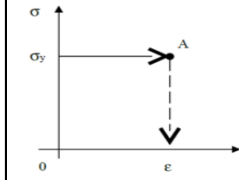
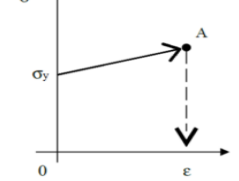
#### **2.2.4 Ensaios de caracterização reológica**

A reologia apresenta-se como a ciência que estuda o comportamento dos materiais (sólidos ou fluidos) por meio da deformação e escoamento da matéria no tempo (Malkin & Isayev, 2017) A reologia pode ser dividida em duas grandes áreas: a microreologia e a reologia propriamente dita. A microreologia busca o entendimento das propriedades reológicas a partir das interações físico-químicas no interior da matéria (Malkin & Isayev, 2017). A reologia busca o entendimento das equações constitutivas sem se preocupar com as interações físico-químicas internas do material. A reologia descreve o comportamento do material por meio dos modelos puramente elásticos, plásticos e viscosos, ou das associações e combinações que possam surgir (Carvalho, 2014). O presente trabalho presume interações físico-químicas durante o processo de incorporação dos materiais alternativos ao cimento asfáltico, mas o estudo reológico da presente pesquisa enquadra-se na reologia propriamente dita.

##### Modelos reológicos

A reologia dos materiais possibilita a obtenção de relações constitutivas para a simulação do comportamento de um material submetido a qualquer tipo de condições de solicitação. Porém, é indispensável o conhecimento das relações constitutivas a partir de modelos de comportamentos como os propostos na literatura. A Tabela 2.6 apresenta esquematicamente o comportamento de três modelos constitutivos básicos unidimensionais.

Tabela 2.6 Modelos básicos de comportamento unidimensional (modificado - Carvalho, 2014).

Módulo	Esquema	Equação	Comportamento	
Elástico		$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon(t)$		
Viscoso		$\sigma(t) = \eta \cdot \dot{\varepsilon}(t)$		
Plástico		$\sigma < \sigma_y \rightarrow \dot{\varepsilon} = 0$ $\sigma = \sigma_y \rightarrow \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_p$		

A partir da Tabela 2.6 faz-se as seguintes considerações:

- o modelo elástico é representado por uma mola helicoidal de massa desprezível e perfeitamente linear. Ao se aplicar uma tensão constante na mola, obtém uma deformação constante proporcional à tensão aplicada. Neste caso as deformações são reversíveis imediatamente após a aplicação do carregamento. A relação constitutiva na região de elasticidade linear pode ser expressada pela lei de Hooke;
- o modelo viscoso ou viscoso de Newton é representado por um amortecedor, e se caracteriza pelo comportamento dependente do tempo. Neste sentido, apresenta-se variações das deformações no tempo ao serem submetidas a tensão constante. A constante de proporcionalidade entre as tensões e deformações é conhecida como o coeficiente de viscosidade;
- o modelo plástico é representado por um dispositivo de atrito que se desliza no momento que há aplicação de tensão, apresentando deformações imediatas e irreversíveis (permanentes após do descarregamento). O modelo pode ser considerado plástico perfeito quando a tensão permanece constante, enquanto a deformação plástica aumenta. Também pode ser um modelo com encruamento, quando a deformação plástica aumenta quando a tensão também aumenta.

Os modelos básicos apresentam relações matemáticas simples. A partir dos modelos básicos é feita uma combinação em serie ou em paralelo para as representações do comportamento de um material, tendo como resultado modelos conjugados (Melo, 2014). Os modelos conjugados mais utilizados nos estudos dos pavimentos são: visco-elásticos, elastoplásticos e viscoplásticos. As misturas asfálticas apresentam respostas com parcelas elásticas, plásticas e viscoplásticas (Mello, 2008). Neste contexto, o ligante asfáltico na mistura apresenta comportamento viscoelástico, enquanto os agregados apresentam comportamento elastoplástico. Porém, pode-se concluir que as misturas asfálticas apresentam comportamento visco-elastoplástico.

Diferentes pesquisadores descrevem a complexidade do comportamento visco-elástico do ligante asfáltico desde o ponto de vista reológico, sendo que a baixas temperaturas e/ou para tempos de carregamentos curtos (ou elevadas frequências), a resposta elástica é dominante, podendo utilizar a lei de Hooke para descrever o comportamento. Enquanto que para elevadas temperaturas e/ou para tempos de carregamento altos (ou baixas frequências), a resposta viscosa é dominante, podendo utilizar a lei de Newton para descrever o comportamento (Pereira, 2014).

Torna-se fundamental o estudo reológico de ligantes asfálticos de modo a facilitar o entendimento do comportamento das misturas asfálticas ante as solicitações de carga proveniente do tráfego ou das temperaturas pela ação do clima. Esse estudo possibilita também, a escolha, o controle de qualidade e a avaliação estimada do desempenho durante a construção e vida útil do pavimento (Pereira, 2014; Moreno, 2015). O estudo da reologia permite a obtenção de parâmetros que influem principalmente na rigidez e elasticidade para ter um conceito do comportamento mecânico da mistura ao longo de faixas de temperaturas e frequências de carga.

### Metodologia Superpave

Os estudos reológicos dos ligantes e das misturas asfálticas para pavimentos foram amplamente estudados e desenvolvidos com o surgimento da metodologia Americana SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavements*) entre os anos de 1987 e 1993. A metodologia Superpave contemplou novos métodos de caracterização e avaliação dos ligantes asfálticos, passando dos ensaios de caracterização física clássica (ponto de amolecimento, penetração e viscosidade) à nova caracterização. A nova caracterização contemplou a determinação do grau de desempenho PG (*performance grade*) do ligante asfáltico por meio da obtenção dos parâmetros reológicos (rigidez e elasticidade) em diversas faixas de temperaturas da vida útil do pavimento. Com o desenvolvimento da metodologia SUPERPAVE surgiram novos ensaios de laboratório e novos

equipamentos que permitem avaliar e determinar o comportamento reológico por meio de amostras na condição virgem e envelhecidas a curto e longo prazo. A Tabela 2.7 apresenta os principais equipamentos e ensaios propostos na metodologia SUPERPAVE.

Tabela 2.7 ensaios e equipamentos de avaliação de ligantes asfálticos segundo a metodologia SUPERPAVE.

Equipamento	Especificação	Avaliação
<b>Caraterísticas reológicas</b>		
viscosímetro rotacional	ASTM D 4402/2002	Determinação das propriedades de consistência a diferentes temperaturas e tensões de cisalhamento, relacionadas ao bombeamento e à estocagem.
reômetro de cisalhamento dinâmico - <i>dynamical shear rheometer DSR</i>	ASTM D 7175/2004	Caraterização viscoelástica do ligante através da rigidez expressa pelo módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e a elasticidade pelo ângulo de fase ( $\delta$ ) a diferentes frequências e temperaturas nas modalidades de tensão ou deformação controlada.
reômetro de fluência em viga - <i>bending beam rheometer BBR</i>	ASTM D 6648/2001	Caraterização da rigidez do ligante asfáltico a baixas temperaturas, através da rigidez estática ( $S$ ) e do logaritmo do módulo de relaxação ( $m$ ) de uma vigota de ligante asfáltico, submetida a carregamento estático <i>creep</i> .
Prensa de tração direta – <i>direct tension test DDT</i>	ASTM D 6723/2002	Determinação da ductilidade de ligantes asfálticos modificados a partir do estiramento de uma amostra tipo gravatinha-borboleta, a fim de prevenir o trincamento prematuro por excesso da rigidez a temperaturas baixas
<b>Envelhecimento por oxidação</b>		
Estufa de película delgada rotacional - <i>Rolling Thin Film Oven Test RTFOT</i>	ASTM 2872/1997	Determinação da perda de massa do ligante asfáltico, causada durante as etapas de usinagem, estocagem, transporte, espalhamento e compactação da mistura asfáltica, correspondente ao envelhecimento a curto prazo.
Vaso de pressão de envelhecimento - <i>pressure aging vessel PAV</i>	ASTM 6521/2000	Determinação da perda de massa do ligante asfáltico causada durante a vida útil de serviço da mistura asfáltica, correspondente ao envelhecimento a longo prazo.

### Apresentação dos parâmetros reológicos

O reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) permite determinar as caraterísticas reológicas que descrevem o comportamento viscoelástico do ligante asfáltico. Para a determinação do comportamento reológico avalia-se diferentes caraterísticas que tentam simular as características reais do ligante asfáltico durante a vida útil, referentes às cargas provenientes do tráfego, clima e velocidades dos veículos.

Através do sistema de placas paralelas em regime oscilatório do DSR permite a determinação de parâmetros reológicos, tais como o módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ). Os parâmetros reológicos podem ser determinados nos modos de tensão ou deformação controlada, a partir da imposição de uma solicitação cisalhante e da resposta do material. O módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) pode ser entendido como a relação entre a tensão cisalhante e a deformação cisalhante máxima apresentada durante um ciclo de carga, enquanto que o ângulo de fase ( $\delta$ ) avalia a razão entre a resposta elástica e a viscosa durante o processo de cisalhamento, como ilustrado na Figura 2.6.

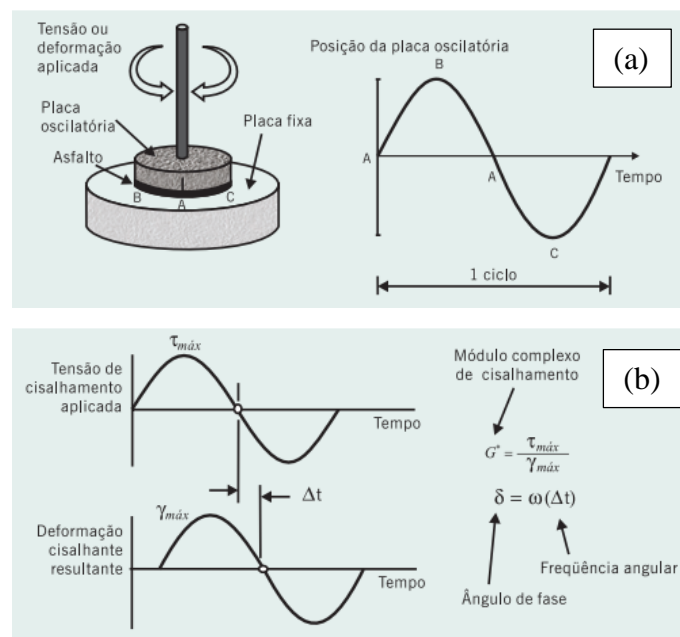


Figura 2.6. Modo de operação do reômetro de cisalhamento dinâmico: (a) aplicação do carregamento; (b) defasagem entre tensão e deformação (Bernucci *et al.*, 2008).

Existem diferentes formas de apresentar os parâmetros reológicos a fim de possibilitar a avaliação e comparação das propriedades reológicas entre ligantes asfálticos. Yusoff (2012) descreve que as apresentações dos resultados reológicos podem ser realizadas por meio de: curvas isócronas, curvas isotérmicas, curvas mestras, diagramas de Black e diagramas de Cole-Cole. A curva isócrona descreve a variação de parâmetros reológicos em função da variação da temperatura utilizando frequência constante. A curva isoterma permite a avaliação de parâmetros reológicos para diferentes valores de frequência, mantendo constante a temperatura. As curvas mestras permitem a interação entre temperatura e frequência por meio do princípio de superposição tempo-temperatura. Finalmente os diagramas de Black e diagramas de Cole-Cole permitem relacionar parâmetros reológicos, desconsiderando referência à temperatura ou frequência. O diagrama de Black avalia o módulo de cisalhamento dinâmico em função do ângulo de fase, enquanto que o diagrama Cole-Cole avalia o

módulo dissipativo ( $G''$ ) em função do módulo conservativo ( $G'$ ), analisando o balanço viscoelástico do ligante asfáltico.

*Avaliação dos defeitos dos revestimentos asfálticos em função do comportamento reológico do ligante asfáltico*

Os métodos de avaliação do ligante asfáltico, propostos pela metodologia SUPERPAVE, buscam o entendimento do surgimento dos principais defeitos estruturais e funcionais dos revestimentos asfálticos. Os principais defeitos dos pavimentos asfálticos são trincas por fadiga, afundamento de trilha de roda e trincamento térmico, influenciados pelo envelhecimento a curto e longo prazo. A fim de caracterizar os ligantes asfálticos, e prever seu desempenho mecânico durante a vida útil de serviço do pavimento, foram estabelecidos critérios para a minimização da ocorrência de trincas por fadiga e afundamento de trilha de roda. Os critérios estabelecidos pela metodologia SUPERPAVE consideram a combinação dos parâmetros reológicos tais como o módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ), no intuito de envolver a rigidez e a capacidade de recuperação elástica do ligante asfáltico. A Tabela 2.8 apresenta as especificações para minimizar a ocorrência de trincas por fadiga e a deformação permanente pelo afundamento de trilha de roda de ligantes asfálticos determinadas na região da viscoelasticidade linear, medidos por meio do equipamento DSR em condições de 1% de deformação e 10 rad/s em amostras originais ou virgens, e após envelhecimento a curto prazo (RTOFT) e longo prazo (PAV).

Tabela 2.8 Critérios para o controle da ocorrência dos defeitos nos revestimentos de pavimentos asfálticos.

Amostra	Defeitos nos revestimentos asfálticos de pavimentos	
	Trincas por fadiga	Afundamento de trilha de roda
Antes o RTOFT		$ G^* /\text{sen}(\delta) \geq 1.0 \text{ Kpa}$
Após o RTOFT		$ G^* /\text{sen}(\delta) \geq 2.2 \text{ Kpa}$
Após o RTOFT/PAV	$ G^* .\text{sen}(\delta) \leq 5000 \text{ KPa}$	

As expressões apresentadas na Tabela 2.8 correspondem a modelos resultantes do projeto 9-10 do *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) que permitem determinar o grau de desempenho do PG do ligante asfáltico puro ou sem modificação, e maximizar a vida de fadiga e a deformação permanente da mistura asfáltica.

Avaliação da vida de fadiga em ligantes asfálticos

As trincas por fadiga são consideradas um dos defeitos recorrentes em revestimentos de pavimentos flexíveis, e são causados devido à repetição de carregamento provenientes do tráfego, associadas à elevada rigidez dos materiais asfálticos, envelhecimento do ligante asfáltico e baixas temperaturas. Classicamente tem-se utilizado o parâmetro  $|G^*|.sen(\delta)$  como indicador da energia total dissipada durante o carregamento cíclico (Anderson *et al.*, 1994). O parâmetro  $|G^*|.sen(\delta)$  resultou da análise e associações do desempenho da vida de fadiga em laboratório de misturas asfálticas, correspondente ao módulo de dissipação do carregamento sinusoidal. Neste contexto, a vida de fadiga era atribuída diretamente ao desempenho do ligante asfáltico. Inicialmente a especificação desconsiderou a ação do tráfego por determinar parâmetros reológicos em níveis de deformação baixos e no domínio da viscoelasticidade não linear (Bahia *et al.*, 2001). Entretanto, posteriormente foram propostas novas análises e critérios que representam o comportamento reológico dos ligantes asfálticos. Para a vida de fadiga, a norma 320 (AASHTO, 2009) incorporou diferentes níveis de tráfego avaliando o parâmetro  $|G^*|.sen(\delta)$ . A Tabela 2.9 apresenta os valores máximos  $|G^*|.sen(\delta)$  (parâmetro de vida de fadiga) para diferentes níveis de tráfego.

Tabela 2.9 Valores de  $|G^*|.sen(\delta)$  (ASSTHO, 2009).

Nível de Tráfego		Faixa de solicitações	$ G^* .sen(\delta)$
S	Padrão	$\leq 10^7$	$\leq 5000$ KPa
H	Pesado	$1 \cdot 10^7$ a $3 \cdot 10^7$	$\leq 6000$ KPa
V	Muito Pesado	$\geq 3 \cdot 10^7$	$\leq 6000$ KPa

O parâmetro  $G^*sen\delta$  é considerado pouco efetivo na determinação da vida de fadiga de pavimentos asfálticos, principalmente nos ligantes asfálticos modificados (Dongré & Angelo, 2003). Em virtude deste fato surgiram diferentes ensaios que tentam caracterizar e conseqüentemente determinar o desempenho do comportamento da vida de fadiga do ligante asfáltico, com o intuito de prever o desempenho da mistura asfáltica. Os ensaios atuais tentam resolver as deficiências do parâmetro  $|G^*|.sen(\delta)$  da especificação SUPERPAVE. No entanto, existem diversas variáveis a controlar nos ensaios de vida de fadiga dos ligantes asfálticos, tais como: taxa e modo de aplicação do carregamento ou frequência, nível de deformação, temperatura, tipo de ligante asfáltico e modificador, geometria da amostra, efeitos dos períodos de recuperação (*healing*), critério de falha (Nuñez, 2013). A Tabela 2.10 apresenta os principais protocolos de ensaios propostos para determinar a vida de fadiga de ligantes asfálticos.

Tabela 2.10 Ensaio de vida de fadiga no ligante asfáltico.

Ensaio de vida de fadiga no ligante asfáltico	Especificação ou norma
Varredura de tempo ( <i>time sweep</i> )	NCHRP <i>project</i> 9-11 (Bahia et al, 2001)
Varredura de Amplitude Linear ( <i>Linear Amplitude Sweep LAS</i> )	Esboço da norma AASTHO (Johnson, 2010)
LAS Modificado	AASHTO TP 101-14-UL (Johnson, 2010 & Hintz, 2012)

O ensaio de varredura de tempo (*time sweep*) é feito no equipamento DSR à temperatura intermediária do grau de desempenho PG, utilizando placas paralelas de 8 mm de diâmetro e espaçamento entre placas de 2 mm. O procedimento do ensaio consiste na aplicação de carregamento senoidal cíclico em regime oscilatório à deformação ou tensão controlada numa frequência fixa. Os critérios de falha no ensaio correspondem aos observados na determinação de propriedades viscoelásticas de misturas asfálticas. A redução de 50% do módulo de cisalhamento dinâmico inicial da mistura asfáltica em deformação controlada não apresentou relação com o acúmulo de dano na amostra, motivando a proposição do conceito de energia dissipada como critério de falha. A principal desvantagem do critério de falha é o tempo de realização do ensaio.

O ensaio de Varredura de Amplitude Linear (*Linear Amplitude Sweep LAS*) segue os mesmos protocolos do equipamento e da amostra empregados no ensaio de varredura de tempo. A forma de aplicação de carregamento considera incrementos progressivos de deformação, que permitem acelerar o dano e diminuir o tempo do ensaio. O ensaio avalia a varredura de amplitude e posteriormente a varredura de frequência, obtendo-se a resposta viscoelástica linear do material, a fim de ser usada num modelo teórico e estimar a vida de fadiga do material. O modelo teórico proposto por Johnson (2010) considera a aplicação da teoria do dano contínuo viscoelástico (*Viscoelastic Continuum Damage VECD*), possibilitando a estimativa da vida de fadiga em qualquer amplitude de deformação para um ensaio.

O ensaio de LAS modificado considera as mesmas condições do ensaio de Varredura de Amplitude Linear em termos do equipamento, amostra, carregamento e frequência. Hintz (2012) considera que às respostas obtidas nas varreduras de amplitude frequência ocorrem mudanças na geometria da amostra devidas às fissuras e fraturas macroscópicas, e não às respostas viscoelásticas propostas por Johnson (2010). Para a minimização das fissuras e fraturas macroscópicas, Hintz (2012) sugere a aplicação de incrementos de carga de forma linear e não escalonada como foi proposto por Johnson (2010). O critério de falha proposto por Hintz (2012)



considera o comprimento da fissura ( $a_f$ ) e a deformação efetiva ( $\gamma_f$ ) em relação à geometria inicial e à amplitude do ângulo de deflexão.

A partir do ensaio de Varredura de Amplitude Linear proposto por Jonhson (2010) e das análises feitas por Hintz (2012) foi implantada a norma AASHTO TP 101-12-UL e atualizada no ano 2014. O ensaio deve ser realizado em amostras envelhecidas a curto e longo prazo, a fim de ter uma previsão do comportamento de vida de fadiga real. A norma proposta considera a análise baseada no dano contínuo viscoelástico, determinando a vida de fadiga a partir das propriedades reológicas e a varredura de amplitude proposta por Jonhson (2010) e a tolerância ao dano segundo os resultados de varredura de amplitude proposto por Hinz (2012).

#### Avaliação de deformação permanente em ligantes asfálticos

A deformação permanente ou afundamento de trilha de roda é considerada um dos maiores defeitos nos revestimentos de pavimentos asfálticos. Estas podem ser originados a elevados carregamentos provenientes do tráfego, baixas velocidades dos veículos e elevadas temperaturas. A metodologia Superpave contempla o parâmetro  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  como critério para a determinação da suscetibilidade do ligante asfáltico ao acúmulo de deformação permanente segundo os valores indicados na Tabela 2.8. A relação  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  é baseada no conceito da energia dissipada em um ciclo oscilatório, e estabelece que um material é tanto mais resistente à deformação permanente quanto maior for o valor. O parâmetro  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  é desconsiderado devido: à falta de correlação no desempenho mecânico das misturas asfálticas com ligantes modificados; determinação dos parâmetros na faixa de viscoelasticidade linear; pouco tempo de aplicação de ciclos de carga para a determinação da elasticidade do material.

Devido à falta de receptividade para a relação  $G^*/\text{sen}(\delta)$  foram estabelecidos novos procedimentos que permitam avaliar a deformação permanente na mistura asfáltica a partir do desempenho do ligante asfáltico (Clopotel & Bahia, 2012). Bahia, et al., (2001) propuseram um ensaio no DSR que consiste em submeter uma amostra de ligante asfáltico de 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessuras a diferentes ciclos de carga e descarga, a fim de avaliar as magnitudes das deformações elásticas e plásticas. O ensaio permite obter a deformação permanente e a recuperação elástica do material. A Tabela 2.11 apresentam os diferentes protocolos e ensaios estabelecidos na literatura para o ligante asfáltico através do DSR, a fim de avaliar a deformação permanente nas misturas asfálticas e recuperação elástica do material.

Tabela 2.11 Ensaio de deformação permanente no ligante asfáltico.

Ensaio de deformação permanente no ligante asfáltico	Publicação
Ensaio de fluência repetida e recuperação RCRT ( <i>repeated creep and recovery test</i> )	(Angelo, 2009)
Ensaio de fluência e recuperação sobre tensão múltipla MSCR ( <i>multiple stress creep and recovery</i> ).	AASHTO: TP70-10; TP70-12 TP-13 e T350-14. ASTM: D7405-08; D7405-08(a); D7405-10 e D7405-10(a).

Inicialmente o ensaio RCRT contemplou a utilização de 11 níveis de tensão cisalhante e um total de 10 ciclos de fluência e recuperação em cada um desses níveis, sendo 1 segundo de fluência e 9 segundos de recuperação por ciclos. Em seguida, o ensaio MSCR considerou somente a aplicação de dois níveis de tensão cisalhante (100 e 3200 Pa). A norma ASTM contempla aplicação de 10 e 20 ciclos de fluência e recuperação elástica para os níveis de 100 Pa e 3200 Pa respectivamente, e determina os parâmetros reológicos (percentual de recuperação e compliance não-recuperável) com todos os ciclos realizados. Já a norma AASHTO contempla 10 ciclos de carga para cada um dos carregamentos impostos (100 Pa e 3200 Pa) e determina os parâmetros reológicos com apenas os dez últimos ciclos. Domingos & Faxina, (2015) determinaram os parâmetros reológicos com base nos protocolos das normas AASHTO e ASTM para o CAP 50/70 modificado com borracha de pneus usados e ácido polifosfórico. Os resultados indicam que a norma ASTM subestimou os valores de recuperação elástica e superestimou os valores da compliance não-recuperável. As variações dos parâmetros pela escolha das normas existentes, podem alterar os níveis de tráfegos adequados determinados para os ligantes asfálticos.

A partir do ensaio de fluência e recuperação sobre tensão múltipla MSCR sobre o ligante asfáltico, desenvolveu-se uma classificação do ligante asfáltico em função do nível de tráfego. A Tabela 2.12 apresenta a classificação do ligante asfáltico quanto ao valor de Jnr (FHWA) AASHTO M320.

Tabela 2.12 Classificação do ligante asfáltico quanto ao valor de Jnr (FHWA)

Propriedade	Limite máximo [1/kPa]	Tipo de Tráfego	Eixos Padrão
Jnr a 3200 Pa na temperatura do PG	4	Padrão [s]	<10 <sup>6</sup>
	2	Pesado [H]	>10 <sup>6</sup>
	1	Muito Pesado [V]	>30 <sup>6</sup>
	0,5	Extremamente Pesado [E]	>100 <sup>6</sup>

### 2.3 INTERAÇÃO ASFALTO FÍLER - MÁSTIQUE ASFÁLTICO

A especificação 367 (DNIT, 1997) define fíler como material inerte passante no mínimo 65% pela peneira N° 200. Segundo Bardini *et al.*, (2013) o fíler na mistura asfáltica preenche o volume de vazios e estabelece pontos de contato entre os agregados a fim de criar uma mistura mecanicamente estável. Segundo Zulkati *et al.*, (2012) este pode influenciar no desempenho mecânico da mistura asfáltica de três formas: (i) aumentando o teor ótimo de ligante asfáltico, devido à superfície específica do material fíler. (ii) melhorando a trabalhabilidade durante a usinagem e compactação da mistura asfáltica, (iii) melhorando as propriedades resultantes do mástique que contribui para o desempenho e características mecânicas.

O desempenho mecânico e trabalhabilidade da mistura asfáltica é diretamente influenciado pelo comportamento e interação do mástique (combinação de ligante asfáltico, fíler e ar) (Chen & Peng, 1998). Neste sentido, torna-se fundamental a caracterização do ligante asfáltico e fíler mineral (mástique) para entender a resposta e desempenho das misturas asfálticas para pavimentos (Yiqiu *et al.*, 2010). Dois dos principais defeitos existentes nos revestimentos asfáltico (vida de fadiga e deformação permanente) dependem da interação físico-química do ligante asfáltico e das propriedades do fíler, finura e superfície específica (Bardini *et al.*, 2013). As observações microscópicas realizadas no âmbito dessa tese apontam ainda para a importância das características estruturais do fíler, pois estas interferem diretamente na interação asfalto-fíler. As interações entre o ligante asfáltico e o fíler podem contribuir para o aumento das forças de coesão, a fim de prevenir o crescimento de fissuras e aumentar a rigidez do mástique (Bardini *et al.*, 2013). Segundo Davis & Castorena, (2015) as interações físico-química no mástique resultam da adsorção das frações polares do asfalto na superfície dos grãos de fíler, formando uma camada interfásica entre o ligante asfáltico e o fíler como se mostra na Figura 2.7.

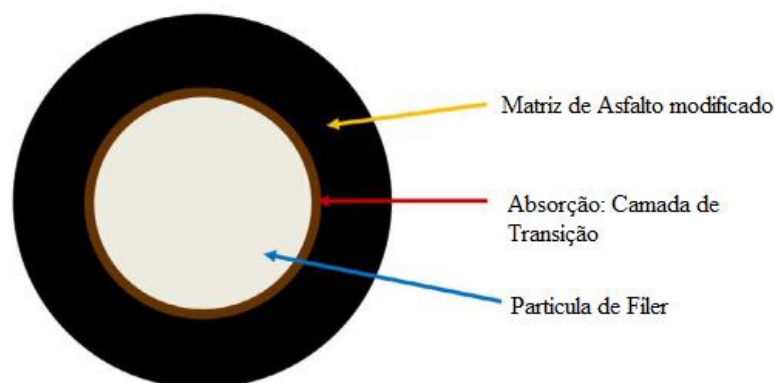


Figura 2.7 Interação físico-química no mástique – Modificado (Davis & Castorena, 2015).

A partir da Figura 2.6 observa-se que a interação físico-química no mástique gera uma camada de transição de absorção que pode ser alterada com a perda dos componentes químicos mais leves do ligante asfalto, modificando a composição química e a morfológica da matriz asfáltica (Davis & Castorena, 2015).

Chen & Peng (1998) estudaram a incorporação de dois tipos de partículas de sílica de tamanhos de 75  $\mu\text{m}$  e 5  $\mu\text{m}$  à matriz do ligante asfáltico. No estudo foram confeccionados corpos de prova do mástique utilizando teores de sílica entre 0% e 70% em relação ao peso do ligante asfáltico e testando-os a diferentes temperaturas (-20°C, -15°C e -10°C). Os resultados dos ensaios de tração direta indicaram boa adesão entre os materiais, apresentando aumentos dos esforços de tração e da energia de fratura em função do aumento do teor de fíler. Observou-se que os incrementos na resistência à tração foram maiores nas amostras com menor diâmetro da partícula de sílica. No entanto, as amostras avaliadas à baixas temperaturas apresentaram menores deformações, indicando que a incorporação do material fíler não causa trincamento prematuro.

Taha *et al.*, (2002) estudaram a incorporação do resíduo gerado na fabricação do cimento Portland como fíler em misturas asfálticas. O resíduo gerado nos fornos de calcinação kinquer para a fabricação do cimento, comumente conhecido como “pó de cimento” e nas suas siglas em inglês CBPD (*cement by-pass dust*), apresenta uma composição química similar ao cimento Portland, contendo 60% de cal (CaO) e outros compostos químicos tais como: dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>); óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); óxido de potássio (K<sub>2</sub>O); óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O); e cloro (Cl). Neste estudo foram avaliadas as características físicas do ligante asfáltico incorporando teores em peso de 0%, 3%, 5%, 7%, 10% e 15% de CBPD e cal usado como de material de referência. Os resultados indicam aumento significativos no ponto de amolecimento para os asfaltos modificados com até 10% de CBPD. No estudo da mistura asfáltica, observou-se que 5% de CBPD como fíler não altera o teor ótimo de ligante asfáltico e atinge os parâmetros de dosagem da especificação do ministério dos transportes de Oman, exceto o volume de agregado mineral (VAM). Os autores concluem que o material de enchimento fica encapsulado e solidificado na mistura asfáltica, reduzindo os possíveis riscos ambientais de lixiviação e migração de metais pesados para solo e cursos de água, no entanto, deve ser avaliada a prática no campo, para a utilização do CBPD com fíler em misturas asfálticas.

Wu *et al.*, (2011) estudaram as propriedades do mástique utilizando pó de tijolo vermelho reciclado e pó calcário como material fíler. As composições químicas dos materiais correspondem

a: 68,10% ( $\text{SiO}_2$ ); 16,35% ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e 6,04% ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) no pó de tijolo vermelho, e 17,95% ( $\text{SiO}_2$ ); 0,46% ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); 0,52% ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e 46,90% ( $\text{CaO}$ ) no pó de calcário. As análises de microscopia de varredura SEM (*Scanning Electron Microscopy*) indicaram que o fíler pó de tijolo apresenta uma superfície mais rugosa e com maior porosidade, facilitando a aderência do ligante asfáltico nos vazios do fíler. As análises das características físicas do mástique com adição do pó de tijolo indicaram aumento significativo do ponto de amolecimento, viscosidade e diminuição da penetração em relação ao mástique com pó calcário, provavelmente pelo alto teor de sílica e alta porosidade da superfície dos grãos de pó de tijolo vermelho reciclado. Abu-eishah *et al.*, (2012) estudaram as escórias de aço produzidas em fornos elétricos, concluindo que a presença dos óxidos de ferro ( $\text{FeO}$ ); óxido de cálcio ou cal ( $\text{CaO}$ ); e sílica ( $\text{SiO}_2$ ) na matriz do concreto hidráulico indicam baixa reatividade hidráulica e alta estabilidade, devido à estrutura cristalina dos componentes químicos.

Zulkati *et al.*, (2012) avaliaram os efeitos de diferentes fíleres (granítico, cal hidratada e caulim) no mástique e posteriormente no desempenho mecânico das misturas asfálticas. Os resultados indicam que a mistura com caulim apresentou maior resistência à deformação permanente, seguidamente da mistura com cal hidratada e com fíler granítico. O caulim é considerado uma argila com altas impurezas na mistura asfáltica, no entanto, devido à elevada absorção pode apresentar maiores pontos de adesão fíler-ligante asfáltico. A presença de cálcio na cal hidratada contribui para o aumento da aderência entre o ligante asfáltico e o fíler. O fíler granítico provem das rochas ígneas com alto conteúdo de sílica e quartzo.

Qian *et al.*, (2013) estudaram a incorporação do resíduo de fosfato como material fíler em misturas asfálticas densas. As análises químicas por meio da determinação do pH indicaram uma natureza alcalina, sendo que as ligações asfalto-agregado são mais fortes para agregados alcalinos, razão pela qual os autores concluem que os aumentos da rigidez do ligante asfáltico, o aumento da deformação permanente e o dano por umidade induzida, em relação às amostras convencionais.

Chandra & Choudhary (2013) estudaram a incorporação dos resíduos industriais pó de granito; pó de mármore e cinza de usinas termelétricas como material fíler nas misturas asfálticas. As dosagens das misturas asfálticas indicaram que o teor de ligante asfáltico depende da superfície específica, módulo de finura e porosidade do fíler. Os resultados da vida de fadiga indicaram aumentos de 30% para a mistura com a cinza de usinas termoelétricas, entre 50% e 70% na mistura com pó de mármore e entre 15% e 20% no pó de granito, em relação à mistura de referência com

pó de pedra convencional. Os autores concluem que a prática da utilização de resíduos industriais como materiais fíleres pode ser viável do ponto de vista técnico.

Modarres & Rahmzadeh, (2014) avaliaram o efeito do resíduo de pó de carvão natural e incinerado a 750°C como materiais fíleres na mistura asfáltica densa. Ensaio químicos de difração de raios-X indicaram a presença de compostos pozolânicos em ambos materiais, fato que proporcionou aumento dos parâmetros de estabilidade Marshall, resistência à tração e módulo de resiliência nas misturas de estudo em relação à amostra convencional. A partir do ensaio de resistência à tração, obtiveram um parâmetro de índice de tenacidade, que apresenta a absorção de energia ou flexibilidade do material, obtendo nas misturas estudadas maior flexibilidade.

## 2.4 MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas são aglomerações de agregados pétreos ou areia e materiais asfálticos que em proporções adequadas garantem requisitos estruturais e funcionais no revestimento de pavimentos flexíveis. Os principais requisitos que devem ser atingidos pela estrutura do pavimento são: impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, resistência à derrapagem, elevada vida de fadiga e resistência ao trincamento térmico quando submetidos às solicitações de cargas provenientes do tráfego e à ação do clima (Bernucci et al., 2008).

A fim de satisfazer aos diferentes requisitos estruturais e funcionais dos pavimentos surgiram diferentes tipos de misturas asfálticas envolvendo diversos fatores e aspectos a serem observados, tais como: tráfego e período de projeto; geometria da via e morfologia do relevo; tipos de materiais asfálticos; técnicas construtivas; propriedades físico-químicas e mineralógicas dos materiais pétreos e fíleres eventualmente usados; processos construtivos; temperaturas suportadas pelos materiais, entre outros (Ceratti, *et al.*, 2015). Os revestimentos de pavimentos rodoviários e aeroportuários utilizam tradicionalmente as misturas asfálticas fabricadas à “quente” envolvendo altas temperaturas de aquecimento dos materiais (150 °C a 180 °C) por apresentarem maior durabilidade e menor susceptibilidade à ação da água em relação às demais, apesar de exigirem um maior custo de fabricação. Temperaturas elevadas como as utilizadas facilitam o processo de mistura e possibilitam a melhor compactação.

Do ponto de vista da distribuição granulométrica e do arranjo de partículas dos agregados, classicamente as misturas asfálticas podem ser classificadas em: bem-graduadas ou densas; abertas ou contínuas; uniformes e descontínuas. As misturas asfálticas densas, apresentam um

maior intertravamento entre os agregados criando um volume baixo de vazios (3% a 5%), o que torna a superfície do pavimento impermeável ao fluxo água. Já as misturas abertas, uniformes ou descontínuas, devido à uniformidade de tamanho das partículas ou descontinuidade entre elas, conforme o caso, apresentam menor intertravamento entre as partículas, e propiciam um alto volume de vazios permitindo o fluxo de água entre as partículas. As misturas asfálticas descontínuas, comumente denominadas de camada porosa de atrito CPA ou concreto drenante, são utilizadas para a rápida evacuação de água como medida de segurança em pavimentos rodoviários e aeroportuários.

As Camadas Porosas de Atrito (CPA) ou concretos asfálticos drenantes surgiram com o objetivo de aumentar a segurança dos revestimentos dos pavimentos por meio do aumento da interação pneu-pavimento em especial em períodos chuvosos quando elimina a camada de água que se coloca entre o pneu e o revestimento na misturas betuminosas convencionais (CBUQ – Concreto Asfáltico Usinado a Quente). A formação da lâmina de água sobre a superfície do pavimento, também conhecida como hidro ou aquaplanagem, torna-se uma condição desfavorável do ponto de vista da segurança por afetar reduzindo a interação pneu-pavimento. Neste sentido, as águas da chuva se infiltram na camada superficial porosa e escoam por meio dos vazios comunicantes da mistura CPA sendo captadas pelos sistemas de drenagem. Imediatamente abaixo da camada CPA deve existir uma superfície impermeável, que ao mesmo tempo impede a continuidade do fluxo descendente da água e permite o escoamento da água até atingir o sistema de drenagem do pavimento geralmente localizado no acostamento (Mallick *et al.*, 2000). A Figura 2.8 apresenta o sistema de funcionamento da camada porosa de atrito ou concreto asfáltico drenante.

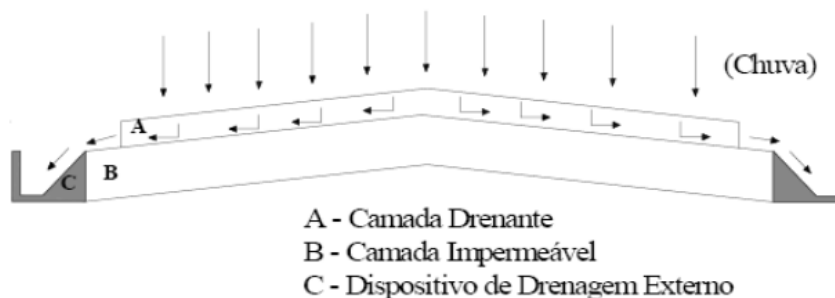


Figura 2.8 Sistema de funcionamento da camada porosa de atrito CPA (Oliveira, 2003).

O tempo de infiltração e evacuação da água da chuva através da estrutura do pavimento depende da espessura e permeabilidade da mistura CPA, da textura da superfície e das declividades transversal e longitudinal das camadas permeável e impermeável, da disposição dos sistemas de

drenagem externos, entre outros. Neste contexto, torna-se importante a quantificação do volume de vazios comunicantes e a contínua limpeza para evitar a colmatação dos mesmos a fim de garantir o fluxo de água (Mallick *et al.*, 2000).

A utilização da CPA proporciona aumento das características funcionais do pavimento, tais como: aumento da aderência entre o pneu-pavimento, redução da hidroplanagem e viscoplanagem, inexistência da névoa formada pelas passagens de veículos após da chuva, aumento da macrotextura, aumento da visualização da sinalização horizontal pela redução da reflexão luminosa, entre outros (Oliveira, 2003 & Guimarães, 2012). O tráfego de veículos sobre revestimentos de misturas CPA, proporcionam menor resistência ao rolamento e diminuem o consumo de combustível na ordem do 1% a 2% (Fabb (1992) & Lefebvre (1993) *Apud* Homem, 2002). Além das características funcionais, os concretos drenantes apresentam boa capacidade de redução dos ruídos e absorções acústicas provenientes do tráfego, diminuindo o impacto ambiental e a poluição sonora sofrido pela vizinhança em vias urbanas e rodovias (Oliveira, 2003) (Callai, 2011).

Devido à elevada percentagem de vazios da mistura CPA, o ar localizado à frente do pneu tende a penetrar pelos vazios na CPA, reduzindo o bombeamento do ar. Com a redução do bombeamento do ar, acontece uma diminuição dos ruídos, cuja ordem de grandeza varia com o tamanho e granulometria dos agregados, espessura da camada, tipo de ligante asfáltico, e o teor de vazios comunicantes (Swart, 1997 *apud* Meurer Filho, 2001).

Apesar das vantagens apresentadas na mistura CPA pela melhoria das características funcionais e segurança do pavimento, os concretos drenantes não cumprem uma função estrutural no pavimento. A colmatação (obstrução) dos vazios na mistura CPA é considerada uma grande desvantagem pela redução das funções de drenagem e acústicas do pavimento ao longo do tempo, gerando custos de manutenção para a limpeza e correta operação do pavimento poroso. Ao mesmo tempo, as misturas CPA apresentam altos custos de implantação devido à incorporação de ligantes asfálticos modificados para a prevenção do envelhecimento originado pela oxidação no contato água-asfalto que surge em consequência da sua própria finalidade, a drenagem da água. As primeiras aplicações e experiências dos concretos drenantes em pavimentos aeroportuários e rodoviários remetem às décadas dos anos 1980 e 1990 no Brasil.



O desempenho mecânico do pavimento flexível se dá em função do comportamento estrutural frente à ação das solicitações provenientes das cargas do tráfego sendo também relevante o comportamento funcional (conforto e segurança dos usuários). O acúmulo das solicitações na estrutura do pavimento pode gerar defeitos nas camadas do pavimento, principalmente no revestimento, que deteriora a estrutura do pavimento e minimiza a vida útil de serviço. A fim de minimizar os defeitos dos revestimentos asfálticos, principalmente pela desagregação dos materiais, tem-se utilizado diferentes técnicas e materiais que garantam a durabilidade no tempo. Surgiu então a ideia de utilizar novos aditivos que garantissem a durabilidade dos materiais. Neste sentido passou-se a usar a cal que atua como um aditivo multifuncional, que contribui para a diminuição de danos por umidade, envelhecimento químico do ligante asfáltico, falta de adesividade ligante-agregado, e atua no aumento do desempenho mecânico em relação à ocorrência de trincas por fadiga e à deformação permanente (Lesueur *et al*, 2013).

Experiências internacionais relatam que a utilização da cal em misturas asfálticas aumenta a vida útil dos revestimentos asfálticos. Estima-se que 10% dos revestimentos asfálticos nos EUA inclui adição de cal. No caso Europeu, a Holanda especifica nas normas de construção o emprego de cal nos revestimentos porosos, sendo que para o ano 2013, 70% deste tipo de revestimentos incluem a adição da cal (Lesueur *et al*, 2013). Diversos países europeus, especialmente a Áustria, França, Holanda, Reino Unido e Suíça, estão adotando a adição da cal em misturas asfálticas. Nestes países já se dispõe de casos de estudos práticos que relatam o aumento do desempenho mecânico das misturas asfálticas com o uso da cal (Lesueur *et al.*, 2016).

A incorporação da cal em misturas asfálticas, pode ser realizada por meio da incorporação às superfícies das partículas graúdas ou miúdas pela via seca, úmida ou por meio da aplicação de lama de cal, com ou sem marinação. Ela pode também ser usada por meio da substituição parcial ou total do fíler (Bock, 2012). Os principais efeitos da cal em misturas asfálticas se referem a:

- Ampliação da resistência ao envelhecimento químico do ligante asfáltico como resultado das reações químicas que ocorrem entre o hidróxido de cálcio e as moléculas altamente polares do asfalto.
- Aumento da resistência ao dano pela umidade e variações de temperaturas ao aumentar a adesão na interface agregado-ligante e eliminar a sensibilidade à umidade.
- Melhoria das propriedades mecânicas tais como o aumento da resistência à tração e do módulo de resiliência e minimização das deformações permanentes.

Núñez *et al.* (2007) relatam que a adição de 1% de cal sobre a massa total das misturas contribui para o aumento da ordem de 30% na resistência à tração e de 70% no módulo de resiliência. Em termos da deformação permanente, ensaios de creep dinâmico em misturas asfálticas com adição de 1% de cal sobre a massa total apresentaram uma redução do acúmulo de deformações permanentes de 21% em relação a uma amostra convencional sem uso da cal (Núñez, 2009).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo descrevem-se os materiais e a metodologia utilizados para a elaboração das misturas asfálticas dos tipos Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) e Camada Porosa de Atrito (CPA). Este estudo divide-se em três partes: a primeira corresponde à caracterização física e química dos materiais alternativos usados como modificadores do ligante asfáltico; a segunda corresponde ao estudo dos ligantes asfálticos modificados, avaliando a interação asfalto - agente modificador em diferentes teores por meio de análises do comportamento físico e reológico; a terceira corresponde à avaliação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas sem aditivos e considerando os ligantes modificados. As Figura 3.1 e 3.2 apresentam a metodologia de estudo de laboratório adotada para os ligantes asfálticos modificados e para as misturas asfálticas.

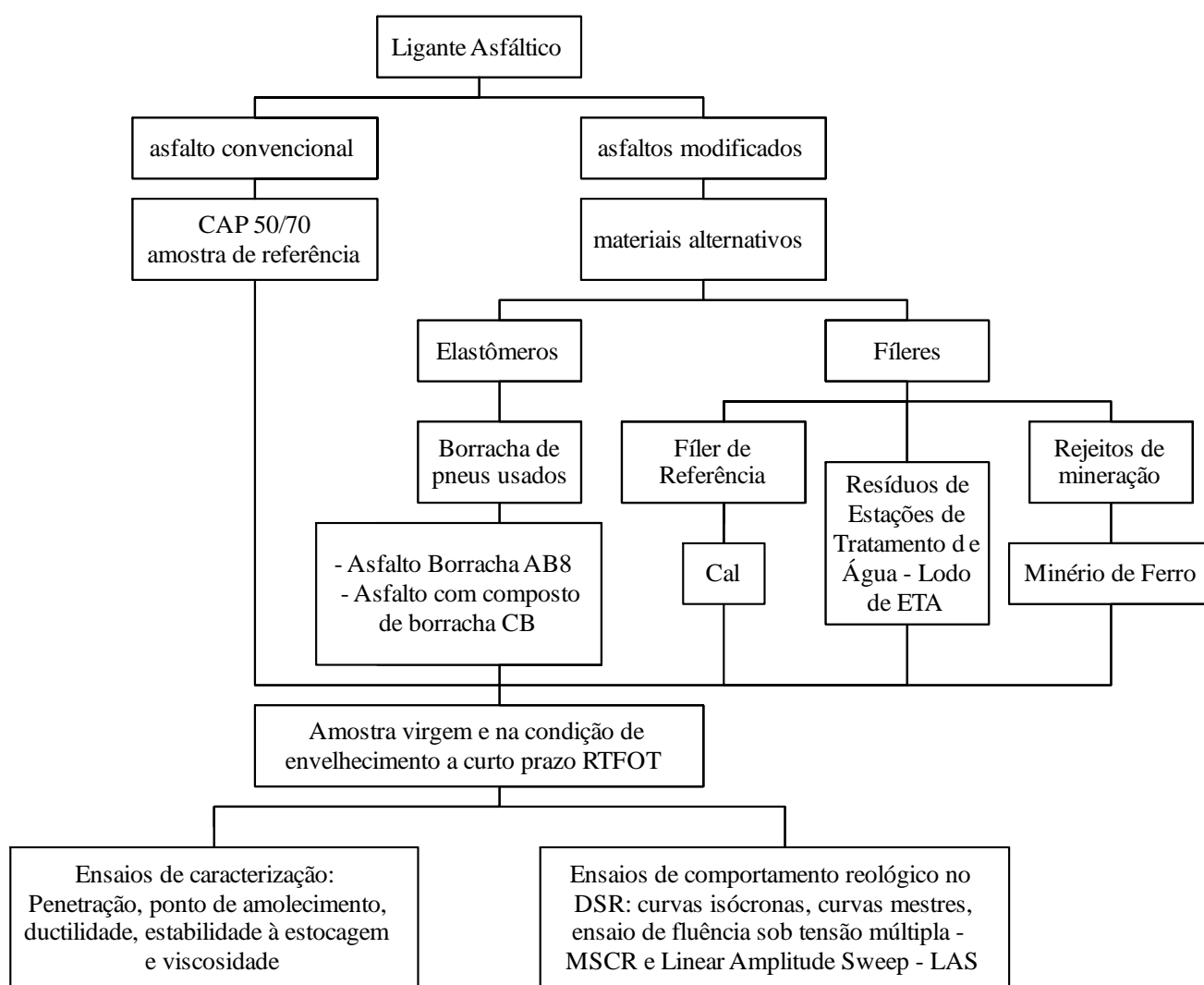


Figura 3.1. Estudo em laboratório de ligantes asfálticos modificados.

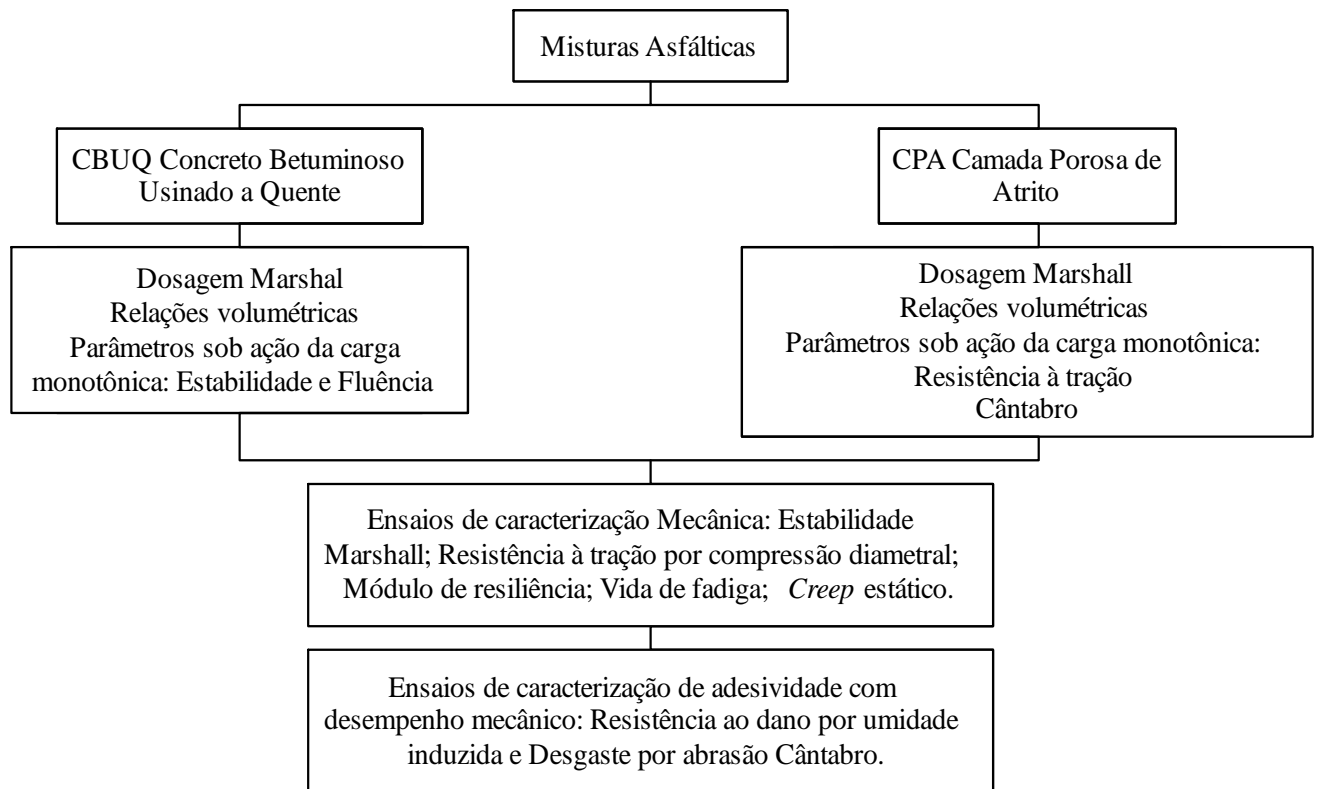


Figura 3.2. Estudo em laboratório de misturas asfálticas com ligantes modificados.

### 3.1 MATERIAIS ALTERNATIVOS MODIFICADORES DO LIGANTE ASFÁLTICO

Após a revisão bibliográfica sobre os resíduos sólidos considerados passivos ambientais optou-se por estudar a aplicabilidade de borracha de pneus usados, de rejeitos de minério de ferro e do resíduo lodo de ETA como materiais modificadores do ligante asfáltico tipo CAP 50/70. Paralelamente, comparou-se o efeito da consistência dos ligantes asfálticos modificados com o CAP 50/70 puro. No caso dos ligantes asfálticos modificados com elastômeros, utilizou-se a borracha proveniente dos pneus usados de veículos para a fabricação da amostra de referência, asfalto borracha AB8, e as amostras de estudo com o composto de borracha com adição do fíler cal, amostra AB CB. Informações adicionais sobre o uso dos elastômeros nessa pesquisa encontram-se no item 3.2.2. No estudo dos ligantes modificados com fíleres, utilizou-se a cal como fíler de referência e rejeitos de minério de ferro e lodos de ETA como materiais alternativos de estudo. As amostras de referência em ambos os casos, com elastômeros e fíleres, são misturas já usadas na engenharia de modo corrente.

As amostras do rejeito de minério de ferro foram extraídas da mina Bonito, localizada no município de Jucuturu, na microrregião do Vale do Açu, distante aproximadamente 150 quilômetros de Natal, capital do estado do Rio Grande do Norte (Dantas, 2015). A Figura 3.3 apresenta a amostra do rejeito de mineração usado em laboratório.



Figura 3.3 Amostra do rejeito de mineração.

O resíduo de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) foi coletado na estação de tratamento de água da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), localizada no plano piloto do Distrito Federal. As amostras foram coletadas e secas ao ar em aproximadamente 100 dias obtendo uma perda de massa de 38,08%; em seguida passaram por uma redução de tamanho dos grãos através de destorroamento e por um moinho mecânico até atingir material fíler passante pela peneira N° 200. A Figura 3.4 apresenta a amostra de lodo de ETA usado.



Figura 3.4. Resíduos de lodos de ETA: (a) disposição final; (b) secagem inicial ao ar; (c) secagem final ao ar.

Ao serem inseridos os materiais alternativos diretamente no ligante asfáltico, precisam apresentar estabilidade gravimétrica às variações térmicas que será exposto o ligante asfáltico durante o processo de fabricação da mistura e durante a vida útil do revestimento asfáltico. Determinou-se o teor de umidade DNIT 213 (DNIT 1994) com modificação da temperatura a 165° C durante 48 horas, a fim de observar o comportamento do material no tempo e temperaturas de usinagem das misturas asfálticas.

Para o caso do lodo de ETA de Brasília, avaliou-se a perda de massa para diferentes temperaturas de calcinação por meio de uma mufla. Os resultados são apresentados na Figura 3.5, concluindo que para a temperatura de 500 °C ocorre 42,82% de perda de massa para um tempo de calcinação de 45 minutos, atingindo perda de umidade e combustão da matéria orgânica (Martinez, 2014).

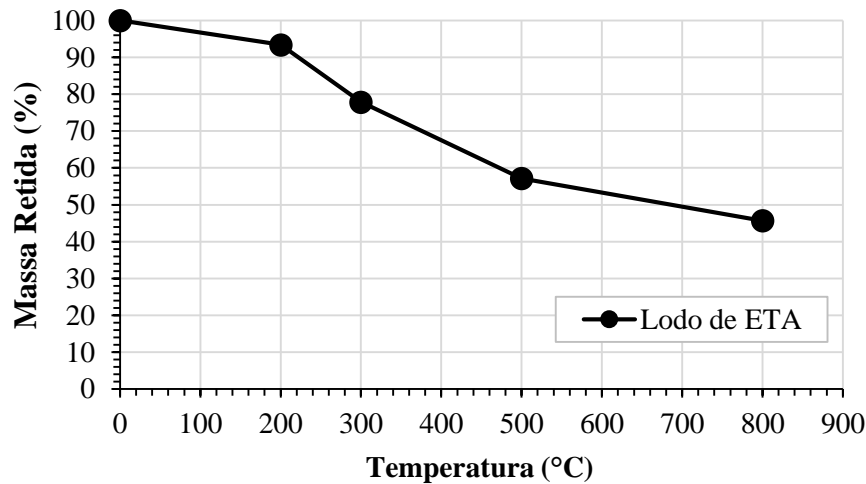


Figura 3.5 Perda de massa *versus* temperatura de calcinação do lodo de ETA (Martinez, 2014).

Como alternativa de estudo baseado nas temperaturas de fabricação (usinagem e compactação) de misturas asfálticas quentes, analisou-se a variação de massa dos materiais fíleres modificadores do ligante asfáltico, contemplando a temperatura crítica do ligante asfáltico de 177 °C. Nesta temperatura, o ligante asfáltico apresenta envelhecimento e perda dos compostos químicos. A Figura 3.6 apresenta a massa retida no tempo na temperatura de 165°C dos materiais fíleres estudados.

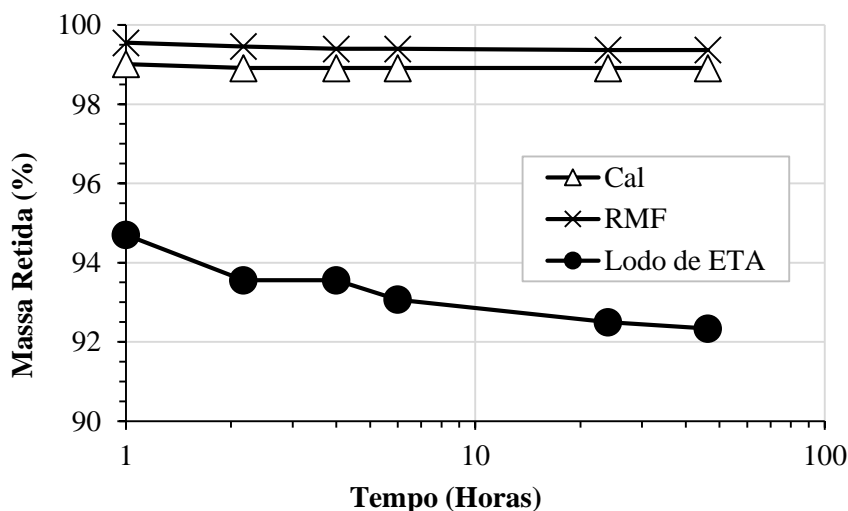


Figura 3.6 Perda de massa *versus* tempo na temperatura de 165 °C.

A Figura 3.6 indica, que para caso do lodo de ETA previamente seco, apresenta-se uma perda de massa de aproximadamente 8%, fato que pode ser atribuído à umidade higroscópica e à presença da matéria orgânica do material. A perda de massa total do lodo de ETA (secagem ao ar e na estufa a 165 °C) corresponde a 44,98%. Martinez (2014) obteve perda de massa dos lodos de ETA de Brasília de 42,84% para a temperatura de calcinação de 500 °C durante 45 minutos. No, entanto, os dois procedimentos abordados apresentam estabilidade gravimétrica às temperaturas de aquecimento do ligante asfáltico com a diferença de perda de massa de 2,15%, fato que pode ser atribuído às condições iniciais das amostras.

Para o caso da cal, verifica-se uma perda de massa inferior ao 1% no tempo de 48 horas, provavelmente devida à umidade higroscópica. A estabilidade da massa com a variação da temperatura no caso da cal pode ser atribuída aos tratamentos térmicos contemplados nos processos industriais de fabricação da mesma. A temperatura máxima atingida nos processos de calcinação das matérias primas para a fabricação da cal oscila em torno de 850 °C. O resíduo de minério de ferro apresentou baixa perda de massa, provavelmente devido à natureza da rocha intacta.

### **3.1.1 Ensaios de caracterização física**

Os seguintes ensaios foram realizados nos materiais fíleres convencionais e alternativos, a fim de determinar as características físicas:

- análise granulométrica para a classificação e distribuição dos tamanhos das partículas do material de enchimento para misturas betuminosas DNIT 035 (DNIT 1997);
- ensaio de difração de laser pelo método de dispersão de partículas em fase líquida associado com um processo de medida óptica através da difração a laser. Este ensaio foi realizado com fíleres com tamanho das partículas passantes pela peneira 100. Utilizou-se o Analisador de partículas por difração a laser da marca CILAS 1064 LD com faixa analítica de 0,04 a 500 micron e emissores de laser secundários. Os ensaios foram realizados no laboratório da Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Capina Grande e segundo as diretrizes assumidas por Lucena (2012).
- limite de liquidez NBR 646 (NBR 1984) e limite de plasticidade NBR 7180 (NBR 1984);
- determinação da massa específica real do material finamente pulverizado DNIT 085 (DNIT 1994).

### 3.1.2 Ensaios de caracterização química

No estudo dos ligantes modificados foram realizados ensaios químicos nos materiais modificadores a fim de determinar as principais composições e características e intuir sua possível interação química com a matriz de ligante asfáltico. Neste contexto, foram realizadas as seguintes análises:

- a técnica de Fluorescência de raios-X por energia dispersiva (FRX/EDX) a fim de determinar a composição química elementar das amostras dos materiais modificadores do ligante asfáltico. As análises foram feitas no laboratório de química analítica da Universidade de Brasília por meio de um espectrômetro de XRF/EDX da RIGAKU, modelo ZSX Primus II;
- a Difração dos Raios X (DRX) para determinar os principais minerais que constituem os materiais fíleres e o elastômero do tipo borracha. As análises foram feitas no laboratório de Engenharia de Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande. Utilizou-se o aparelho Shimadzu XDR-6000 com radiação de  $\text{CuK}\alpha$ , tensão de 40kV, corrente de 30mA, varredura de 2 a 30° e  $\lambda=1,54\text{\AA}$ ;
- o potencial Hidrogeniônico pH indica a acidez ou basicidade de uma solução aquosa, sendo que  $\text{pH} < 7$  indicando acidez e alta concentração de prótons ( $\text{H}^+$ ),  $\text{pH} > 7$  indicando basicidade e baixa concentração de prótons ( $\text{H}^+$ ). Os ensaios foram feitos sobre amostras dos materiais fíleres em soluções de água e cloreto de potássio KCL a fim de determinar o ponto de carga zero (PCZ) e estabelecer o tipo de carga. O procedimento do ensaio seguiu o protocolo da norma ASTM D4972 (ASTM, 2001) para a determinação do pH de solos. As análises foram feitas no Laboratório da Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande utilizando o ph-metro modelo HI 99121;
- a Análise Térmica Diferencial (ATD) determina o modo de reagir do material a diferentes temperaturas, com relação às transformações endotérmicas (desidratação) e exotérmicas (oxidação e reconstrução da estrutura cristalina);
- a Análise Térmica Gravimétrica (TG) permite determinar as variações do material em massa com o seu aquecimento. Os materiais modificadores do ligante asfáltico devem ter a capacidade de resistir à degradação volumétrica nas temperaturas usuais de estocagem, usinagem e compactação;
- a Espectroscopia infravermelha de transformada de Fourier (FTIR) determina os grupos funcionais presentes nas amostras de origem mineral, obtendo informações da natureza, reatividade e arranjo estrutural, a fim de avaliar a composição mineralógica. As medidas de



FTIR foram feitas no Laboratório da Engenharia de Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande;

- análise microscópica eletrônica de varredura MEV permite observar a superfície dos grãos dos materiais fíleres. As análises foram feitas no Laboratório da Engenharia de Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande utilizando o MEV modelo HI 99121.
- 

### **3.2 LIGANTE ASFÁLTICO**

O Ligante Asfáltico (LA) puro que foi modificado e utilizado na pesquisa foi Cimento Asfáltico de Petróleo tipo CAP 50/70 produzido na refinaria Gabriel Passo da Petrobras, localizada no município de Betim, Minas Gerais. Os ligantes asfálticos modificados foram divididos em dois grupos de estudo. O primeiro contemplando os elastômeros provenientes da borracha de pneus usados, enquanto que o segundo contemplando os fíleres alternativos, tais como: rejeito de minério de ferro (RMF) e lodo de ETA. Além disso, estudou-se a cal como fíler comercial. O procedimento de fabricação dos ligantes modificados com elastômeros e com fíleres são apresentados nos itens 3.2.2 e 3.2.3 respectivamente. Para fins de identificação dos ligantes, foi utilizada a seguinte nomenclatura:

- Tipo 1: Ligante Asfáltico puro – (LA: CAP 50/70) amostra de referência.

#### Asfaltos modificados com elastômeros:

- Tipo 2: Asfalto borracha modificado em laboratório com borracha via úmida (AB8).
- Tipo 3: Asfalto borracha modificado com composto de borracha (AB CB).

#### Asfaltos modificados com fíleres:

- Tipo 4: Ligante Asfáltico modificado com cal virgem (LA + Cal Virgem).
- Tipo 5: Ligante Asfáltico modificado com rejeito de minério de ferro (LA + RMF).
- Tipo 6: Ligante Asfáltico modificado com lodo de ETA (LA + ETA).

### 3.2.1 Ligantes asfálticos modificados com elastômero tipo borracha

Para a produção do asfalto borracha AB8 foi adicionada borracha via úmida segundo a Norma ASTM D6114 (ASTM 2009). A borracha granulada reciclada de pneus usados foi fornecida pelo grupo Greca Asfaltos e passou pelo processo de moagem à temperatura ambiente. Após a etapa de moagem, realizou-se um fracionamento granulométrico a fim de atingir os requerimentos médios do Departamento de Transporte de Arizona (ADOT), especificados na Norma ASTM D6114 (ASTM, 2009). A borracha foi aquecida à temperatura de 57 °C por aproximadamente 30 minutos, enquanto que o ligante asfáltico permaneceu quente a 170 +/-5 °C, na proporção em peso de 17% de borracha granulada e 83% de CAP 50/70 puro. Para o processo de mistura foi utilizado um equipamento agitador rotacional de hélice, operando numa velocidade de 350 rpm durante 60 minutos.

Para a realização do asfalto modificado com composto de borracha (AB CB) misturou-se os materiais (borracha e cal virgem) num equipamento rotacional, para possibilitar a interação, ou ativação, dos mesmos pela presença das umidades naturais. Em seguida, a mistura (borracha-cal) foi aquecida durante 5 minutos a 60 °C e misturada com CAP 50/70 aquecido a 150 °C, por um tempo entre 5 e 10 minutos, criando um composto de borracha CB como está apresentado na Figura 3.6. As proporções em peso dos materiais correspondem a 62% borracha; 16% material fíler; e 22% ligante asfáltico, segundo as recomendações de Sousa (2012).



Figura 3.7 Fabricação do composto de borracha.

O composto de borracha foi adicionado ao ligante asfáltico por via úmida em diferentes proporções em peso: 10%; 15%; 17%; 20%; 22%; e 29% e CAP 50/70, numa temperatura de 160 +/- 5 °C durante aproximadamente 30 minutos. Os percentuais adicionados correspondem a valores experimentais, garantindo a trabalhabilidade do material. A Tabela 3.1 apresenta as proporções em pesos totais dos materiais constituintes de cada tipo de ligante modificado, incluindo as duas amostras de referência: CAP 50/70 puro e Asfalto Borracha – AB8. Observa-se nessa tabela que na ativação da borracha adotou-se sempre um teor de cal de aproximadamente 25,5% em relação à massa da borracha.

Tabela 3.1. Percentuais de matérias constituintes dos ligantes modificados

Ligante Asfáltico	Dosagem gravimétrica			Dosagem volumétrica	
	% Borracha	% Cal virgem	% CAP 50/70	% Borracha e Cal	% CAP 50/70
CAP 50/70	0,0	0,0	100,0	0,0	100,0
AB8 LAB	17,0	0,0	83,0	16,8	83,2
AB CB 10	6,2	1,6	92,2	6,8	93,2
AB CB 15	9,3	2,4	88,3	10,3	89,7
AB CB 17	10,5	2,7	86,7	11,6	88,4
AB CB 20	12,4	3,2	84,4	13,7	86,3
AB CB 22	13,6	3,5	82,8	15,2	84,8
AB CB 29	18,0	4,6	77,4	20,1	79,9

### 3.2.2 Ligantes asfálticos modificados com fileres alternativos e comerciais

Para fins comparativos, trabalhou-se com dosagem gravimétrica dos ligantes modificados utilizando teores de 10%; 20%; 30% e 40% em peso, sendo apresentados na Tabela 3.2 as dosagens em peso e em volume utilizadas. Observa-se nessa tabela que volumetricamente as proporções variam com o resíduo utilizado. Para a elaboração dos ligantes modificados, o CAP 50/70 foi aquecido até 155 °C +/- 5°C e o material fíler (alternativos e convencionais) foi aquecido a 60 °C aproximadamente por uma hora a fim de tirar a umidade higroscópica do material. Os materiais foram misturados utilizando um equipamento rotacional com taxa de 350 +/- 20 rpm por 60 minutos, utilizando uma hélice.

Tabela 3.2 Dosagem gravimétrica e volumétrica dos asfaltos modificados com fíleres.

Tipo de material	Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	Dosagem gravimétrica (%)		Proporção em peso fíler/CAP	Dosagem volumétrica (%)		Proporção em volume fíler/CAP
		Fíler	CAP 50/70		Fíler	CAP 50/70	
CAP 50/70	1,004	0	100		0	100	
Cal	2,688	10	90	0,11	4	96	0,04
		20	80	0,25	8,5	91,5	0,09
		30	70	0,43	13,8	86,2	0,16
		40	60	0,67	19,9	80,1	0,25
Minério de Ferro (RMF)	4,085	10	90	0,11	2,7	97,3	0,03
		20	80	0,25	5,8	94,2	0,06
		30	70	0,43	9,5	90,5	0,10
		40	60	0,67	14,1	85,9	0,16
Lodo de ETA	1,676	10	90	0,11	6,2	93,8	0,07
		20	80	0,25	13	87	0,15
		30	70	0,43	20,4	79,6	0,26
		40	60	0,67	28,5	71,5	0,40

### 3.2.3 Caracterização física de ligantes asfálticos

A fim de realizar o estudo comparativo dos diferentes materiais e teores incorporados ao CAP 50/70 puro foram realizados ensaios de caracterização física de asfaltos. A Tabela 3.3 apresenta os ensaios e normas utilizadas para a realização dos ensaios clássicos de classificação de ligantes asfálticos, seguindo os protocolos das especificações brasileiras. Para o estudo dos ligantes modificados se deve conhecer a compatibilidade dos materiais modificadores com o ligante asfáltico por meio do ensaio de estabilidade ao armazenamento de asfalto polímero, norma DNIT 384 (DNIT, 1999).

Tabela 3.3. Especificações Brasileiras para ensaios de caracterização convencional de asfaltos.

Caraterísticas	Ensaio	Norma
Consistência	Penetração	DNIT 155-2010
	Ponto de amolecimento – método de anel e bola	DNIT 131-2010
Ductilidade e recuperação elástica	Ductilidade a 25°C	DNIT-ME 163-1998
	Recuperação Elástica 25°C	DNIT 130-2010
Segurança	Ponto de fulgor e combustão	DNIT-ME 148-1994
Densidade	Densidade de material betuminoso	DNIT-ME 193-1996

A capacidade do ligante asfáltico manter as características reológicas inalteradas numa faixa de temperatura é denominada susceptibilidade térmica. O índice de Susceptibilidade Térmica IST ou índice de penetração IP é obtido a partir dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento,

segundo a formulação matemática apresentada pela especificação do DNIT 095 (DNIT 2006) e resolução da ANP 19 (ANP, 2005). A Equação 3.1 expressa o cálculo matemático do IST.

$$IST = \frac{[500 \cdot \text{Log}(PEN)] + [20 \cdot T^{\circ}\text{C}] - 1951}{120 - [50 \cdot \text{Log}(PEN)] + [T^{\circ}\text{C}]} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Onde:

$T^{\circ}\text{C}$  = Temperatura do ponto de amolecimento;

PEN = Penetração a 25°C, 100 gramas, 5 segundos.

O Índice de Suscetibilidade Térmica (IST), também conhecido como Índice de *Pfeiffer e Van Doormaal*, encaixa-se nas especificações brasileiras na faixa de -1,5 a + 1,0. Sendo que para valores positivos (+1,0) indica que o ligante asfáltico apresenta pouca sensibilidade a elevadas temperaturas; para valores negativos (-1,5) indica que o ligante apresenta muita sensibilidade a elevadas temperaturas, ou seja, apresentam maior amolecimento. Em climas frios, o ligante permanece mais rígido e diminui a resistência à fissuração e ao trincamento. Em climas quentes, no caso do Brasil, aumenta a flexibilidade e diminui a resistência à deformação permanente.

### 3.2.4 Ensaio de estabilidade à estocagem ou armazenamento

Para o estudo dos ligantes modificados é importante conhecer a compatibilidade dos materiais modificadores com o ligante asfáltico. Nessa pesquisa foi realizado o ensaio de compatibilidade por meio da estabilidade ao armazenamento de asfalto polímero DNIT 384 (DNIT 1999). Existem diferentes normas que regulam a execução do ensaio de separação de fases. A Tabela 3.4 apresenta o resumo das principais variáveis, segundo as normas estudadas.

Tabela 3.4 Condições do ensaio de estabilidade ao armazenamento de asfaltos modificados segundo diferentes normativas.

Norma	Caraterística da amostra			Condições do ensaio			
	Altura	Diâmetro	Quantidade	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura
	[mm]	[mm]	[ml]	[horas]	[°C]	[horas]	[°C]
ABNT 15166/2004	147	25.4	500	48	163	4	-6.7
DNIT-ME 384/99			250	120	163 +/- 3		
INV-E 726/07	105	50	180	120	163 +/- 2		
NTC-E 319	105	50	180	120	163 +/- 2		
ASTM D 5892	139.7	25.4	50	48 +/- 1	163 +/- 5	4	-6.7
The Shell Bitumen Handbook	272	65	600	72	160		

O objetivo do ensaio de estabilidade ao armazenamento de asfalto polímero é determinar a estabilidade do valor da consistência. Ela determinada por meio da avaliação da diferença do ponto de amolecimento, determinado no topo superior e inferior de uma amostra de asfalto modificado e acondicionada por cinco dias a  $163 \pm 3$  °C. Foram realizadas algumas alterações no ensaio objetivando garantir a temperatura constante. As amostras foram então colocadas numa caixa metálica com areia, e com um termômetro verificou-se a temperatura em diferentes pontos. O resultado é determinado pela diferença entre os pontos de amolecimento. A Figura 3.8 apresenta a sequência da execução do ensaio.

O ensaio de estabilidade ao armazenamento permite determinar a compatibilidade entre o asfalto e os materiais modificadores, sendo que asfaltos modificados com grandes diferenças nos valores dos pontos de amolecimento indicam falta de compatibilidade e indicam como diretriz de procedimento agitação contínua durante o armazenamento e manuseamento em campo (Souza, 2010).



Figura 3.8 Sequência do ensaio de estabilidade ao armazenamento de asfalto: (a) Recipientes adaptados do ensaio; (b) Calibração da caixa de areia – controle de temperatura; (c) aquecimento dos materiais; (d) Peso do asfalto modificado.

### 3.2.5 Efeito do envelhecimento a curto prazo dos ligantes asfálticos

O estudo das propriedades dos ligantes asfálticos deve ser realizado em três etapas: (I) sobre a amostra virgem; (II) durante o processo de usinagem e compactação da mistura asfáltica, comumente conhecida como envelhecimento a curto prazo; (III) e finalmente na etapa da vida útil da mistura asfáltica em campo, conhecido como o envelhecimento a longo prazo. Neste caso, foram estudadas as amostras virgens após a fabricação dos ligantes modificados e na condição de envelhecimento a curto prazo.

Para a determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional para materiais asfálticos, utilizou-se a norma ASTM D 7175 (ASTM 2008). O objetivo do ensaio

*Rolling Thin Film Oven Test* RTFOT é determinar o efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional de ligante asfáltico exposta em um compartimento giratório. A inclusão de ar é feita mediante um jato com taxa constante, que simula o envelhecimento do ligante asfáltico em curto prazo devido à usinagem da mistura asfáltica. O resultado do ensaio considera que o percentual de perda de massa antes e após a execução do ensaio, correspondente à perda das frações químicas mais voláteis, comumente denominadas saturados e aromáticos. A Figura 3.9 apresenta os equipamentos e sequências utilizadas nos ensaios de envelhecimento.



Figura 3.9 Ensaio de envelhecimento a curto prazo RTFOT: (a) Frascos antes do ensaio; (b) Frascos após o ensaio; (c) Estufa de envelhecimento a curto prazo.

O envelhecimento do ligante asfáltico gera a saída de compostos químicos mais leves, consequentemente apresenta aumento do teor dos asfaltenos e reduz o teor dos aromáticos e resinas (Leni, 1999). O aumento da rigidez se evidencia através do aumento do ponto de amolecimento; diminuição da penetração e aumento da viscosidade. A Tabela 3.5 ilustra as variações especificadas em diferentes normas segundo a ANP (2005) e DNIT 095 (2006) para os ensaios de consistência e ductilidade após o RTFOT.

Tabela 3.5 Variações admissíveis após do ensaio RTFOT (ANP, 2005).

<b>Após RTFOT: Efeito calor e ar a 163 °C, 85 minutos</b>	<b>Norma</b>	<b>Unidade</b>	<b>CAP 50/70</b>
Variação em massa, máx	ASTM D 7175-2008	%	0.5
Ductilidade a 25°C após RTFOT, min	DNIT-ME 163-1998	cm	20
Aumento do ponto de amolecimento após RTFOT, máx	DNIT 131-2010	°C	8
Penetração retida, min	DNIT 155-2010	%	55

O percentual de penetração retida ( $PEN_{retida}$ ) define a capacidade dos ligantes asfálticos manterem a característica de penetração, após o procedimento de envelhecimento RTFOT. A menor

alteração acontece quando os valores ficam mais próximo de 100%. A Equação 3.2 apresenta a expressão usada a determinação da penetração retida.

$$PEN_{retida} = \frac{PEN_{final}}{PEN_{inicial}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Onde:

$PEN_{final}$  = Penetração após do ensaio RTFOT;

$PEN_{inicial}$  = Penetração antes do ensaio RTFOT.

### 3.2.6 Caracterização reológica de ligantes asfálticos

Para o estudo do comportamento reológico foram realizados ensaios de viscosidade rotacional seguindo os protocolos ASTM D 4402 (ASTM, 2002) e testes no equipamento de cisalhamento dinâmico DSR, ASTM D 7175 (ASTM 2008), a fim de estudar tanto o comportamento viscoso quanto o elástico por meio do módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e do ângulo de fase ( $\delta$ ) dos ligantes modificados, para diferentes temperaturas de serviço e frequências de solicitação. Com os parâmetros reológicos do DSR determinados em amostras virgens foram construídas as curvas isócronas a fim de avaliar as varrições de  $G^*$  e  $\delta$  ao longo das variações de temperatura. Em seguida, foram construídas as curvas mestras utilizando o modelo matemático sigmoideal, a fim de avaliar a elasticidade e rigidez dos materiais. Finalmente, avaliou-se o comportamento fluência-recuperação sob tensão múltipla MCSR e Varredura de Amplitude Linear (LAS), a fim de determinar a recuperação elástica e as compliances não recuperáveis ( $J_{nr}$ ) e a expectativa de vida de fadiga dos ligante modificados.

#### 3.2.6.1 Viscosidade rotacional

O objetivo do ensaio de viscosidade rotacional é determinar a viscosidade absoluta do ligante asfáltico, definida como a resistência ao cisalhamento interno de um fluido, traduzindo a força necessária para gerar o escoamento entre os pontos de contato das camadas da amostra de ligante asfáltico. A unidade de medida tradicional da viscosidade rotacional é o centipoise (cP), equivalente ao milipascal-segundo. A execução do ensaio segundo a norma ASTM D 4402 (ASTM, 2002) consiste em colocar 8 gramas de ligante asfáltico num molde padronizado, em seguida o molde é colocado no interior da câmara de aquecimento do viscosímetro rotacional, numa temperatura determinada. Após da colocação da amostra é acionado o equipamento e inserido um cilindro maciço com ponta de cone (*spindle*) na amostra em estudo, sendo que o



*spindle* 21 é usado para ligantes asfálticos convencionais, e o *spindle* 27 para asfaltos modificados. Os números de *spindle* correspondem aos diâmetros dos mesmos. Na pesquisa utilizou-se uma faixa de temperaturas compreendendo as temperaturas (135; 140; 145; 150; 155; 160; 165; 170 e 177 °C) para definição da curva de viscosidade *versus* temperatura, sendo que as normas brasileiras consideram unicamente três pontos de controle: 135; 150 e 177 °C. Os resultados podem ser apresentados em escalas logarítmicas; curva LogTemperatura em °Ra (Graus Rankine) *versus* LogViscosidade em cP, a fim de determinar as faixas de temperatura e compactação da mistura asfáltica. A execução do ensaio é apresentada na Figura 3.10.

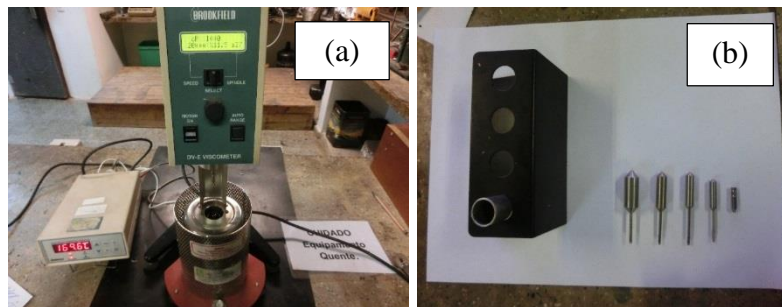


Figura 3.10 Ensaio de viscosidade: (a) colocação da amostra; (b) tamanhos dos *spindles*.

A viscosidade do ligante asfáltico é utilizada para garantir a fluidez necessária para ser bombeado, transportado e misturado com os agregados. Segundo a curva de viscosidade *versus* temperatura são determinadas as faixas de temperatura de usinagem e compactação da mistura asfáltica. Existem parâmetros determinados do ensaio de viscosidade, tais como o Índice Susceptibilidade da Viscosidade à Temperatura SVT que permitem determinar a variação das características reológicas em função da variação da temperatura, assim como também o Número de Viscosidade e Penetração PVN, que relaciona empiricamente os ensaios de viscosidade real, tendo em consideração a densidade real do ligante asfáltico.

O índice Susceptibilidade da Viscosidade à Temperatura SVT é determinado a partir do duplo logaritmo da viscosidade em centistokes e o logaritmo da temperatura em termos absolutos (graus Kelvin), como é apresentado na Equação 3.3.

$$SVT = \frac{\text{Log} \cdot \text{Log}(\text{Viscosidade } T_2) - \text{Log} \cdot \text{Log}(\text{Viscosidade } T_1)}{\text{Log}(T_1) - \text{Log}(T_2)} \quad (3.3)$$

Onde:

$T_1$  = temperatura de referência 1;

$T_2$  = temperatura de referência 2.

Estudou-se as propriedades reológicas utilizando-se o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) de placas paralelas, modelo SmartPave 102 da Anton-paar, a fim de obter os parâmetros de caracterização do asfalto puro e dos asfaltos modificados com fileres alternativos. Em princípio foi determinado o módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ) para diferentes temperaturas, e posteriormente foram confeccionadas as curvas mestras utilizando o modelo Sigmoidal. Finalmente foram realizados os ensaios de Varredura de Amplitude Linear, *Linear Amplitude Sweep* (LAS), conforme a norma da AASHTO TP101 12-UL (AASHTO, 2012) e de fluência e recuperação sob tensão múltipla, *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR) segundo as normas da AASHTO T350 (AASHTO, 2014) e da ASTM D7405 (ASTM, 2010). A Figura 3.11 apresenta o equipamento DSR.

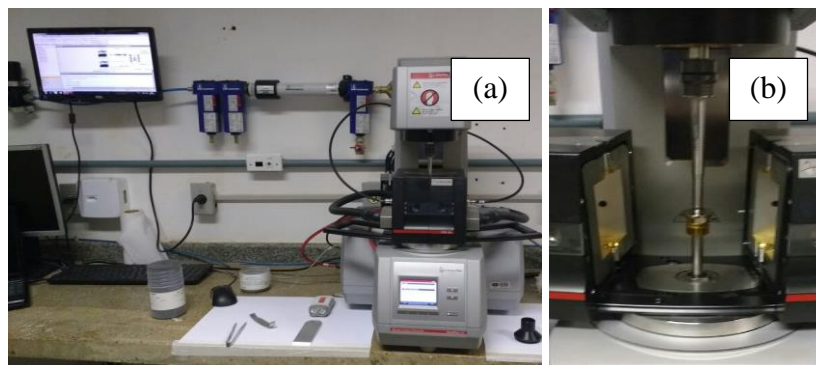


Figura 3.11 Rêometro de cisalhamento dinâmico DSR: (a) Sistema do equipamento; (b) corpo de prova de diâmetro 8 mm.

### 3.2.6.2 Curvas Isocronas

Realizaram-se as curvas Isócronas do ligante asfáltico convencional e modificado com diferentes teores de materiais fileres, através do ensaio *Asphalt Linearity – Anton Paar RheoCompass*. O ensaio consiste em descrever o comportamento reológico do material na região visco-elástica linear em função do módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e do ângulo de fase ( $\delta$ ) a diferentes temperaturas: 40, 46, 52, 58, 64, 70, 76, 82 e 88 °C. O ensaio foi realizado à frequência de 10 rad./s correspondente a 1,59 Hz (ciclos por segundo), equivalente a passagem de tráfego pesado à velocidade de 90 km/hora.

### 3.2.6.3 Curva mestre do ligante asfáltico

A curva mestre descreve o comportamento reológico de um ligante asfáltico através da qual pode-se comparar a influência dos diferentes percentuais e tipos de materiais fileres adicionados ao ligante asfáltico convencional. A curva mestre apresenta a variação da rigidez do ligante asfáltico expressa através do módulo de cisalhamento dinâmico, com a variação da frequência e

da temperatura simultaneamente. A junção da variação da frequência e da temperatura realiza-se através de um modelo matemático o qual considera o princípio da superposição de efeitos (frequência-temperatura). As variações de frequência e de temperatura buscam representar as condições reais de campo, tais como carregamentos provenientes do tráfego e temperaturas as quais estão expostos os revestimentos asfálticos ao longo da vida útil.

Para o procedimento no laboratório da construção das curvas mestras, realizou-se uma amostra de ligante asfáltico virgem, empregando uma geometria de 25 mm de diâmetro e distância entre placas de 1,0 mm. O modo de carregamento no ensaio corresponde a deformação controlada, aplicando uma deformação cisalhante de 0,1 %. A varredura de frequência, varia entre 0,1 e 30 rad/s, e adotou-se as temperaturas de 52, 64, 76 e 88 °C, considerando 52 °C como temperatura de referência para a construção da curva mestre.

Na Literatura existem diferentes modelos matemáticos propostos por diferentes pesquisadores, que descrevem o comportamento visco-elástico de ligantes e misturas asfálticas. Nesta pesquisa, foi adotado modelo sigmoidal (Witczak & Fulton, 2004) incorporado na guia de projeto mecânico-empírico de pavimentos ME PDG da AASTHO (Mello, 2008), expresso segundo a equação 3.4.

$$\text{Log}|G^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta + \gamma \cdot \text{Log}(t_r))} \quad (3.4)$$

Na Equação 3.5,  $G^*$  corresponde ao módulo de cisalhamento obtido diretamente do equipamento ao longo da faixa de frequência. Os coeficientes  $\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ , e  $\gamma$  correspondem a constantes obtidas do material. O tempo reduzido ( $t_r$ ) é definido a partir da equação 3.5.

$$a(T) = \frac{t}{t_r} \quad (3.5)$$

Sendo que ( $t$ ) corresponde ao tempo acumulado em segundo, equivalente ao inverso da frequência em Hz do ensaio. O valor do  $a(T)$  é definido pela expressão 3.6, em função de constantes matemáticas obtidas para cada material.

Outra forma de construção da curva mestre, pode ser utilizando os valores da frequência angular reduzida ( $\omega_r$ ) em [rad/s]. Neste caso, a equação do modelo matemático sigmoidal expressa-se segundo a equação 3.6.

$$\text{Log}|G^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta - \gamma \cdot \text{Log}(\omega_r))} \quad (3.6)$$

Onde o valor da frequência angular reduzida ( $\omega_r$ ) pode ser obtida a partir da equação 3.7.

$$a(T) = \frac{\omega_r}{\omega} \quad (3.7)$$

Para a construção da curva mestre utilizando o tempo reduzido ( $t_r$ ) ou a frequência angular reduzida ( $\omega_r$ ), é preciso determinar o fator de deslocamento das curvas Isóbaras ao modelo sigmoidal. O parâmetro de deslocamento  $a(T)$ , pode ser obtido a partir da equação 3.8.

$$\text{Log}(a(T)) = a.T^2 + b.T + c \quad (3.8)$$

Onde os valores de  $a$ ,  $b$ , e  $c$ , correspondem a constantes matemáticas obtidas para cada material;  $T$  corresponde à temperatura de ensaio (52, 64, 76 e 88 °C), sendo definida 52 °C como temperatura de referência, porém, o logaritmo ( $a(T)$ ) para essa temperatura é nulo.

A solução simultânea das equações anteriores para as quatro temperaturas de estudo nos valores das faixas de frequência, foram realizadas utilizando o complemento solver numa planilha no programa Excel. O Solver determina os coeficientes  $\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $a$ ,  $b$ , e  $c$  do modelo a partir do processo iterativo da solução matemática do modelo, em relação aos valores de módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) obtido do equipamento. A Figura 3.12 apresenta como ilustração os valores das isotermas do  $G^*$  versus frequência reduzida para cada temperatura de ensaio do asfalto puro CAP 50/70.

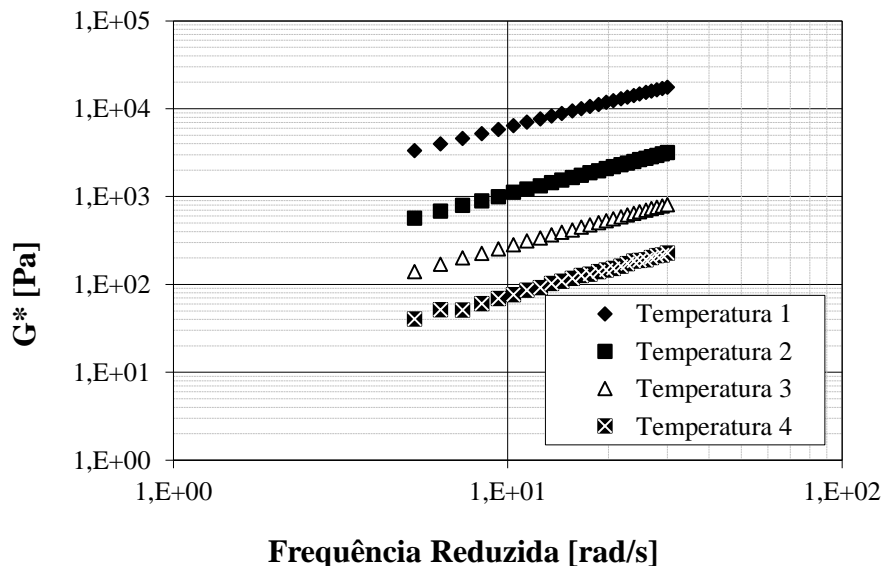


Figura 3.12 Curvas isotermas do CAP 50/70 para as temperaturas de estudo.

Após a solução simultânea no solver, utilizando a frequência reduzida como variável iterativa, foram determinados os parâmetros do modelo sigmoidal. A Tabela 3.6 apresenta os parâmetros do modelo para o caso do CAP 50/70 puro.

Tabela 3.6 Parâmetros do modelo sigmoidal – CAP 50/70

Parâmetros	
delta $\delta$	-6,1461
alpha $\alpha$	16,5498
beta $\beta$	-0,1636
gama $\gamma$	0,2420
a	0,0004
b	-0,1074
c	4,5416

Após a obtenção dos parâmetros do modelo sigmoidal, se procede à construção da curva mestre para um material, tendo em consideração a aplicabilidade da sobreposição dos efeitos frequência – temperatura. A Figura 3.13 apresenta a curva mestre considerando-se o princípio da sobreposição de efeitos temperatura – frequência para o CAP 50/70 puro, através da representação das isóbaras e do modelo sigmoidal.

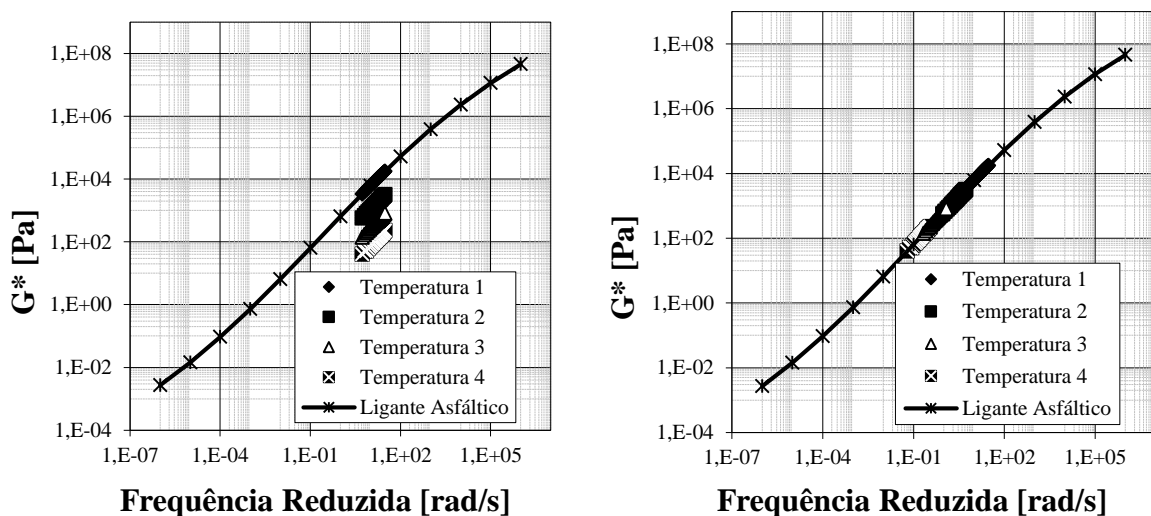


Figura 3.13 Curvas Isóbaras e mestra do CAP 50/70 para as temperaturas de estudo.

A nova tendência da avaliação dos ligantes asfálticos segundo as recentes pesquisas é realizar ensaios de caracterização que envolvam ciclos de carga e descarga, a fim de observar a fadiga e capacidade de recuperação do material. Porém, foram realizados ensaios que instituem as trincas por fadiga e deformação permanente dos ligantes asfálticos modificados devido ao aumento da rigidez. Na pesquisa, o aumento da rigidez dos ligantes asfálticos atribui-se à presença dos

materiais fileres em diferentes proporções. O objetivo dos ensaios foi avaliar e correlacionar o desempenho dos ligantes asfálticos, os ensaios de vida de fadiga e fluência estática das misturas asfálticas em laboratório. Realizaram-se ensaios de Varredura de Amplitude Linear (LAS) e de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR).

#### **3.2.6.4 Fluência e recuperação sob tensão múltipla, (Multiple Stress Creep and Recovery - MSCR)**

Para o ensaio MSCR, utilizou-se amostras de 25 mm de diâmetro condicionadas através do envelhecimento a curto prazo RTOFT. O estudo das amostras envelhecidas avalia o potencial de ocorrência das patologias da mistura asfáltica tais como: trincas por fadiga e afundamento de trilha de roda que surgem após a colocação e compactação da mistura em campo.

No ensaio, aplica-se tensão de cisalhante controlada como modo de carregamento, a fim de determinar as deformações cisalhantes e estabelecer a relação constitutiva. A Figura 3.14 a, apresenta os estágios de solicitações de carregamento aplicados nas magnitudes de 0,1; 1,6 e 3,2 kPa no tempo total de ensaio de 100 segundos. A Figura 3.14 b apresenta as deformações cisalhantes, obtidas das respostas das solicitações impostas no ensaio. Para o tempo total de ensaio, aplicam-se 10 ciclos de carregamento e descarregamento através de uma função *haversiana*, composta por 10% de carregamento e 90% de descarregamento.

Na fase do carregamento, é possível determinar a relação tensão - deformação cisalhante e a função *compliance* para cada estágio de carga. A relação constitutiva *compliance* ou *compliances* não recuperáveis, definida como o parâmetro reológico *Jnr*, é obtida a partir das deformações elásticas e plásticas do material em cada ciclo de fluência e recuperação. Na fase de descarregamento é possível determinar o percentual de recuperação do material, obtido entre os ciclos de carga e descarga.

Adicionalmente aos resultados da recuperação elástica e a *compliance* não recuperável obtidos no ensaio MSCR, determina-se por recomendação da AASHTO MP 19 (AASHTO, 2010) a diferença percentual entre as *compliances* não recuperáveis de 100 Pa e 3200 Pa (*Jnr diff*), a fim de analisar a sensibilidade à diferença de tensões sob elevada temperatura. Os valores recomendados devem ser inferiores a 75%.

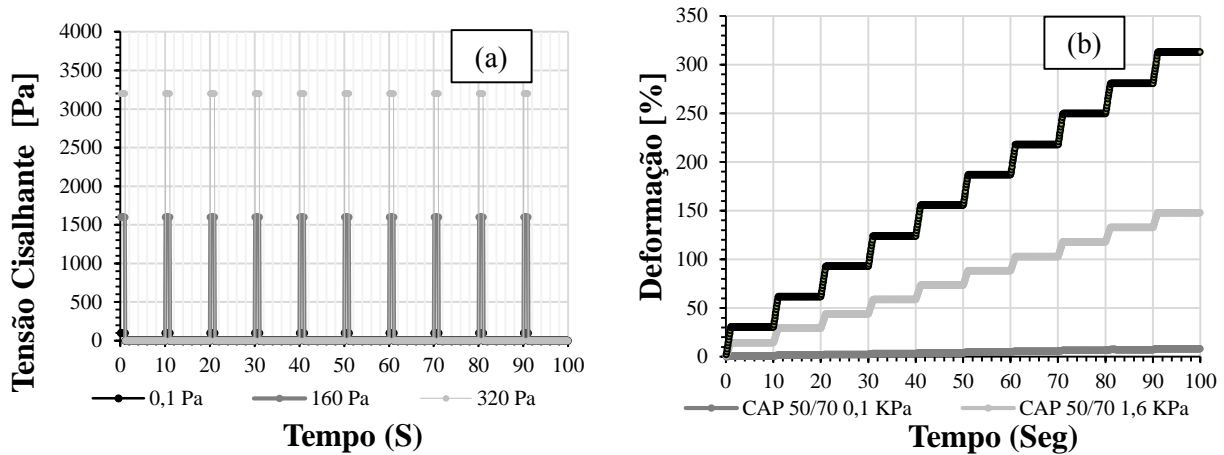


Figura 3.14 Tensão e deformação cisalhante para os ciclos de carga de 0.1kPa; 160 kPa; 320 kPa - ensaio MSCR.

### 3.2.6.5 Ensaio de varredura de amplitude linear (LAS)

Com o intuito de explorar as características de fadiga dos ligantes asfálticos foram feitos ensaios no DSR de Varredura de Amplitude Linear (LAS) à temperatura de 25 °C, com amostras envelhecidas a curto prazo de 8 mm de diâmetro e 2 mm de espaçamento entre as placas, segundo os protocolos da norma AASTHO TP101 (AASTHO, 2014). O ensaio proposto considera duas fases (Johnson, 2010). A primeira fase se desenvolve na região de viscoelasticidade linear nas condições de deformação controlada (0,1%), obtendo os parâmetros de módulo ( $G^*$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ) na varredura de frequência de 0,2 Hz a 30 Hz. Na segunda fase aplica-se um incremento linear de deformação entre 0 e 30% ao longo de 3.100 ciclos de carga em 300 segundos, na frequência constante de 10 Hz, a fim de obter para cada 10 ciclos, os máximos valores de tensão e deformação cisalhante juntamente com os parâmetros  $G^*$  e  $\delta$ . Os resultados obtidos nas duas fases, varredura de frequência e amplitude de deformação, são utilizados no modelo de fadiga proposto por Johnson (2010) através da equação 3.9 e Figura 3.15, através da planilha no *Excel* disponibilizada por Hintz, (2012).

$$N_f = A(\gamma_{m\acute{a}x})^B \quad (3.9)$$

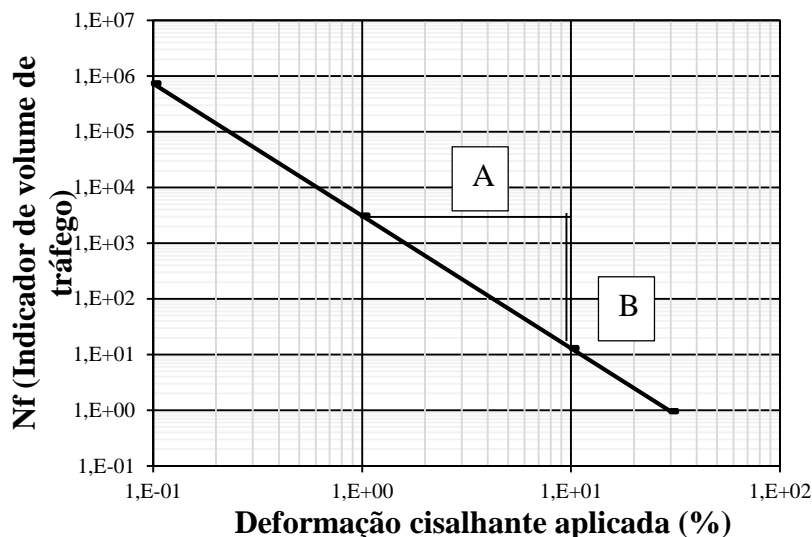


Figura 3.15 Modelo de vida de fadiga (Johnson, 2010).

Onde os coeficientes A e B dependem das características do material,  $\gamma_{\text{máx}}$  é deformação máxima do revestimento do pavimento. Johnson (2010) apresenta as formulações e exemplos matemáticos para a determinação dos anteriores parâmetros.

### 3.3 AGREGADOS PETREOS PARA MISTURAS ASFALTICAS

Os agregados pétreos das frações graúda, miúda e material fíler usados nas misturas asfálticas são provenientes da pedra Brical Indústria Comércio e Mineração do Distrito Federal e são oriundos de rochas metamórficas de origem calcária. Os agregados das misturas asfálticas densas e abertas compostas por esses materiais se enquadraram nas especificações do DNIT 031 (DNIT, 2006) obedecendo aos requisitos para a fabricação de concretos asfálticos para pavimentos flexíveis. A Tabela 3.7 apresenta os resultados dos ensaios realizados.

Tabela 3.7 Ensaios de caracterização dos agregados

Ensaio	Norma de ensaio	Unidade	Especificação	Obtido
Equivalente de Areia	DNIT 054/97	%	mín 55	66
Abrasão Los Angeles	DNIT 035/98	%	máx. 50	23
Índice de Forma	DNIT 086/94	IF	> 0,5	0,7
Durabilidade	DNIT 089/94	%	12	7
Adesividade do agregado ao betume	DNIT 078/94	Qualitativa	Satisfatória	Satisfatória
Massa específica na condição seca	DNIT 195/97	g/cm <sup>3</sup>	----	2,64
Massa específica na condição saturada superfície seca	DNIT 195/97	g/cm <sup>3</sup>	----	2,59
Absorção	DNIT 195/97	%	----	0,80
Densidade Real - Agregado miúdo	DNIT 084/95	----	----	2,600
Massa específica dos grãos - fíler	DNIT 085/94	g/cm <sup>3</sup>	----	2,719



### 3.4 DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

As dosagens para as misturas asfálticas CBUQ e CPA de referência com o ligante asfáltico CAP 50/70 e as misturas estudadas com os asfaltos modificados com elastômeros (AB8 e AB CB) e fíleres (Cal, RMF e Lodo de ETA) foram realizadas a fim de determinar as características volumétricas, os parâmetros de resistência mecânica à ação de carga monotônica e os teores ótimos de ligante asfáltico. Para fins de identificação das misturas estudadas foi utilizada a nomenclatura apresentada na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 Tipos de misturas asfálticas com ligantes modificados com elastômeros e fíleres.

Misturas asfálticas densas			Misturas asfálticas contínuas ou drenantes		
Tipo	Gradação	Ligante asfáltico	Tipo	Gradação	Ligante asfáltico
1	CBUQ	CAP 50/70	7	CPA	CAP 50/70
2	CBUQ	LA – AB8	8	CPA	LA – AB8
3	CBUQ	LA – AB CB22	9	CPA	LA – AB CB22
4	CBUQ	LA – CAL	10	CPA	LA – CAL
5	CBUQ	LA – RMF	11	CPA	LA – RMF
6	CBUQ	LA – Lodo de ETA	12	CPA	LA – Lodo de ETA

#### 3.4.1 Misturas de Concreto Betuminoso Usinado a Quente CBUQ

O ensaio Marshall das misturas densas tipo CBUQ foram realizadas com os protocolos da especificação brasileira do DNIT 031 (DNIT, 2006). A granulometria selecionada corresponde ao valor médio da faixa tipo C apresentada na Tabela 3.9 e na Figura 3.16. O concreto asfáltico foi estudado para ser utilizado como camada de rolamento ou de ligação. Para determinar o teor ótimo de ligante asfáltico partiu-se de um “teor provável (T, em %)” obtido a partir do método da superfície específica proposto por Duriez, STP1147 (STP 1992) como apresenta-se na Tabela 3.10. Foram separados cinco grupos de teor de asfalto sendo dois acima e dois abaixo do valor estabelecido ( $T \pm 0,5\%$  e  $T \pm 1,0$ ). Para cada teor de asfalto foram moldados três corpos de prova e determinados os parâmetros volumétricos específicos para estabelecer o teor ótimo segundo as especificações.

Tabela 3.9 Faixa granulométrica tipo C - DNIT 031 (DNIT, 2006).

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando.			% Massa retenida	% Massa retenida acumulada
Série	Abertura	Faixa C				
ASTM	(mm)	min	max	Media		
3/4"	19,1	100,0	100,0	100,0	0,0	
1/2"	12,7	80,0	100,0	90,0	10,0	10,0
3/8"	9,5	70,0	90,0	80,0	10,0	20,0
N 4	4,8	44,0	72,0	58,0	22,0	42,0
N 10	2,0	22,0	50,0	36,0	22,0	64,0
N 40	0,4	8,0	26,0	17,0	19,0	83,0
N 80	0,2	4,0	16,0	10,0	7,0	90,0
N 200	0,1	2,0	10,0	6,0	4,0	94,0
				0,0	6,0	100,0

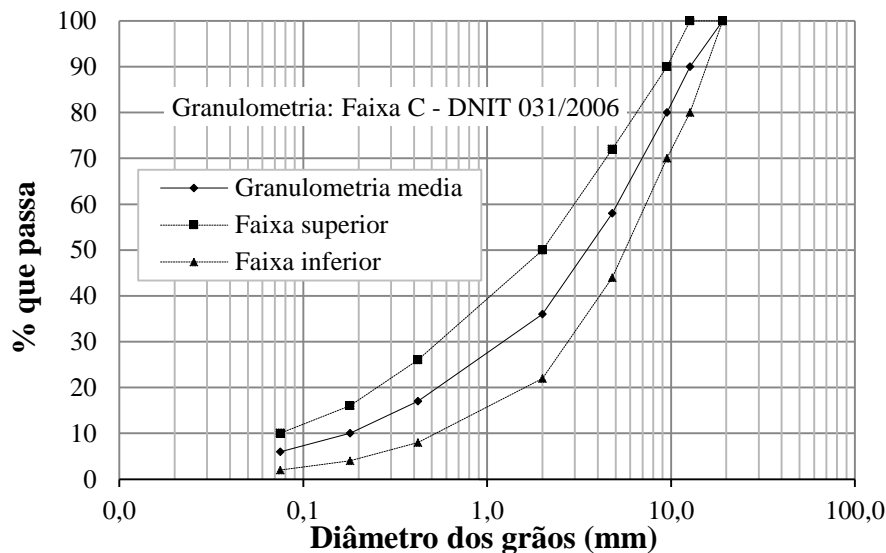


Figura 3.16 Faixa granulométrica C – DNIT 031 (DNIT 2006).

Para a determinação do teor ótimo teórico de asfalto, calcula-se a superfície específica de cada fração da granulometria, segundo a Equação 3.10.

$$S_e i = \frac{6}{G_s * \varnothing_{medio(i)}} \quad (3.10)$$

Onde:

$G_s$  = densidade correspondente aos grãos de cada fração (gráudos, miúdos ou fíler);

$\varnothing_{medio(i)}$  = diâmetro médio dos grãos de cada fração (i).

O diâmetro médio foi calculado utilizando a média geométrica das partículas entre cada fração granulométrica, corresponde a fato da granulometria estar em escala logarítmica. Após determinar

a superfície específica de cada fração ( $S_{ei}$ ), determinou-se superfície específica ponderada da granulometria da mistura, utilizando-se a Equação 3.11.

$$S_{eponderada} = (\% \text{Massa}_{\text{retida}})(S_e i) \quad (3.11)$$

Finalmente, o teor ótimo de asfalto teórico foi determinado pela equação 3.12.

$$T = k(S_e)^{0,2} \quad (3.12)$$

Onde:

T: Teor ótimo de asfalto teórico (%);

k: módulo de riqueza (função da mistura asfáltica);

Se: Somatória das  $S_{ei}$  das frações da granulométricas.

A Tabela 3.10 indica os cálculos para a determinação do teor ótimo de asfalto teórico, correspondente à mistura CBUQ.

Tabela 3.10 Cálculo do Teor ótimo de asfalto teórico da mistura CBUQ.

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando.			Massa retenida	Diâmetro médio	Gs (g/cm <sup>3</sup> )	Sei	Se ponderada	Módulo de riqueza: k	Teor de asfalto (%)
Série	Abertura	DNIT 031 (DNIT, 2006)									
ASTM	(mm)	min	max	Media	%	(mm)	(g/cm <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> /Kg)	(m <sup>2</sup> /Kg)		
3/4"	19,1	100,0	100,0	100,0						3,75	4,9
1/2"	12,7	80,0	100,0	90,0	10,0	15,575	2,642	0,146	0,015		
3/8"	9,5	70,0	90,0	80,0	10,0	10,984	2,642	0,207	0,021		
N 4	4,8	44,0	72,0	58,0	22,0	6,753	2,598	0,342	0,075		
N 10	2,0	22,0	50,0	36,0	22,0	3,098	2,598	0,745	0,164		
N 40	0,4	8,0	26,0	17,0	19,0	0,917	2,598	2,520	0,479		
N 80	0,2	4,0	16,0	10,0	7,0	0,275	2,598	8,399	0,588		
N 200	0,1	2,0	10,0	6,0	4,0	0,116	2,598	19,877	0,795		
				0,0	6,0	0,075	2,719	29,423	1,765		
								Total	3,902		

A Tabela 3.11 apresenta o traço granulométrico correspondente à um corpo de prova Marshall de massa total igual a 1200 gramas e com uma faixa de 4% a 6% de CAP 50/70 puro, utilizando a granulometria média da especificação para a faixa C do CBUQ.

Tabela 3.11 Traço granulométrico da mistura CBUQ na faixa de 4 a 6% de ligante asfáltico.

Teor de asfalto (%)		4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Quantidade total de mistura (g)		1200	1200	1200	1200	1200
Fração Granulométrica	%	g	g	g	g	g
3/4" - 1/2"	10	115,2	114,6	114	113,4	112,8
1/2" - 3/8"	10	115,2	114,6	114	113,4	112,8
3/8" - N4	22	253,4	252,1	250,8	249,5	248,2
N4 - N10	22	253,4	252,1	250,8	249,5	248,2
N10 - N40	19	218,9	217,7	216,6	215,5	214,3
N40 - N80	7	80,6	80,2	79,8	79,4	79
N80 - N200	4	46,1	45,8	45,6	45,4	45,1
N200 - Fundo	6	69,1	68,8	68,4	68	67,7
Ligante Asfáltico		48	54	60	66	72
Total (g)	100	1200	1200	1200	1200	1200

Após a moldagem dos 15 corpos de prova para a dosagem Marshall, determinou-se as características volumétricas tais como: densidade aparente (d); Densidade Máxima Teórica (DMT); Volume de vazios (Vv); Volume de Agregado Mineral (VAM); Relação Betume Vazios (RBV).

O cálculo matemático para a determinação da densidade aparente compacta foi realizada considerando o método da balança hidrostática, tendo em consideração o princípio físico de Arquimedes, o cálculo foi determinado pela Equação 3.13.

$$d = \frac{M_s}{M_s - M_{sub}} \cdot 100 \quad (3.13)$$

Onde:

d = densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>);

M<sub>s</sub> = massa da amostra seco ao ar (g);

M<sub>sub</sub> = massa submersa da amostra (g/cm<sup>3</sup>).

A determinação da Densidade Máxima Teórica (DMT) foi determinada matematicamente pela Equação 3.14 tendo em consideração os percentuais e densidades aparentes das frações dos materiais compondo a mistura. Foram verificados alguns pontos de densidade real dos grãos, através da densidade rice.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\% ag}{d_{ag}} + \frac{\% am}{d_{am}} + \frac{\% f}{d_f} + \frac{\% la}{d_{la}}} \cdot 100 \quad (3.14)$$

Onde: %ag; %am; %f; %la = Porcentagens de agregado: gráudo; miúdo; fíler e ligante asfáltico (%); dag; dam; df; dla = Masa específica real da massa dos grãos do agregado gráudo; miúdo; fíler e ligante asfáltico (g/cm<sup>3</sup>).

Para a determinação do Volume de vazios (V<sub>v</sub>) da mistura utilizou-se os parâmetros da Densidade Máxima Teórica (DMT) que considera a densidade real dos materiais sem considerar os vazios da mistura, e a densidade aparente (d) que considera os vazios de ar presente na mistura. Matematicamente, o cálculo foi feito usando a equação 3.15.

$$V_v = \frac{DMT - d}{DMT} \cdot 100 \quad (3.15)$$

Onde:

d = densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>);

DMT = Densidade Máxima Teórica (g/cm<sup>3</sup>).

A determinação dos Vazios Com Betume VCB foi realizada com a Equação 3.16.

$$VCB = \frac{d \cdot \%CAP}{d_{CAP}} \quad (3.16)$$

Onde:

%CAP: percentagem de ligante asfáltico da mistura (%);

d<sub>CAP</sub>: densidade relativa do ligante asfáltico (g/cm<sup>3</sup>).

Os Vazios do Agregado Mineral VAM corresponde a somatória do volume de vazios da mistura com o volume de ligante asfáltico foram determinados pela Equação 3.17.

$$\%VAM = V_v + V_{CAP} \quad (3.17)$$

Onde:

V<sub>v</sub>: volume ocupado pelos vazios na mistura (cm<sup>3</sup>);

V<sub>CAP</sub>: volume ocupado pelo ligante asfáltico na mistura (cm<sup>3</sup>).

Finalmente a partir da Equação 3.18 se determinou a Relação Betume Vazios RBV.

$$RBV = \frac{\%V_b}{\%VAM} \cdot 100 \quad (3.18)$$

V<sub>b</sub>: volume ocupado pelo betume na mistura (cm<sup>3</sup>).

No caso das misturas CBUQ foram avaliados os parâmetros mecânicos sob carga monotônica tais como estabilidade, fluência e relação estabilidade/fluência Marshall. Informações adicionais

destes parâmetros serão apresentadas no Item 3.5.2. Finalmente, foi determinado o teor ótimo de ligante asfáltico segundo as especificações DNIT 031 (DNIT, 2006) apresentadas na Tabela 3.12.

Tabela 3.12. Especificações de Concreto Asfáltico CBUQ –DNIT 031 (DNIT, 2006).

Características	Método de ensaio	Camada de Rolamento	Camada de ligação (Binder)
Porcentagem de vazios (%)	DNIT-1995	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNIT-1995	75 - 82	65 - 72
Estabilidade, mínima, (kgf) (75 golpes)	DNIT-1955	500	500
Resistência à tração por compressão diametral estática a 25°C, mínima, MPa	DNIT-2009	0,65	0,65

A Figura 3.17 apresenta a sequência da confecção dos corpos de prova no ensaio Marshall.

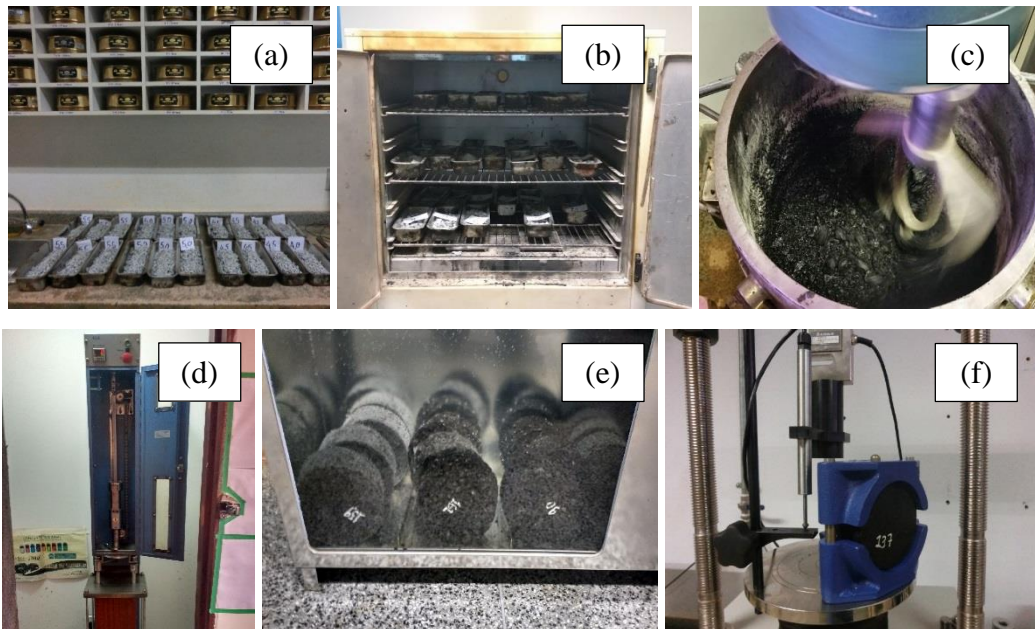


Figura 3.17 Metodologia Marshall: (a) quantidades das frações dos agregados; (b) aquecimento dos materiais; (c) mistura dos materiais – usinagem; (d) compactação do corpo de prova; (e) pré-condicionamento das amostras; (f) determinação da Estabilidade e Fluência Marshall.

### 3.4.2 Camada Porosa de Atrito CPA

Para a dosagem da mistura asfáltica drenante ou Camada Porosa de Atrito (CPA), a curva granulométrica a ser adotada foi definida segundo a especificação DNIT 389 (DNIT, 1999). Nesta pesquisa, optou-se por trabalhar com o valor médio da faixa granulométrica tipo V como se apresenta na Tabela 3.13 e na Figura 3.18.

Tabela 3.13 Faixa granulométrica tipo V - DNIT 386 (DNIT, 1999).

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando.			% Massa retida	% Massa retida acumulado
Série	Abertura	Faixa V				
ASTM	(mm)	min	max	Media		
3/4"	19,1	100,0	100,0	100,0		
1/2"	12,7	70,0	100,0	85,0	15,0	15,0
3/8"	9,5	50,0	80,0	65,0	20,0	35,0
N 4	4,8	18,0	30,0	24,0	41,0	76,0
N 10	2,0	10,0	22,0	16,0	8,0	84,0
N 40	0,4	6,0	13,0	9,5	6,5	90,5
N 200	0,1	3,0	6,0	4,5	5,5	95,5
					4,5	100,0

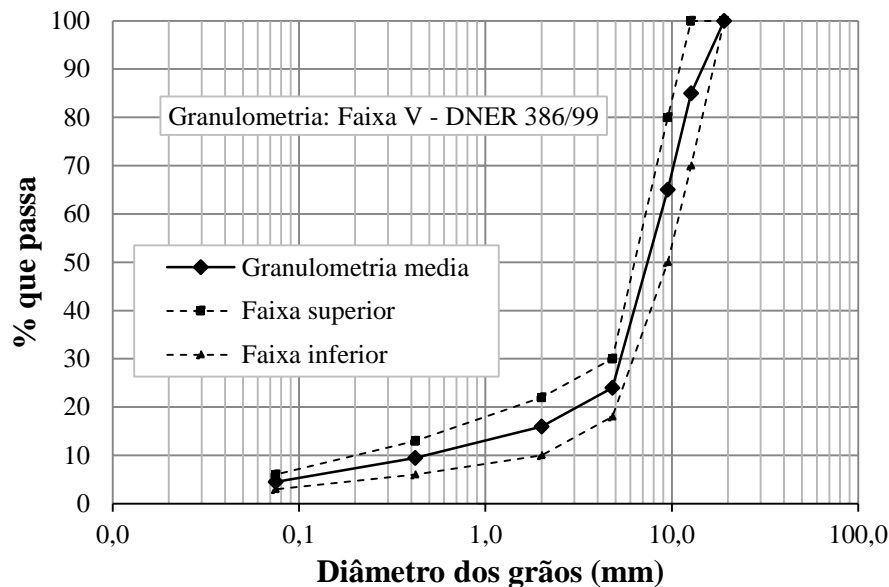


Figura 3.18 Faixa granulométrica tipo V - DNIT 386 (DNIT, 1999).

A escolha da granulometria fundamentou-se nas pesquisas feitas pela Universidade de Brasília utilizando agregado calcário. Diferentes pesquisas (Oliveira, 2003; Roseno, 2005; Souza, 2010) trabalharam com as faixas granulométricas IV e V. No entanto, as misturas asfálticas que apresentaram melhor desempenho mecânico, por possuírem uma granulometria mais densa, foram confeccionadas com a curva granulométrica V. A Tabela 3.14 apresenta o traço granulométrico correspondente à quantidade de material de um corpo de prova Marshall de massa total de 1000 gramas para os diferentes teores de CAP 50/70.

Tabela 3.14 Traço granulométrico da mistura CPA na faixa de 4 a 6% de ligante asfáltico.

Teor provável de asfalto (%)		3	4,5	5	5,5	6
Quantidade total de mistura (g)		1000	1000	1000	1000	1000
Fração Granulométrica	%	g	g	g	g	g
3/4" - 1/2"	15	145,5	143,3	142,5	141,8	141
1/2" - 3/8"	20	194	191	190	189	188
3/8" - N4	41	397,7	391,6	389,5	387,5	385,4
N4 - N10	8	77,6	76,4	76	75,6	75,2
N10 - N40	6,5	63,1	62,1	61,8	61,4	61,1
N40 - N200	5	48,5	47,8	47,5	47,3	47
N200 - Fundo	4,5	43,7	43	42,8	42,5	42,3
Ligante Asfáltico		30	45	50	55	60
Total (g)	100	1000	1000	1000	1000	1000

Para a determinação do teor ótimo de asfalto teórico realizou-se o mesmo procedimento utilizado na mistura CBUQ, conforme apresentado no item 3.4.1. A Tabela 3.15 indica os cálculos do teor ótimo de asfalto teórico para as misturas CPA.

Tabela 3.15 Cálculo do teor ótimo de asfalto teórico da mistura CPA.

Peneira de malha		% em massa, passando.			Massa retida	Diâmetro médio	Gs	S	Se ponderada	Módulo de riqueza: k	Teor de asfalto (%)	
Série	Abertura	DNER 386 (DNER, 1999)										
ASTM	(mm)	mín	máx	Média	%	(mm)	(g/cm <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> /Kg)	(m <sup>2</sup> /Kg)			
3/4"	19,1	100,0	100,0	100,0						3,5	4,2	
1/2"	12,7	70,0	100,0	85,0	15,0	15,575	2,642	0,146	0,022			
3/8"	9,5	50,0	80,0	65,0	20,0	10,984	2,642	0,207	0,041			
N 4	4,8	18,0	30,0	24,0	41,0	6,753	2,598	0,342	0,140			
N 10	2,0	10,0	22,0	16,0	8,0	3,098	2,598	0,745	0,060			
N 40	0,4	6,0	13,0	9,5	6,5	0,917	2,598	2,520	0,164			
N 200	0,1	3,0	6,0	4,5	5,0	0,177	2,598	13,012	0,651			
				0,0	4,5	0,075	2,719	29,423	1,324			
									Total	2,401		

Após a confecção dos corpos de prova segundo a norma DNIT 043 (DNIT, 1995) determinou-se as características volumétricas como o volume de vazios. A Figura 3.19 apresenta o esquema dos tipos de vazios existentes nas misturas asfálticas CPA.



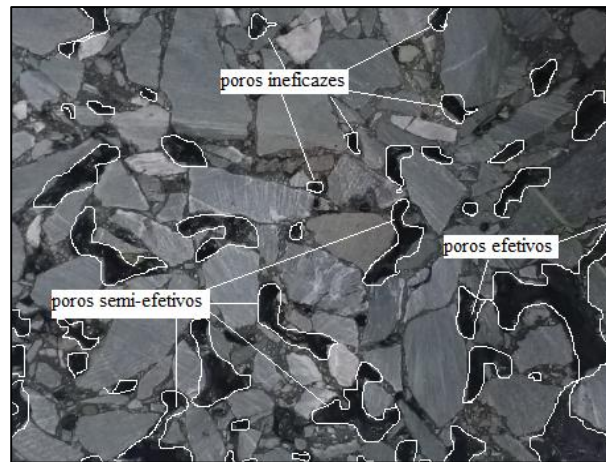


Figura 3.19 Esquema do volume de vazios na camada porosa de atrito CPA.

O volume de vazios total da mistura CPA, corresponde à somatória dos seguintes tipos de vazios:

- vazios comunicantes ou efetivos: permitem a passagem e armazenagem de água;
- vazios semi-efetivos: permitem o armazenamento de água e não contribuem para a passagem;
- vazios ineficazes: não permitem o armazenamento nem a passagem de água.

Os cálculos matemáticos para a determinação da percentagem de vazios totais (comunicantes; semi-efetivos; e ineficazes) foram realizados pela Equação 3.19.

$$V_v = \frac{DMT - d}{DMT} \cdot 100 \quad (3.19)$$

Onde:

DMT = Densidade Máxima Teórica (g/cm<sup>3</sup>);

d = densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>).

Onde a Densidade Máxima Teórica (DMT) foi determinada usando-se a equação 3.15.

A densidade aparente (d) considera os vazios da mistura compactada, salienta-se, porém, que se utilizou na sua determinação filme de PVC de densidade real 0,47 g/cm<sup>3</sup> e não parafina para como contempla a norma DNIT 117 (DNIT, 1994) para a proteção do corpo de prova contra a entrada de água no seu interior. O cálculo matemático foi feito por meio da Equação 3.20.

$$d = \frac{Ma}{Maf - Mi - \frac{Mf}{df}} \cdot 100 \quad (3.20)$$

Onde:

Ma = Peso do corpo de prova seco ao ar (g);

$M_{af}$  = Peso do corpo de prova seco ao ar + filme de PVC (g)

$M_i$  = Peso do corpo de prova seco ao ar + filme de PVC imersos na água (g)

$M_f$  = Peso do filme de PVC ( $M_{af} - M_a$ ) (g)

$d_f$  = Peso específico do filme de PVC (0,47 g/cm<sup>3</sup>)

A Figura 3.20 apresenta a sequência do ensaio para a determinação da densidade aparente dos corpos de prova utilizando o filme de PVC.



Figura 3.20 Determinação da densidade aparente: (a) colocação do filme de PVC no corpo de prova; (b) corpos de prova com e sem filme de PVC.

Para a determinação do volume de vazios comunicantes, realizou-se a medição da geometria de cada corpo de prova (diâmetro e altura), a fim de calcular matematicamente o volume dos materiais constituintes da mistura e os volumes de vazios ( $V_v$ ). Foram determinados os pesos secos ao ar e submerso na água após de mergulhá-lo por um minuto, a fim de determinar o volume dos materiais constituintes da mistura e os vazios não comunicantes ( $V_m$ ). O cálculo matemático do volume de vazios comunicantes foi realizado utilizando-se a equação 3.21 e 3.22.

$$V_{vc} = \frac{V - V_a}{V} \cdot 100 \quad (3.21)$$

Onde:

$V_{vc}$  = Volume de vazios comunicantes (%);

$V$  = Volume geométrico (cm<sup>3</sup>);

$V_a$  = Volume dos materiais constituintes da mistura + vazios ineficazes (cm<sup>3</sup>).

$$V_a = \frac{M - M_i}{d_{\text{água}}} \cdot 100 \quad (3.22)$$

Onde:

$V_a$  = Volume dos materiais constituintes da mistura + vazios ineficazes (cm<sup>3</sup>);

$M$  = Massa do corpo de prova ao ar (g);

$M_i$  = Massa do corpo de prova imerso em água após mergulhá-lo por um minuto (g);

$d_{\text{água}}$  = densidade da água (g/cm<sup>3</sup>).

Após determinar as características volumétricas dos corpos de prova das misturas CPA, procedeu-se à determinação do comportamento mecânico dos corpos de prova sob a ação da carga monotônica por meio do ensaio de resistência à tração. Em seguida avaliou-se o desgaste à abrasão por meio do ensaio Cântabro. Informações adicionais desses ensaios serão apresentadas nos itens 3.5.1 e 3.5.7 respectivamente. Finalmente, avaliou-se as características e parâmetros de dosagem, a fim determinar o teor ótimo de ligante asfáltico segundo as especificações DNIT 383 (DNIT, 1999) mostradas na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 Especificações exigidas CPA –DNIT 383 (DNIT, 1999).

Caraterísticas	Especificações exigidas	Norma Base
Percentagem de vazios	18 a 25%	DNIT 117(DNIT, 1994)
Desgaste Cântabro	< 25 %	DNIT 383 (DNIT, 1999)
Resistência à tração por compressão diametral a 25 °C	> 0,55 Mpa	DNIT 136 (DNIT, 2011)

### 3.5 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

O estudo das propriedades mecânicas e de adesividade das misturas asfálticas analisadas foi realizado segundo as especificações vigentes apresentadas na Tabela 3.17 e na Figura 3.21.

Tabela 3.17 Ensaios de caracterização mecânica de misturas asfálticas.

Caracterização	Ensaio	Norma	Objetivo
Convencionais	Estabilidade e fluência Marshall	(DNIT, 1995)	Determinação dos parâmetros de solicitação à carga monotônica, e dosagem das misturas asfálticas.
Módulo	Módulo de resiliência	(DNIT, 2009)	Conhecer a relação tensão-deformação dos materiais em conjunto, e determinar a rigidez dos materiais.
Ruptura	Resistência à tração indireta	(DNIT, 1994)	Levar o material ao estado de ruptura por meio de carregamentos monotônicos e dinâmicos respectivamente.
	Vida de Fadiga		
Deformação permanente	Creep estático	(ASTM, 2008)	Determinar as deformações permanentes que acontecem pelas combinações do fluxo de material (viscoelástico ou viscoplástico, as quais levam à formação e geração de trincas.
Adesividade	Resistência ao dano por umidade induzida	(ASTM, 2007)	Conhecer a adesividade entre o material asfáltico e os materiais granulares, envolvendo ensaios mecânicos.
	Cântabro	(DNIT, 1999)	

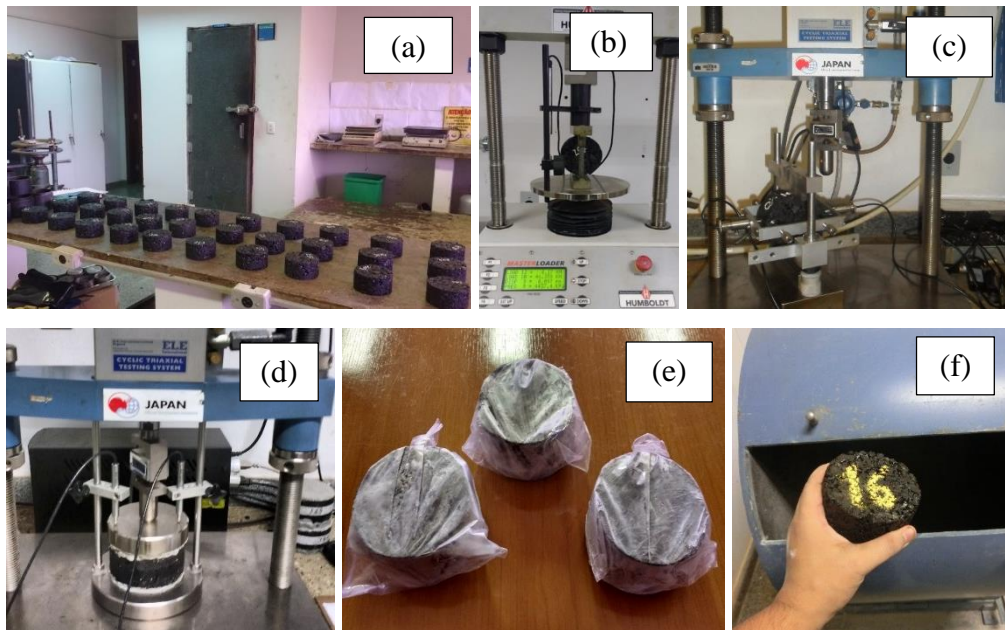


Figura 3.21 Ensaios de comportamento mecânico: (a) corpos de prova; (b) resistência à tração por compressão diametral; (c) módulo de resiliência; (d) creep estático; (e) acondicionamento de amostras no ensaio *Lottaman Modificado*; (f) resistência à abrasão Cântabro.

Os itens seguintes irão descrever as sequencias e metodologias dos ensaios mecânicos, indicando as considerações e tipos de análises desenvolvidas para sua apresentação dos resultados.

### 3.5.1 Resistência à tração por compressão diametral - RT

A forma de ruptura dos revestimentos asfálticos nos pavimentos ocorre pela tração à compressão na face inferior da espessura da camada ante a solicitação de carregamentos provenientes do tráfego. O ensaio de resistência à tração RT comumente conhecido como o ensaio Brasileiro foi desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro em 1953 na cidade do Rio de Janeiro. O ensaio RT surgiu pela observação do deslocamento de uma estrutura histórica para a implantação de uma obra rodoviária. Durante o deslocamento da estrutura utilizou-se uns cilindros metálicos solicitados diametralmente pelas tensões geradas pelo peso da estrutura, conseqüentemente o ensaio foi implantado para determinar a resistência à tração dos materiais quando é aplicado um carregamento diametral de compressão, especialmente das misturas asfálticas. No Brasil o ensaio é regulado pela especificação DNIT 138 (DNIT, 1994) e tem por objetivo determinar a tensão máxima de ruptura da mistura asfáltica. Nas metodologias de dosagem de misturas densas e drenantes introduziram-se os valores mínimos de 0,65 MPa e 0,55 MPa respectivamente, a fim de evitar a separação dos grãos e possíveis patologias no revestimento asfáltico.

A metodologia do ensaio consiste na aplicação de um carregamento sobre um corpo de prova Marshall solicitado diametralmente no estado plano de deformação na temperatura de 25 °C. A aplicação do carregamento foi realizada à velocidade de 50 mm/s e determinou-se os deslocamentos verticais, que podem ser entendidos como diminuições de diâmetro. A Figura 3.22 apresenta a execução do ensaio de laboratório em misturas asfálticas, enquanto a Figura 3.23 apresenta os resultados da curva de carga *versus* deslocamento obtida no ensaio de RT.

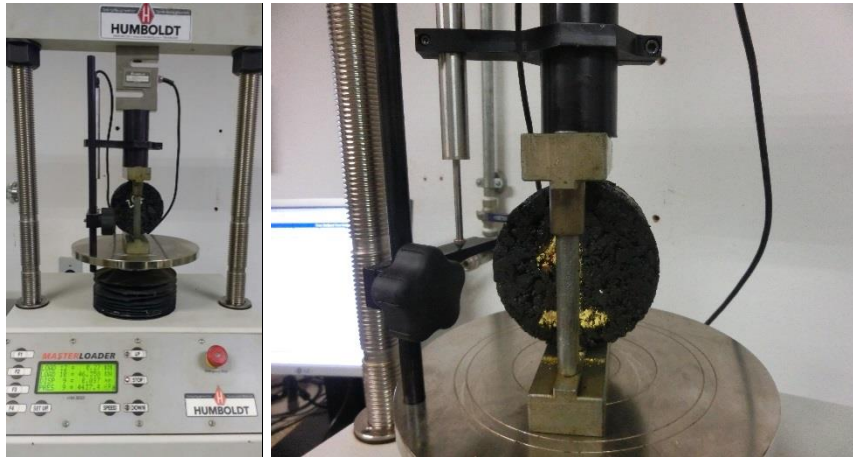


Figura 3.22 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral – Ensaio Brasileiro.

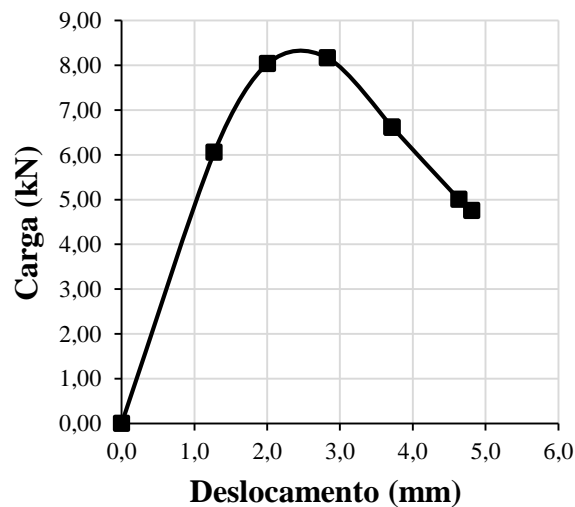


Figura 3.23 Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

A Figura 3.23 apresenta o valor da carga máxima e deslocamento na ruptura do material. A resistência à tração pode ser determinada por meio da Equação 3.23.

$$RT = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (3.23)$$

Onde:

RT: Resistência à tração, MPa;

P: Carga máxima de ruptura, N;

D: Diâmetro do corpo de prova, cm;

H: Altura do corpo de prova, cm.

### 3.5.2 Estabilidade e fluência Marshall

A estabilidade e fluência Marshall são determinadas sob ação da carga monotônica. A estabilidade Marshall pode ser considerada como o indicador de resistência à deformação permanente em climas de elevada temperatura. Misturas asfálticas com elevados teores de asfalto podem estar susceptíveis à ocorrência de deformações permanentes pelo afundamento de trilhas de roda, enquanto que misturas asfálticas com baixos teores de ligante asfáltico podem estar susceptíveis à ocorrência de trincas por fadiga (Bernucci *et al.*, 2008). O ensaio de Estabilidade e fluência Marshall foi desenvolvido pelo engenheiro Bruce Marshall nos anos de 1940 e aperfeiçoado no decorrer da segunda guerra mundial. O ensaio Marshall surgiu como ajuda na determinação das proporções dos materiais constituintes das camadas dos revestimentos das pistas de pouso e decolagem das aeronaves usadas nas guerras. No Brasil o ensaio é regulado pela especificação DNIT 043 (DNIT, 1995) e tem por objetivo determinar a resistência máxima à compressão radial e a deformação total apresentada pelo corpo de prova desde a aplicação da carga inicial nula até a carga máxima de ruptura. A especificação de dosagem de misturas asfálticas CBUQ DNIT 043 (DNIT, 2006) contempla um valor mínimo de 500 kgf para uma energia de compactação de 75 golpes em cada fase.

A metodologia do ensaio consiste na aplicação de um carregamento sobre um corpo de prova solicitado diametralmente no estado plano de tensão e apresentando temperatura de 60 °C atingida mediante um banho maria. A aplicação do carregamento foi realizada em uma prensa com velocidade de carregamento igual a 48 mm/s. Determinou-se a força de ruptura e o deslocamento vertical correspondente, entendido como a fluência Marshall. A Figura 3.24 ilustra a execução do ensaio.

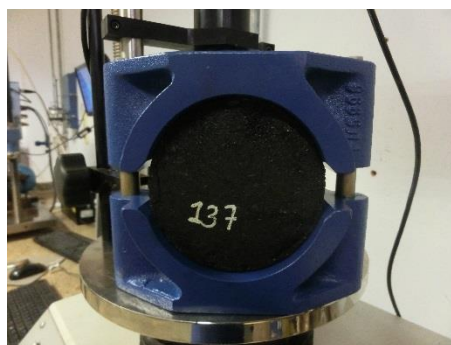


Figura 3.24 Ensaio de estabilidade e fluência Marshall.

### 3.5.3 Módulo de resiliência

O módulo de resiliência é um parâmetro importante no dimensionamento de estruturas de pavimento, e possibilita compatibilizar as solicitações e as respostas das camadas inferiores, por meio da rigidez. O ensaio de módulo de resiliência no Brasil é regulado pela especificação DNIT 133 (DNIT, 2009) e tem por objetivo determinar a relação entre a tração aplicada repetidamente no plano diametral vertical e a deformação específica recuperável correspondente à tensão aplicada num corpo de prova cilíndrico. O ensaio foi realizado à temperatura de 25 °C na condição de tensão controlada, considerando uma carga *haversine* para 0.1 s na aplicação e 0.9 s na recuperação por ciclo, coeficiente de Poisson de 0.30 e nível de tensão correspondente a 30% da carga máxima do ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Os principais procedimentos do ensaio são:

- determinação da geometria (altura e diâmetro) do corpo de prova;
- pré-condicionamento por 2 horas à temperatura do ensaio (25 °C) em sala climatizada;
- colocação e nivelamento dos medidores de deslocamento no corpo de prova;
- aplicação de 500 ciclos de pré-carregamento;
- nivelamento dos medidores de deslocamento após os primeiros 500 ciclos;
- aplicação de 5 ciclos de carga para a determinação do valor do módulo de resiliência.

A Figura 3.25 apresenta o equipamento do ensaio de módulo de resiliência.



Figura 3.25 Ensaio de módulo de resiliência.

A Figura 3.26 apresenta a solicitação (aplicação de carregamento e descarregamento) e resposta (deslocamentos ao longo do eixo horizontal diametral) respectivamente na aplicação dos últimos cinco ciclos.

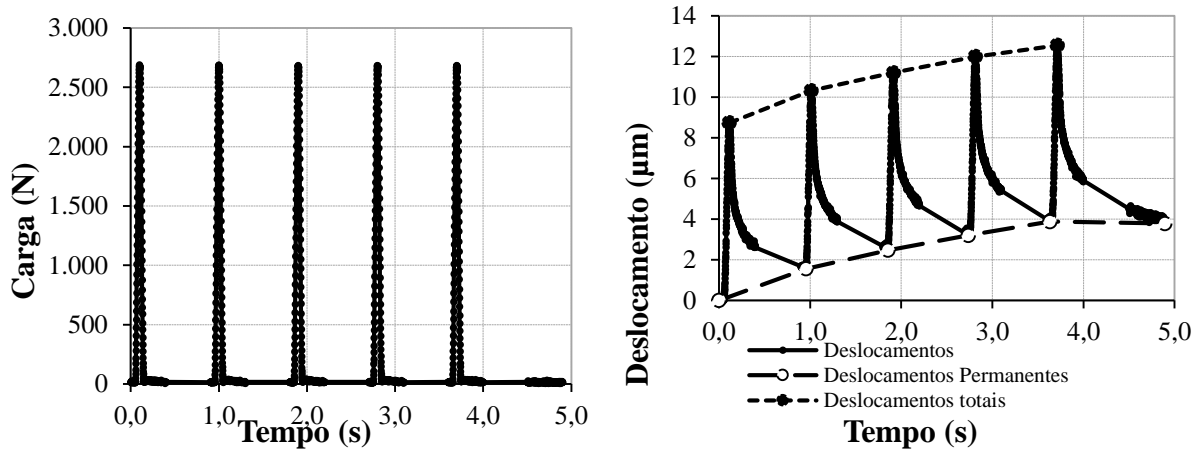


Figura 3.26 Aplicação de cinco ciclos de carga e deslocamentos obtidos na para a determinação do módulo de resiliência.

A partir da Figura 3.26 pode-se determinar a magnitude dos deslocamentos radiais permanentes e totais. Os deslocamentos radiais elásticos são calculados considerando-se diferença entre os deslocamentos radiais totais e permanentes.

### 3.5.4 Creep estático

O ensaio de compressão uniaxial ou creep estático foi desenvolvido a fim de determinar a deformação permanente por meio do comportamento visco-elasto-plástico da mistura asfáltica no tempo. Para a realização do ensaio foram fabricados três corpos de prova Marshall de cada mistura asfáltica no teor ótimo. Posteriormente realizou-se um nivelamento das faces ou planos horizontais de compactação, a fim de garantir paralelismo entre as faces e correta aplicação do carregamento vertical. Neste caso, foi necessária a realização de um capeamento com argamassa de cimento para cada corpo de prova. Os detalhes do equipamento utilizado e o nivelamento de corpos de prova por capeamento são apresentados na Figura 3.27.



Figura 3.27 Ensaio creep estático: (a) Equipamento de ensaio; (b) corpos de prova.



O ensaio foi realizado numa temperatura de 25 °C em condições de tensão controlada. O corpo de prova da mistura asfáltica foi pré-condicionado termicamente e submetido axialmente a um carregamento e descarregamento no qual se determina de forma uniaxial e vertical as magnitudes das deformações ocorridas ao longo do tempo. A Figura 3.28 apresenta a solicitação (carregamento e descarregamento) e a resposta (deformações axiais), durante o tempo do ensaio. O procedimento de ensaio segue a norma NCHRP *report 465 Appendix (Static creep/flow time of asphalt concrete mixtures in compression)*. Os principais procedimentos do ensaio após confecção e nivelamento das faces no corpo de prova são:

- determinação da geometria (altura e diâmetro) do corpo de prova;
- pré-condicionamento à temperatura ambiente de 25 +/- 0,5 °C em sala climatizada;
- colocação do corpo de prova no equipamento e verificação da posição e contato dos dois instrumentos de medição de deslocamento LVDT's durante o ensaio;
- aplicação da pré-carga equivalente à 5% do total da carga aplicada por um tempo de 10 segundos;
- aplicação da carga estática por um tempo de 3600 segundos. No caso das misturas CBUQ foi adotada uma carga correspondente à 0,1 MPa (1,02 kgf/cm<sup>2</sup>). Já para as misturas CPA, devido ao elevado volume de vazios, foi adotado um valor do 70% da carga aplicada nas misturas CBUQ;
- descarregamento por um tempo de 900 segundos;
- determinação do módulo e da relação inversa compliance na fase do carregamento.

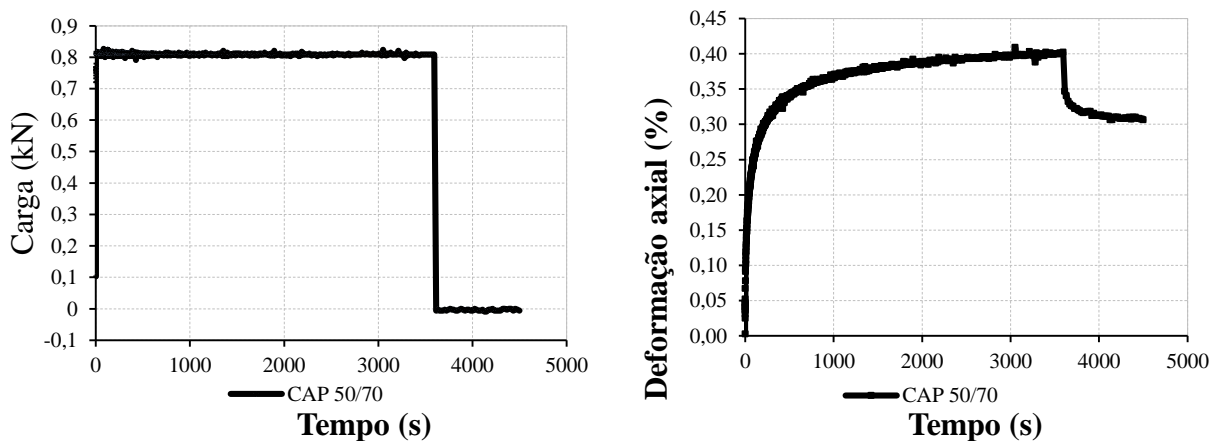


Figura 3.28 Aplicação do carregamento, descarregamento e deformação axial vertical da mistura asfáltica no tempo – ensaio creep estático.

Após da obtenção dos dados experimentais foram determinadas as magnitudes das deformações, segundo o esquema apresentado na Figura 3.29.

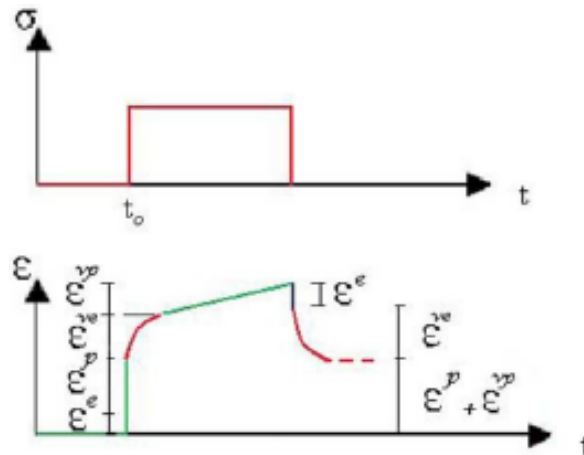


Figura 3.29 Esquema das componentes de deformação para o material visco-elasto-plástico, submetido ao estado de tensão controlada (Sides *et al.*, 1985).

A partir da Figura 3.29 pode-se definir os seguintes tipos de deformações:

- $\epsilon^e$ : deformação elástica ou recuperável – independentemente do tempo;
- $\epsilon^p$ : deformação plástica ou não recuperável – independentemente do tempo;
- $\epsilon^{ve}$ : deformação viscoelástica ou recuperável – dependente do tempo;
- $\epsilon^{vp}$ : deformação viscoplástica ou não recuperável – dependente do tempo.

Porém, as deformações recuperáveis podem ser definidas como o somatório das deformações elásticas e viscoelásticas ( $\epsilon^e + \epsilon^{ve}$ ). Enquanto que as deformações não recuperáveis podem ser definidas como o somatório das deformações plásticas com as deformações viscoplásticas ( $\epsilon^p + \epsilon^{vp}$ ). Por outra parte, a recuperação em percentual que experimenta a mistura asfáltica após o descarregamento, pode ser expressa por meio da equação 3.24.

$$\text{Recuperação(\%)} = \frac{\epsilon_{\text{recuperaveis}}}{\epsilon_{\text{Totais}}} \cdot 100 \quad (3.24)$$

Onde as deformações totais ( $\epsilon_{\text{totais}}$ ) correspondem à somatória das deformações recuperáveis e não recuperáveis no ensaio.

### 3.5.5 Fadiga por compressão diametral

A vida de fadiga é considerada um parâmetro de projeto ligado à capacidade de suportar ações e carregamentos repetitivos à flexão que resultam do clima e do tráfego no pavimento. Porém, na caracterização mecânica das misturas asfálticas é indispensável conhecer o comportamento de vida de fadiga através de ensaios de laboratório, que apresentam a relação tensão ou deformação em função do número de ciclos de carga para atingir a ruptura. Araújo (2009) define a vida de fadiga

em termos da vida de fratura, relacionada ao número total de aplicações de carga para atingir a ruptura do material, e ao número de aplicações de carga que reduz a rigidez inicial. Existem diferentes variáveis consideradas nos ensaios de vida de fadiga, tais como: forma de aplicação do carregamento, regime de tensão ou deformação controlada, pontos de flexão, geometria do corpo de prova (circular, trapezoidal, prismático), estados especiais de tensões ou deformações, modelo de ruptura, critério de parada do ensaio, temperatura de ensaio, entre outros.

A fim de determinar o desempenho dos ligantes asfálticos estudados nas misturas densas e drenantes foram realizados ensaios de fadiga em amostras cilíndricas por compressão diametral no regime de tensão controlada. A forma de aplicação do carregamento corresponde à função haversine de 0.1 s aplicação e 0.9 s recuperação para cada ciclo. Foram considerados níveis de carregamento de 10%, 20%, 30% e 40% do total da resistência à tração para cada mistura de estudo. A temperatura do ensaio foi de 25 °C mantida através da climatização da sala. Os resultados foram expressos pelo número de solicitações (N) e a diferença de tensão ( $\Delta\sigma$ ) por meio de gráficos mono-log, conforme a Figura 3.30.

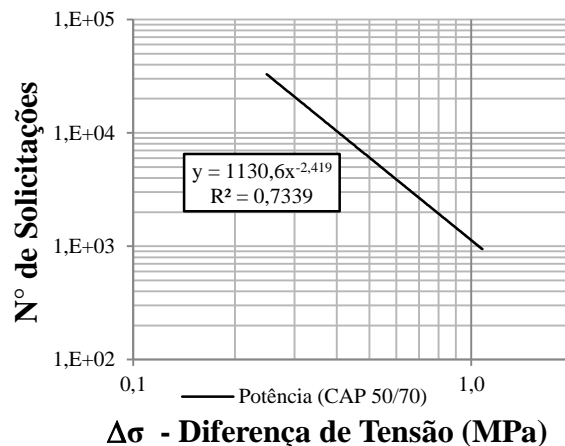


Figura 3.30 Vida de fadiga de misturas asfálticas.

As Equações 3.25 e 3.26 apresentam os modelos de vida de fadiga em misturas asfálticas, para ensaios à deformação ou tensão controlada respectivamente.

$$N = k_1 \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{n1} \quad (3.25)$$

$$N = k_2 \cdot \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n2} \quad (3.26)$$

Onde:

N: vida de fadiga (número de repetições de carga);

$\epsilon_i$ : deformação resiliente inicial, mm;

$\Delta\sigma$ : diferença de tensão, MPa;

$k_1, k_2, n_1$  e  $n_2$ : Parâmetros experimentais determinados no ensaio.

As diferenças de tensões e de deformações resilientes são obtidas pelas equações 3.27 e 3.28 respectivamente.

$$\Delta\sigma = \frac{8 \cdot F_v}{100 \cdot \pi \cdot D \cdot h} \quad (3.27)$$

$$\epsilon_i = \frac{\sigma_t}{MR} \quad (3.28)$$

Onde:

$F_v$ : Carga vertical aplicada, N;

$D$ : diâmetro do corpo de prova, cm;

$h$ : altura do corpo de prova, cm.

$\sigma_t$ : tensão de tração, correspondente ao percentual da resistência à tração, MPa;

$MR$ : módulo de resiliência, MPa.

A Figura 3.31 apresenta a sequência do ensaio de vida de fadiga por compressão diametral.



Figura 3.31 Sequência do ensaio de vida de fadiga por compressão diametral.

### 3.5.6 Resistência ao dano por umidade induzida

O ensaio de resistência ao dano por umidade induzida ou ensaio *Lottman* Modificado (AASHTO, 1989) avalia a adesividade do ligante asfáltico aos agregados nas misturas asfálticas, a fim de simular a perda de resistência ou outros danos causados pela umidade do pavimento. A análise do ensaio é feita pelo quociente da relação entre as resistências à tração de amostras condicionadas e não condicionadas. O ensaio consistiu em simular a expansão da água no estado sólido ou de congelamento, a fim de avaliar a resistência à desintegração ou separação entre o

ligante asfáltico e os agregados. O ensaio pode ser dividido em cinco etapas, que compreendem: (I) confecção de 6 corpos de prova segundo a metodologia Marshall, com um índice de vazios entre 6 e 8%; (II) destes, 3 corpos de prova foram acondicionados mediante saturação a vácuo com uma pressão entre 250 e 650 mmHg durante um tempo compreendido entre 5 e 10 minutos, a fim de atingir uma saturação de 55% a 80%; (III) depois foram congelados a -18 °C durante 15 horas; (IV) Em seguida os corpos de prova foram colocados em banho Maria à temperaturas de 60°C e 25°C por um tempo de 24 e 2 horas respectivamente; (V) finalmente realizou-se a determinação da resistência à tração por compressão diametral tanto dos corpos de prova condicionados como dos não condicionados. Os resultados podem ser obtidos por meio da Equação 3.29. A Figura 3.32 apresenta a sequência do ensaio Lottman Modificado.

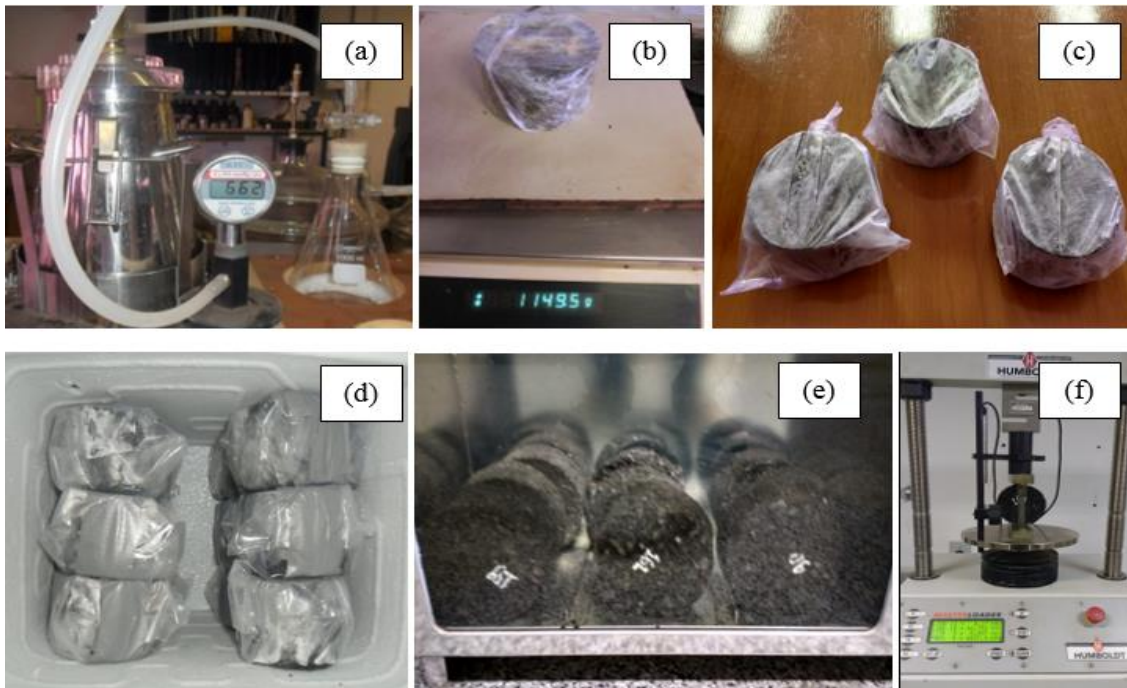


Figura 3.32 Ensaio de resistência ao dano por umidade induzida: (a) Equipamento para a saturação; (b) determinação da saturação; (c) - (d) ciclo de congelamento; (e) condicionamento no banho Maria a 60°C; (f) ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

$$RRT = \frac{RT2}{RT1} \cdot 100 \quad (3.29)$$

Onde:

RRT: Relação da Resistência à Tração, %;

RT1: Média da resistência à tração de amostras sem condicionamento, MPa;

RT2: Média da resistência à tração de amostras acondicionadas, MPa.

O critério de aceitação para misturas não suscetíveis às variações de umidade de acordo com a (AASHTO, 1989) é o da Relação da Resistência à Tração  $RRT \geq 70\%$ . Enquanto, a versão (AASHTO, 2007) compatibilizada para a metodologia Superpave adota  $RRT \geq 80\%$ .

### 3.5.7 Desgaste por abrasão Cântabro

A fim de determinar a adesividade entre ligante asfáltico e agregados nas misturas asfálticas CPA e CBUQ, foi analisado o percentual de desgaste Cântabro de corpos de prova no teor ótimo. Para o caso das misturas CPA o ensaio considera o parâmetro de dosagem conforme apresentado no item 3.4.2 e os valores máximo preconizado na Tabela 3.16. No caso das misturas CBUQ não existe uma especificação de ensaio. Entretanto, na presente pesquisa optou-se por realizar o ensaio Cântabro em misturas CBUQ, a fim de observar o desempenho dos ligantes asfálticos modificados. No Brasil o ensaio Cântabro é regulado pela especificação DNIT 383 (DNIT, 1999) e tem por objetivo determinar o desgaste por abrasão de misturas asfálticas com asfalto-polímero através do emprego da máquina Los Angeles. O percentual de abrasão é determinado num corpo de prova Marshall pela diferença de massa inicial e sua massa final após 300 revoluções na máquina Los Angeles, a uma velocidade entre 30 e 33 rpm na temperatura de 25 °C. A Figura 3.33 apresenta a execução do ensaio. A Equação 3.30 determina o desgaste Cântabro da mistura asfáltica por abrasão.

$$A = \frac{M_o - M_f}{M_o} \cdot 100 \quad (3.30)$$

Onde:

- A: desgaste da mistura asfáltica com asfalto modificado, %;
- Mo: massa do corpo de prova antes do ensaio, g;
- Mf: massa do corpo de prova após o ensaio, g.



Figura 3.33 Sequência do ensaio de abrasão Cântabro.

### 3.6 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Os dados dos resultados dos ensaios da caracterização física dos ligantes asfálticos modificados com elastômeros e fíleres, consistem em observações das respostas de indivíduos ou objetos experimentais selecionados aleatoriamente de uma única população.

O objetivo do tratamento estatístico consiste em determinar se as variações dos resultados dos ensaios da caracterização física dependem do tipo de fíler e do percentual adicionado, ao serem comparados com o ligante CAP 50/70 puro. Para atingir esse objetivo, utilizou-se o programa estatístico da IBM *Statistical Package for Social Science SPSS Statistics 24* da versão acadêmica. Em princípio foram determinadas as características das amostras para determinar o tipo de análise a realizar para um nível de confiança de 95%, através da natureza dos sujeitos e testes de parametricidade. Para determinar os requisitos de parametricidade avaliou-se três condições: (i) normalidade, (ii) tamanho da amostra e (iii) homocedasticidade.

A natureza dos sujeitos indica se as amostras são independentes ou relacionadas. No caso da pesquisa as amostras são relacionadas, devido ao fato de que as incorporações dos materiais fíleres alternativos foram realizadas sobre o ligante asfáltico CAP 50/70, não correspondendo assim a naturezas diferentes. Neste sentido, foram avaliadas as condições do CAP 50/70 puro pré-teste (*pre-test*) ou referência e após as adições dos materiais alternativos pós teste (*post-test*) ou de estudo. As condições de parametricidade permitem determinar se a análise é paramétrica ou não paramétrica. As análises paramétricas comumente utilizadas são a *t de Student* e a análise de variação ANOVA, enquanto que as análises não paramétricas comumente utilizadas são a Chi-quadrado, Binomial, Rachas e *Kolmogorov-Smirnov*.

Para determinar a parametricidade se deve satisfazer as três condições anteriormente descritas, caso não se atinja uma única condição, o tipo de análise deve ser não paramétrica. A condição de normalidade foi verificada através do teste *Shapiro-Wilk* em SPSS, a fim de observar se os valores da variável dependente numérica seguem uma distribuição normal para um tamanho de amostras “n” pequeno ( $n < 30$ ). O coeficiente de significância “sig” obtido no teste *Shapiro-Wilk* superior a 0,05 considera que os dados se distribuem normalmente, caso o valor do coeficiente de significância “sig” seja inferior a 0,05 os dados não apresentam normalidade. O tamanho da amostra para a determinação da parametricidade deve ser superior a 30, neste sentido, cabe salientar que os resultados desta pesquisa consideram tamanhos amostrais inferiores a 30 dados. Finalmente, a homocedasticidade definida como as variações da variável dependente numérica nos grupos, devem ser iguais e homogêneas. Utilizou-se o teste *Levene* no SPSS, sendo que o

coeficiente “sig” deve ser superior a 0,05 para assumir variações iguais e consequentemente homocedasticidade das amostras.

Quando os dados atingem a natureza de amostras relacionadas, mas não se atinge os critérios de parametricidade, pode-se utilizar um tipo de análise não paramétrica equivalente ao teste de *Wilconxon*. Neste sentido, precisa-se definir duas hipóteses a fim de atingir o objetivo do tratamento estatístico e validar a hipótese nula através do coeficiente de significância sig.assintótica inferior a 0,05. Para o caso desse estudo, foram estabelecidas as seguintes hipóteses:

- Xo Hipótese nula: não existem aumentos estatísticos significativos após a incorporação de diferentes percentuais de materiais fíleres no CAP 50/70;
- Xa Hipótese alternativa: existem aumentos estatísticos significativos após a incorporação de diferentes percentuais de materiais fíleres no CAP 50/70.

Para determinar se os aumentos das características físicas e reológicas do CAP 50/70 foram causadas pelo tipo e percentual de material adicionado, utilizou-se o teste de *Pearson* e a regressão linear, a fim de estabelecer as correlações. Os intervalos para determinar o tipo de correlação entre variáveis (fator-teor de aditivo) e (fator-tipo de aditivo) para o teste de *Pearson* são apresentados na Tabela 3.18.

Tabela 3.18 Intervalos para a determinação do tipo de correlação entre variáveis para o teste de *Pearson*

<b>Fator de correlação</b>	<b>Tipo de Correlação</b>
0,00	Não existe correlação - Inexistente
0,10	Correlação positiva fraca
0,50	Correlação positiva media
0,75	Correlação positiva considerável
0,90	Correlação positiva muito forte
1,00	Correlação positiva perfeita



## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS DOS LIGANTES ASFALTICOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios físicos e químicos realizados com os materiais modificadores do ligante asfáltico: borracha, cal virgem, Resíduo de Minério de Ferro (RMF) e Lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA). Além disso foram avaliadas as características físicas e reológicas dos asfaltos modificados com diferentes teores de material modificador, seja material elastômero (borracha) ou fíler (cal virgem, RMF e ETA), a fim de observar sua trabalhabilidade na mistura asfáltica. Por último, foram feitas análises estatísticas para a determinação das variações das propriedades físicas em relação ao CAP 50/70 e em função do teor e tipo de aditivo incorporado.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

Neste subitem serão apresentados os resultados da caracterização física e química dos materiais modificadores do ligante asfáltico a fim de analisar a interação física e química com o CAP 50/70.

#### 4.1.1 Caracterização Física

A Tabela 4.1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física dos materiais fíleres modificadores do ligante asfáltico e de densidade do ligante asfáltico CAP 50/70 puro e com adição dos materiais fíleres.

Tabela 4.1 Caracterização física do ligante asfáltico e dos materiais fíleres modificadores.

Nome do ensaio	Norma Utilizada	Unidade	Resultado		
			Cal Virgem	RMF	Lodo de ETA
Material passante na peneira N° 200	DNIT 083/094	%	77,3	86,2	84,1
Limite de Liquidez (WL)	NBR 6459/84	%	NL	NL	NL
Limite de Plasticidade (WP)	NBR 7180/84	%	NP	NP	NP
Índice de Plasticidade	NBR 7180/84	%	NP	NP	NP
Massa específica real do material finamente pulverizado	DNIT 085/94	g/cm <sup>3</sup>	2,688	4,085	1,676
Massa específica ligante asfáltico-fíler: 80% em peso de asfalto + 20% de fíler.	DNIT 093/94	g/cm <sup>3</sup>	1,341	1,620	1,138

NL, Não Líquido; NP, Não Plástico.

Na Tabela 4.1 observa-se que os materiais estudados apresentam percentuais superiores a 65% das partículas passantes pela peneira N° 200. Portanto, estes podem ser considerados como materiais fíleres segundo a especificação DNIT 367/1997. Em termos dos limites de consistência, os fíleres foram classificados como materiais não plásticos. Os materiais não plásticos podem apresentar maior capacidade de dispersão na matriz do ligante asfáltico pela ausência da coesão das partículas. Segundo Lucena (2012) o comportamento não plástico apresentado nos resíduos de lodos de ETA pode ocorrer devido a impermeabilização do sulfato de alumínio sobre as impurezas da água. Os resultados encontrados são similares aos obtidos por diferentes pesquisadores (Lucena, 2012) (Dantas, 2015)(Obando, 2016).

## 4.1.2 Caracterização Química

### 4.1.2.1 Composição química elementar

A Tabela 4.2 apresenta a composição química elementar pela Fluorescência de raios-X dessas amostras dos fíleres (cal, RMF e lodo de ETA), assim como também sobre elastômero tipo borracha. Os resultados apresentados correspondem ao percentual de cada elemento químico encontrado na composição, utilizando o acondicionamento das amostras com carbono, porém, os resultados encontrados não apresentam presença de carbono.

Tabela 4.2 Composição química elementar pela FRX.

Elemento	Cal* (%)	RMF (%)	Lodo de ETA (%)	Borracha (%)
Ca	84,80	-----	2,05	17,44
Mg	14,11	-----	0,75	-----
Si	0,64	8,59	21,12	9,39
Fe	-----	83,95	33,95	1,46
K	0,20	-----	1,92	0,95
Sr	0,17	-----	0,05	-----
S	-----	-----	1,14	17,32
Mn	0,12	0,99	0,44	-----
Ni	-----	-----	0,09	-----
Al	-----	6,48	36,67	2,01
Ti	-----	-----	0,98	-----
Cu	-----	-----	0,08	0,19
Zn	-----	-----	0,18	50,56
Ba	-----	-----	0,45	-----
Cr	-----	-----	0,06	-----
P	-----	-----	0,13	0,45
Br	-----	-----	0,04	-----
Sc	-----	-----	-----	0,23

\*valores encontrados (Sosa, 2016)

As análises químicas do rejeito de minério de ferro RMF apresentaram elevados teores de ferro Fe (83,9%), sílica Si (8,9%) e alumínio Al (6,5%) e outros em menores proporções. Estes resultados foram similares a composição química obtida por Dantas (2015), onde as variações entre os resultados podem ser explicadas devido à variabilidade do rejeito. Nos lodos de ETA, na condição de secos ao ar, destacam-se o Alumínio Al (36,7%), ferro Fe (33,9%), sílica Si (21,2%), cálcio Ca (2,7%), potássio K (1,9%) e outros elementos químicos em menores proporções (3,7%). A elevada presença do alumínio e do ferro origina-se pela utilização de coagulantes empregados durante o tratamento da água (Delgado, 2016). Esses resultados são similares aos obtidos por Lucena (2012), conforme os estudos apresentados na Tabela 2.1.

De forma geral, a presença de sílica (Si) e alumínio (Al) tanto nos lodos de ETA e no rejeito de minério ferro RMF podem desenvolver propriedades cimentantes ou pozolânicas, podendo aumentar a adesividade e contato entre grãos nos concretos hidráulico ou asfálticos (Carrasco *et al.*, 2017) (Nassar *et al.*, 2016). A presença de ferro (Fe) no rejeito minério de ferro RMF, contribui com ao aumento da densidade do material, contribuindo, provavelmente, para o aumento da rigidez do ligante asfáltico e conseqüentemente das propriedades mecânicas das misturas asfálticas. A presença de Cálcio (Ca) na cal aumenta a adesividade superficial entre o ligante asfáltico e os grãos de agregados, assim como também contribui para o aumento da resistência ao dano por umidade induzida, aumento da rigidez e conseqüentemente aumento à deformação permanente em misturas asfálticas (Muniandy *et al.*, 2013).

A composição química da borracha apresenta elevados teores de zinco Zn (50,6%), cálcio Ca (17,4%), enxofre S (17,3 %), sílica Si (9,4%), alumínio Al (2,0%), Ferro (1,5%) e outros em menores proporções (1,8%). Além da borracha, os pneus contêm fibras e aço e ferro, o que justificam a presença de alumínio e ferro. A borracha de pneu é composta principalmente pelas misturas de borracha natural, borracha sintética e carbono amorfo, sendo que a borracha sintética e o negro de fumo são derivados do petróleo (Wang *et al.*, 2017). O carbono amorfo é enxofre, plastificantes, aceleradores, antioxidantes necessários para o processo de manufatura do pneu, destacando a presença do zinco (Wang *et al.*, 2017).

#### **4.1.2.2 Difração de Raios X**

As Figuras 4.1 a 4.3 apresentam os espectros de difração de raios-X dos materiais fíleres alternativos estudados nesta pesquisa. Comparou-se os picos caraterísticos dos resultados obtidos, com os padrões dos dados do *Internacional Center for Data ICDD*.

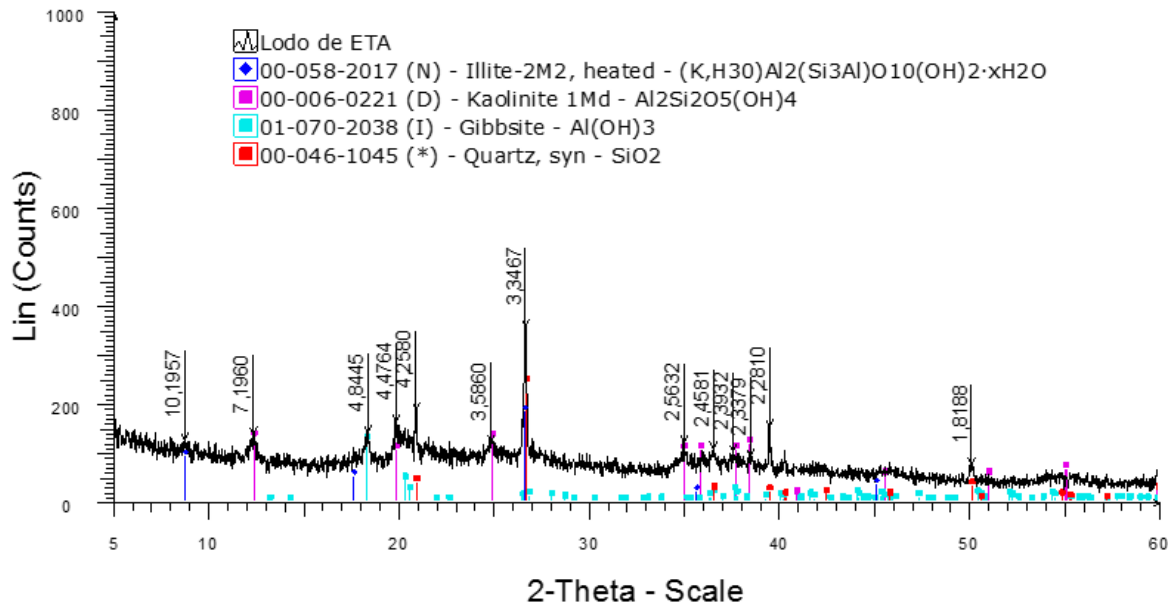


Figura 4.1 Difratoograma de Raios X – resíduo de lodo de ETA.

A partir do difratograma de Raios-X para a amostra do lodo de ETA, pode-se observar picos característicos de minerais tais como: quartzo  $\text{SiO}_2$ , illita  $(\text{K,H}_3\text{O})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})]$ , caulinita  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  e gibbsita  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Resultados similares foram obtidos em diversas pesquisas (Wolff *et al.*, (2009), Lucena, (2012) Delgado (2016)) atribuindo à presença de alumínio aos coagulantes utilizados no tratamento de água.

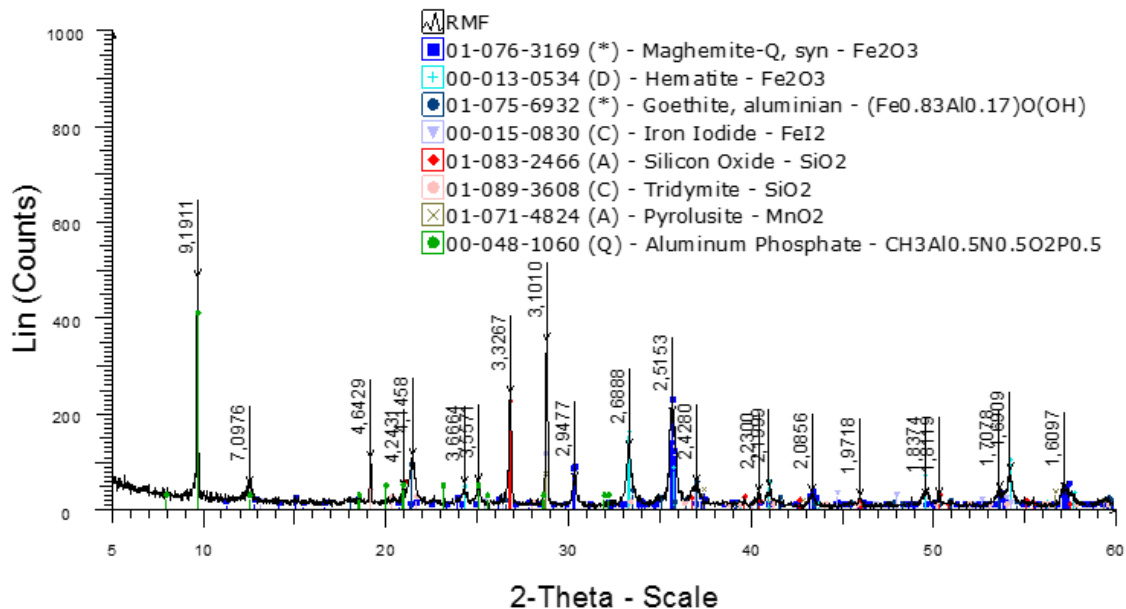


Figura 4.2 Difratoograma de Raios X – Rejeito de Minério de Ferro RMF.

As reflexões do difratograma na amostra do RMF indicam a presença de magnetita  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , hematita  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , goethita aluminato  $\text{FeO}(\text{OH})$ , óxido de ferro  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , quartzo  $\text{SiO}_2$ , tridiminita

SiO<sub>2</sub>, pirolusita MnO<sub>2</sub> e aluminato de fosfato. A presença da hematita se deve às perdas no processo de beneficiamento (Guerra, 2010). Os resultados estão coerentes com os verificados na literatura (Das *et al.*, 2000) (Nery *et al.*, 2017).

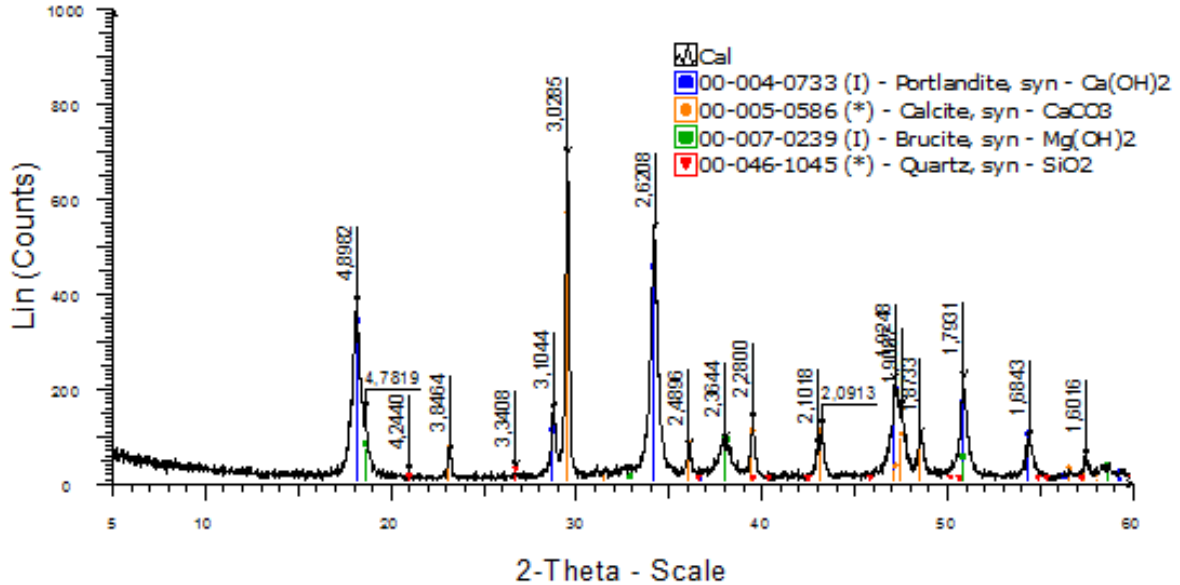


Figura 4.3 Difratoograma de Raios X – Cal.

Os resultados da difração de raios-X da cal indicam a presença de hidróxidos de cálcio Ca(OH)<sub>2</sub>, óxidos de magnésio, calcita Ca(CO)<sub>3</sub>, brucita Mg (OH)<sub>2</sub> constituída de hidróxido de magnésio, e quartzo Si(OH)<sub>2</sub>. Estes resultados estão de acordo com os geralmente apresentados para a cal do tipo calcítica.

#### 4.1.2.3 Análise Térmica Diferencial (ATD)

A Figura 4.4 apresenta as análises termodiferenciais (ATD) dos materiais adicionados ao ligante asfáltico como a borracha, proveniente dos pneus, e os fíleres convencionais e alternativos. Por meio da análise ATD é possível identificar os pontos endotérmicos e exotérmicos, ou seja, pontos donde a amostra libera e absorve calor respectivamente e que estão associados aos compostos presentes nos materiais.

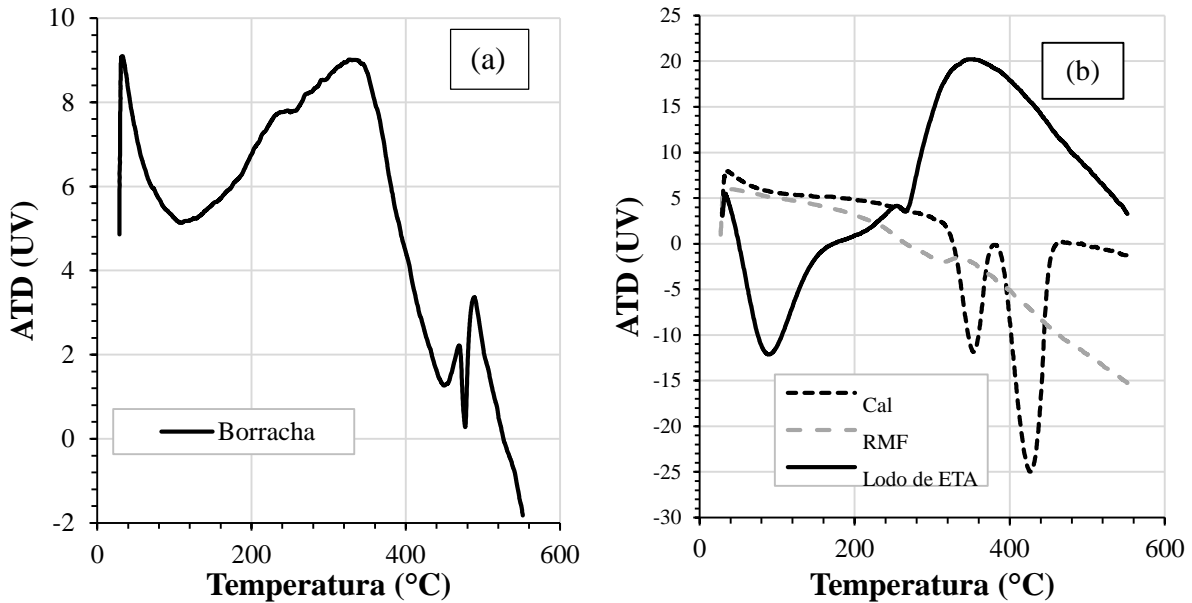


Figura 4.4 Análise Termodiferençal ATD: (a) borracha de pneus usados; (b) materiais fíleres.

A partir da Figura 4.4 (a) observa-se que a curva ATD da borracha apresenta um ponto exotérmico na temperatura aproximadamente de 360 °C, indicando maior liberação de energia e consequentemente maior perda de massa. Esse fato pode ser explicado pela queima do carbono e materiais voláteis que liberam grande quantidade de calor (Faria, 2015). Também pode-se perceber outro pico exotérmico de menor magnitude na temperatura aproximada de 500 °C que pode estar associado à degradação do zinco e alumínio.

A partir da Figura 4,4 (b), pode-se observar que a curva ATD da cal apresentou dois picos endotérmicos de grande intensidade nas temperaturas aproximadas de 340 °C e 430 °C. A curva ATD para o rejeito de minério de ferro apresentou deslocamento superior da curva ATD do RMF, evidenciando a formação de dois pontos exotérmicos de pouca intensidade nas temperaturas de 60 °C e 360 °C. A curva ATD do lodo de ETA apresentou um pico endotérmico de grande intensidade para a temperatura aproximada de 80°C atribuído provavelmente à perda de água. Evidenciou-se a formação de um ponto exotérmico de pouca intensidade na temperatura de 280° e de grande intensidade à temperatura de aproximada de 360 °C, que pode ser atribuído à combustão de matéria orgânica (Lucena, 2012).

#### 4.1.2.4 Análise Térmica Gravimétrica (TG)

A análise termogravimétrica (TG) permite determinar as variações de massa de um material, pelas possíveis transformações físicas (condensação, evaporação, sublimação, entre outras) ou

químicas (oxidação, decomposição ou volatilização, entre outras) em função da temperatura. A Figura 4.5 apresenta a TG dos materiais incorporados ao ligante asfáltico.

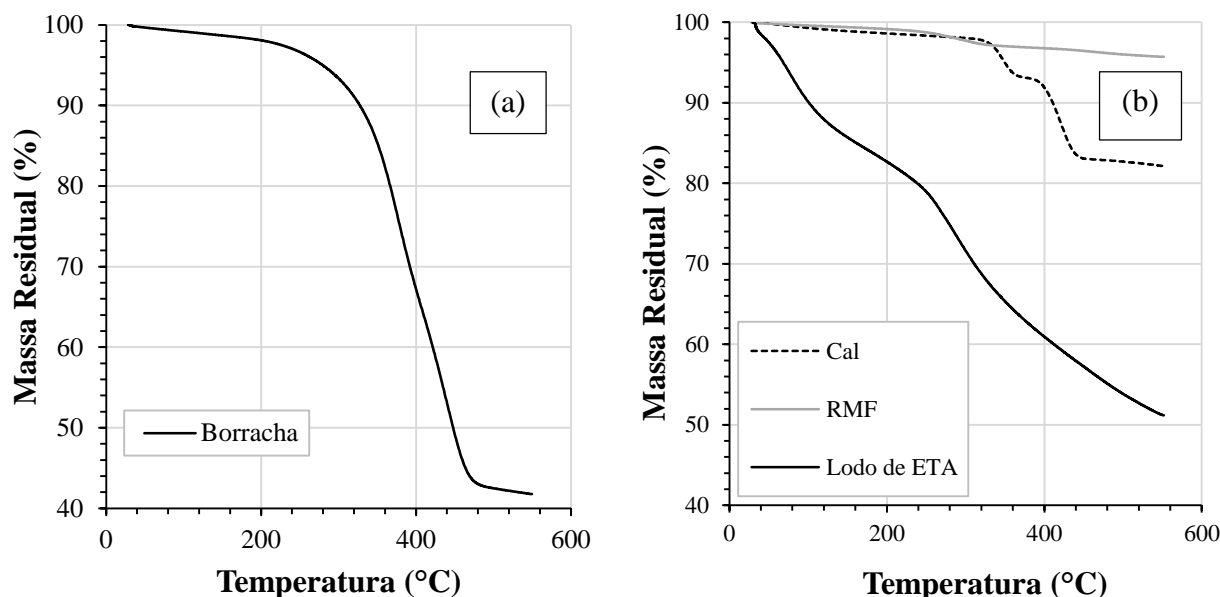


Figura 4.5 Análise Termo Gravimétrica TG: (a) borracha de pneus usados; (b) materiais fileres.

A curva TG da borracha proveniente dos pneus usados apresentou um único estágio de perda de massa significativa localizado entre 200 °C e 480 °C, que pode estar associado à perda intensiva do cálcio (Ca) (Lago *et al.*, 2017), assim como à liberação dos óleos voláteis do pneu (Faria, 2015). Entretanto, esta perda não é relevante para o presente estudo, pois as temperaturas de incorporação da borracha ao ligante asfáltico, de usinagem e de compactação das misturas asfálticas acontecem a temperaturas inferiores a 200 °C, uma vez que temperaturas maiores induzem o envelhecimento e oxidação excessiva do ligante asfáltico. Após atingir 480 °C observa-se uma estabilização da perda de massa, atingindo um valor de massa residual de 42%.

A curva TG do fíler de rejeito de minério de ferro RMF apresentou perda de massa inferior a 5% para temperaturas de até 550°C indicando estabilidade quando das variações de temperatura. As variações inferiores a 5% podem ser atribuídas às impurezas ou umidade higroscópica do material. A variação de massa de RMF em temperaturas inferiores a 200 °C (máxima temperatura de preparação das misturas betuminosas) pode ser considerada insignificante (aproximadamente 0,5%).

A curva TG da amostra de cal apresenta cinco estágios de perda de massa. O primeiro estágio considera uma variação de massa de 2% entre a temperatura ambiente até aproximadamente 320 °C. O segundo estágio de perda de massa equivalente aproximadamente a 5% ocorre na faixa de 320 °C a 360 °C. Em seguida observa-se uma estabilização da perda de massa na faixa de 360 °C

a 400 °C. O quarto estagio apresenta uma perda de massa considerável de aproximadamente 10% na faixa de 400 °C a 440° C. Finalmente, no último estágio, observa-se uma estabilização da perda de massa para temperaturas superiores a 440 °C. Considerando-se que a temperatura de preparação das misturas betuminosas é inferior a 200 °C, se teria para a cal a variação insignificante de aproximadamente 0,5%.

O resíduo de lodo de ETA apresentou uma perda de massa linear de aproximadamente 50% até atingir a temperatura de 550 °C, fato atribuído à quantidade de matéria orgânica e água adsorvida. Nesse caso para a temperatura de usinagem do asfalto ocorreria uma perda de massa de aproximadamente 15 % sendo que parte dela seria responsável pela geração de cinza que geralmente contribui para a melhoria do comportamento mecânico da mistura.

#### 4.1.2.5 Determinação da carga elétrica da superfície das partículas de fíleres

As cargas elétricas das partículas foram obtidas a partir da equação (4.1) proposta por Keng e Uehara (1974) para a determinação do potencial de carga zero PCZ para solos. A partir do comparativo entre o PCZ e a medida do pH-H<sub>2</sub>O é possível determinar a carga da superfície, sendo que quando o PCZ > pH-H<sub>2</sub>O, a carga da partícula atinge a condição positiva, caso contrário, negativa. A Tabela 4.3 apresenta os resultados da média das leituras e os coeficientes de variação para o pH em H<sub>2</sub>O e o pH em KCL, assim como também o PCZ e a determinação do tipo da carga da superfície da partícula para os fíleres convencionais e alternativos.

$$PCZ = 2pH_{kcl} - pH_{H_2O} \quad (4.1)$$

Tabela 4.3 Determinação da carga elétrica da superfície das partículas de fíleres

Material	pH-H <sub>2</sub> O	pH-KCL	PCZ	Carga da superfície
	Média	Média		
Cal	12,2	12,46	12,72	Positiva
RMF	7,44	7,88	8,32	Positiva
Lodo de ETA	6,91	6,95	6,99	Positiva

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4.3 pode-se concluir que os fíleres estudados (convencionais e alternativos) têm predominância de cargas eletropositivas. A interação entre cargas dos materiais (fíler - ligante asfáltico) e posteriormente (agregado – ligante asfáltico) pode favorecer a adesividade na mistura asfáltica e conseqüentemente o aumento das características mecânicas. A superfície dos fíleres atraem os grupos polares do ligante asfáltico e seguidamente com os agregados dentro da mistura asfáltica. Para validar a hipótese da interação de dos materiais, realizou-se o ensaio qualitativo da adesividade do ligante asfáltico modificado com o agregado,



segundo as especificações do DNIT 078/ (DNIT,1994). A Figura 4.6 ilustra o ensaio de adesividade do ligante asfáltico ao agregado.



Figura 4.6 Ensaio de adesividade do ligante asfáltico modificado ao agregado graúdo.

Após da execução do ensaio de adesividade, utilizando os três tipos de ligantes asfálticos modificados com fíleres (cal, rejeito de minério de ferro RMF e lodo de ETA) nas proporções gravimétricas do 10%, 20%, 30% e 40%, pode-se concluir em termos das cargas, que há uma boa interação entre a superfície dos materiais fíleres e o ligante asfáltico, devido que aos agregados não apresentaram o deslocamento da película de ligante asfáltico.

#### **4.1.2.6 Caracterização dos fíleres por microscopia eletrônica de varredura MEV**

A Figura 4.7 apresenta as imagens obtidas no MEV para as partículas de materiais fíleres convencionais e alternativos, onde pode-se verificar a forma e superfície das partículas de fíler.

De forma geral, pode-se observar padrões semelhantes nas formas das partículas dos materiais alternativos RMF e lodo de ETA. Ambos apresentam agregações mais sólidas e bem distintas das apresentadas pela cal. Considerando-se o  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  da cal e os PCZ do RMF e do lodo de ETA (Tabela 4.3) será recomendável em estudos futuros avaliar o uso de fíleres compostos por misturas de cal e RMF e cal e lodo de ETA, pois a cal poderá atuar variando a textura desses fíleres e modificar o comportamento das misturas betuminosas. Em termos do tamanho e forma de partículas pode-se observar uma uniformidade de partículas angulares com tendência cúbica do fíler de rejeito de minério de ferro. No caso do fíler de lodo de ETA observa-se variações dos tamanhos e formas mais laminares das partículas agregadas. Em termos da textura da superfície dos grãos, pode-se observar que o rejeito de minério de ferro apresenta grande rugosidade, enquanto que no caso do lodo de ETA, observa-se rugosidade mais concentrada nas bordas dos grãos, provavelmente produzido por quebras dos grãos através do moinho mecânico usado na preparação da amostra. A

geração de superfícies rugosas nos grãos do material fíler podem criar maiores interações nos contatos com o ligante asfáltico, podendo formar uma camada interfásica de maior estabilidade ante a aderência.

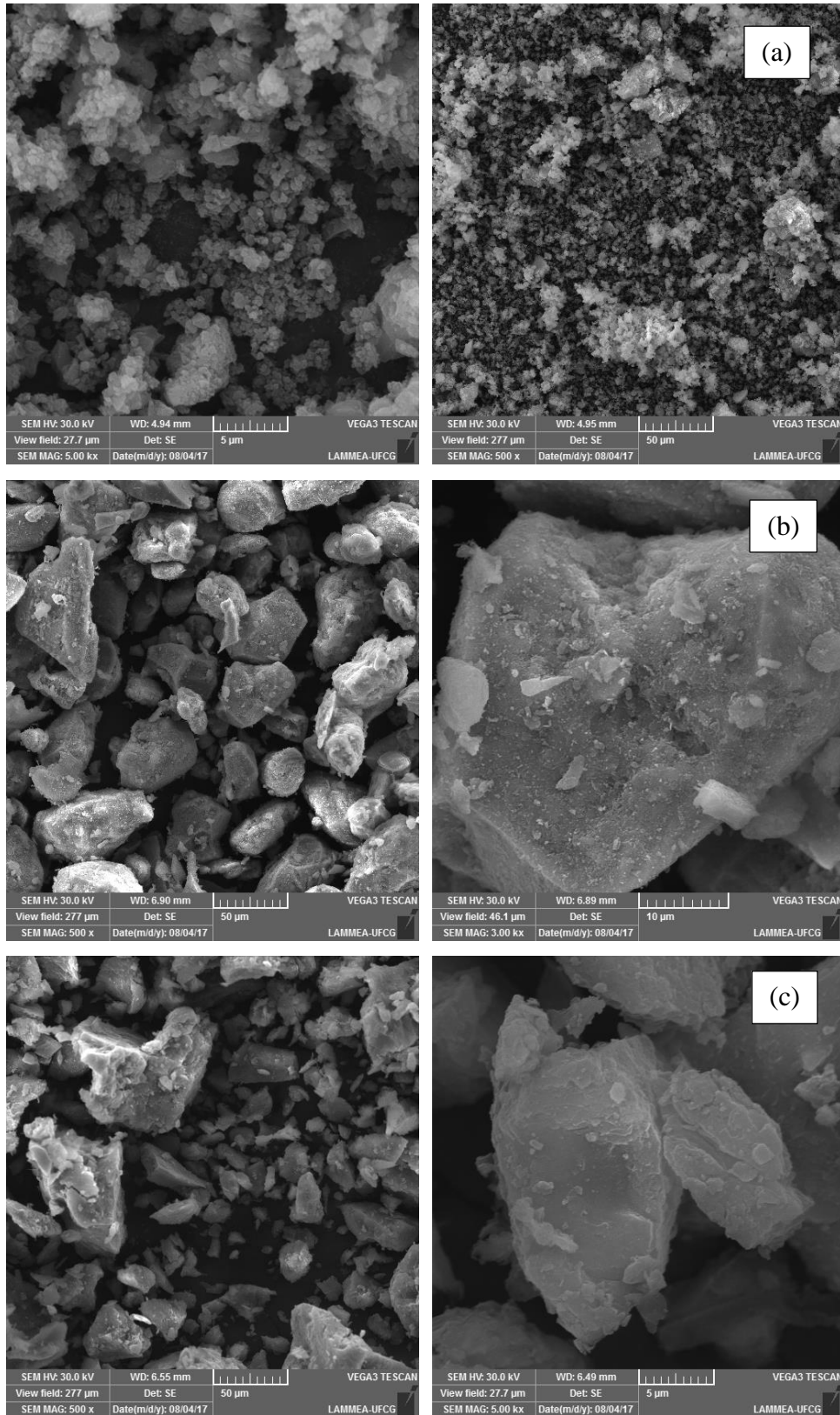


Figura 4.7 Imagens do MEV dos fíleres: (a) cal; (b) RMF; (c) lodo de ETA.

## 4.2 CARATERÍSTICAS FÍSICAS DOS LIGANTES ASFALTICOS MODIFICADOS

### 4.2.1 Efeito do envelhecimento a curto prazo – ensaio RTOFT

A Figuras 4.8 e 4.10 apresentam os resultados das perdas de massa que ocorrem durante o ensaio de envelhecimento a curto prazo RTOFT para os asfaltos modificados com elastômeros e fíleres respectivamente. A perda de massa é originada pela saída das frações químicas mais leves, tais como os saturados e os aromáticos e maltenos.

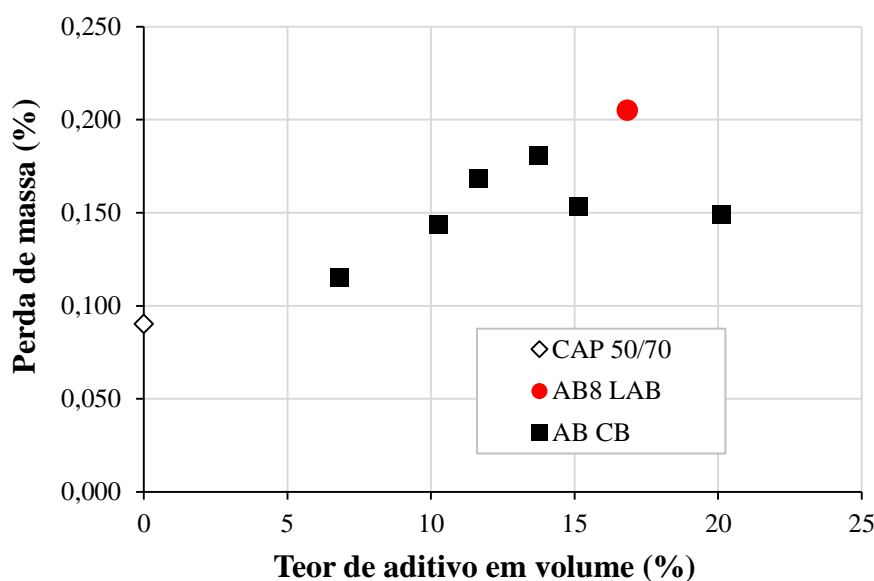


Figura 4.8 Perda de massa por envelhecimento a curto prazo RTFOT do asfalto modificado com elastômeros.

A partir da Figura 4.8 observa-se que o CAP 50/70 apresentou menor variação de massa em relação ao asfalto borracha (AB-8), fato atribuído a absorção dos maltenos, durante o processo de incorporação do polímero a borracha, que aumenta a quantidade de óleos (Muller *et al.*, 2012). O aumento dos óleos acarreta em uma maior volatilização no processo de envelhecimento, obtendo maior perda de massa em relação ao asfalto puro. Observa-se um acréscimo de perda de massa proporcional para teores com até 20% de AB CB. Para teores, em volume, de CB 15% e CB 20% observa-se um valor aproximadamente igual, sendo inferior ao obtido para 12% de AB CB. Observa-se que os asfaltos modificados com CB apresentam menores variações de massa em relação ao asfalto de referência AB-8. Entretanto, as variações estão dentro dos limites permitidos pelas especificações DNIT 095 (DNIT, 2006) e DNIT 111 (DNIT, 2009) para asfaltos convencionais e modificados respectivamente, sendo que para o CAP 50/70 é admissível até 0,5%, enquanto para o asfalto borracha AB-8 e AB-25 até 1%. Na Figura 4.9 verifica-se que a cal atua

contribuindo para reduzir a perda de massa nos ligantes asfálticos modificados com composto de borracha e pode, inclusive, ser a causa da redução mostrada na Figura 4.8 registrada para a adição do ligante asfáltico com composto de borracha a partir do teor de 15% em volume.

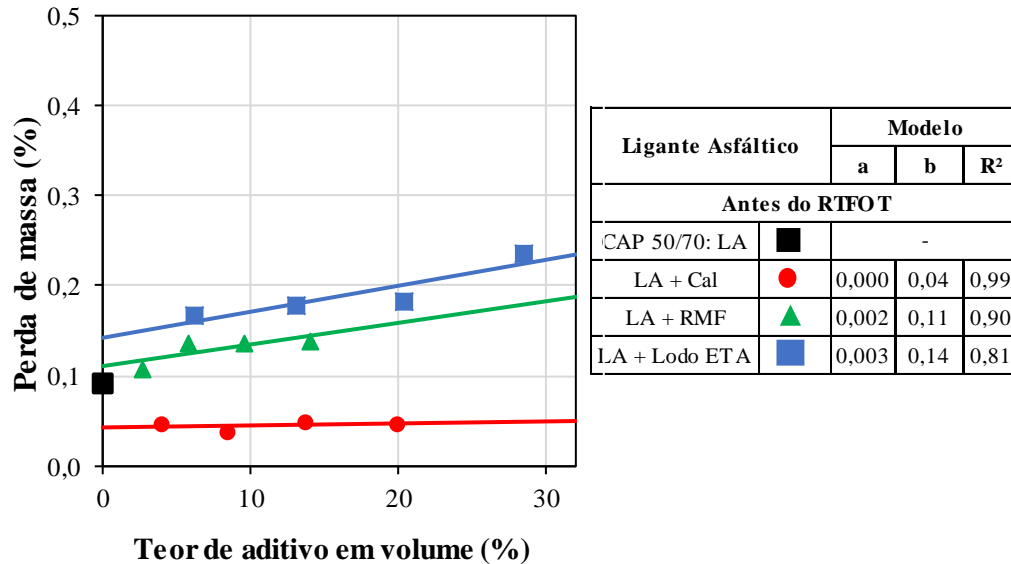


Figura 4.9 Perda de massa por envelhecimento a curto prazo RTFOT do asfalto modificado com fíleres.

Os ligantes asfálticos modificados com material fíler convencional apresentaram maior resistência ao envelhecimento, traduzida em menor perda de massa em relação à amostra do CAP 50/70. Esse fenômeno pode estar ligado às fixações intermoleculares entre a matriz de asfalto e o material fíler, podendo gerar maior afinidade entre os dois materiais. As maiores perdas de massa aconteceram para o ligante asfáltico modificado com lodo de ETA, seguido do asfalto modificado com RMF. Essas maiores variações podem ser atribuídas às volatilizações dos componentes químicos durante o processo de envelhecimento. Os resultados apresentam o mesmo padrão de comportamento ao observado nas análises ATD, sendo que a cal apresentou menor variação de massa, seguidamente do RMF e finalmente o lodo de ETA apresentou maior perda de massa. Todos os resultados foram inferiores ao máximo de 0,5% preconizado pelo DNIT 095 (DNIT, 2006).

Cabe aqui uma análise mais detalhada da influência do tipo de fíler nas perdas de massa mostradas na Figura 4.9. Se analisada a Figura 4.5 obtida nos ensaios de ATD se verifica que para as temperaturas de ensaio de perda de massa a cal e o RMF apresentam no ensaio ATD perdas de massa reduzidas e semelhantes. No entanto, o ferro é melhor transmissor do calor sendo provavelmente essa uma das causas que o levam à maior perda de massa do ligante asfáltico modificado com RMF em relação ao ligante asfáltico modificado com cal. A tendência da relação

perda de massa *versus* % volumétrica de fíler da mistura betume – RMF passar pelo resultado obtido para o CAP puro sinaliza para a confirmação dessa hipótese.

Para o lodo de ETA recorre-se para melhor entendimento à Figura 3.6 segundo a qual a perda de massa do lodo de ETA entre uma e duas horas foi de aproximadamente 1,1%, ou seja, em 85 minutos, que é a duração do RTFOT, essa perda seria de 1,55%. Portanto, considerando-se que se a relação entre a massa específica do lodo e do CAP é igual a 1,669, para 7% de lodo de ETA em volume (Figura 4.9) teria-se uma perda de 0,18 % em massa e para 28% uma perda de 0,72 %, ou seja, se considerada a perda própria do CAP 50/70, 0,1%, tem-se que a massa do lodo de ETA tende a ser menor quando do ligante asfáltico modificado com o lodo.

#### 4.2.2 Ensaio de Penetração

O resultado do ensaio de penetração indica a medida da consistência e rigidez do ligante asfáltico, sendo que menor penetração corresponde a maior consistência do material. As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam as penetrações para os ligantes asfálticos modificados com elastômeros e fíleres respectivamente, antes e após o do ensaio RTFOT. Para a visualização dos decréscimos da penetração, os resultados também são apresentados por meio da relação penetração/penetração do CAP 50/70 antes e após o RTFOT, segundo o caso.

Os resultados apresentados nas Figuras 4.10 e 4.11 apresentam a diminuição da penetração com o aumento do teor de material modificante no ligante asfáltico, tanto antes como após o procedimento de envelhecimento a curto prazo RTFOT, em relação a amostra de referência com CAP 50/70.

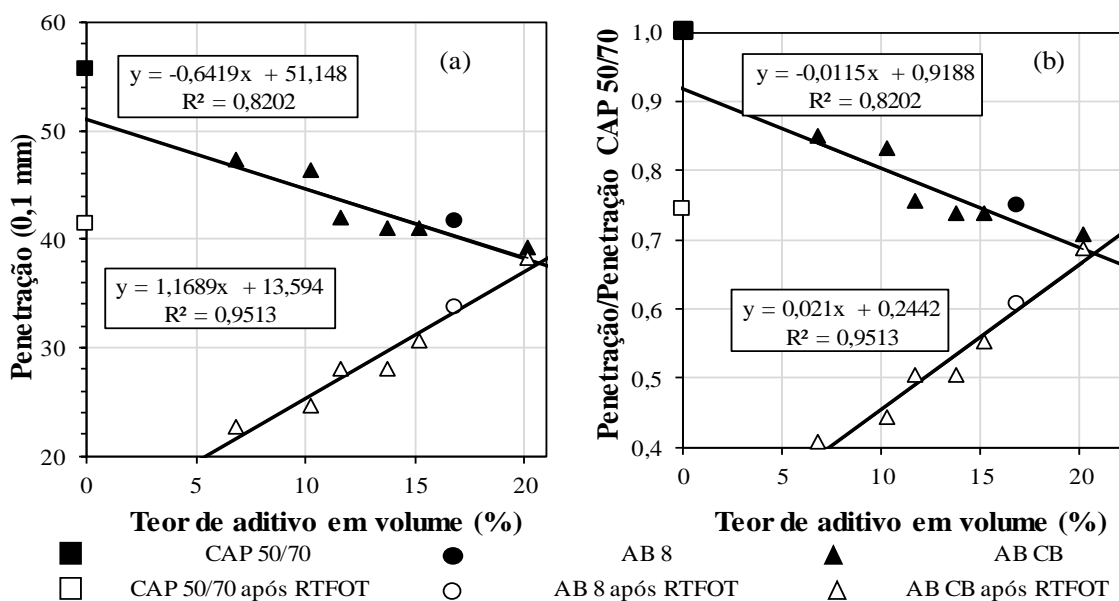


Figura 4.10. (a) penetração antes e após RTFOT de ligantes asfálticos modificados com elastômeros; (b) relação penetração/penetração CAP 50/70.

No caso dos ligantes asfálticos modificados com elastômeros, os modificados com composto de borracha apresentaram diminuição da penetração com o aumento do teor de composto de borracha, sendo que para teores de 20% de aditivo ocorreu uma diminuição de até 30% em relação ao CAP 50/70 antes do envelhecimento RTFOT. Além disso, pode-se observar aumento da penetração em função do acréscimo do teor de material modificante, após a condição de envelhecimento a curto prazo. A Figura 4.10 mostra que o asfalto borracha de referência AB8 (sem a adição de cal) se situaram, tanto antes como após o ensaio RTFOT, nas mesmas tendências obtidas para os ligantes asfálticos com compostos de borracha (contendo cal), o que aponta para a não influência da cal na resistência à penetração. Consta-se que antes do envelhecimento a penetração obtida para o CAP 50/70 se aproxima da tendência que se observa para os ligantes asfálticos com composto de borracha. No entanto, após o ensaio RTFOT o CAP 50/70 foge à tendência apontada para os ligantes asfálticos com composto de borracha em função do teor de borracha e a penetração obtida para o CAP 50/70 puro só será encontrada para teores de borracha superiores a 20%, ou seja, a redução na penetração com o aumento do teor de borracha antes do envelhecimento reflete negativamente após o envelhecimento indicando que para definir o teor ideal de borracha é conveniente que se estude os ligantes asfálticos antes e após envelhecimento. Desta forma, a cal contribui à estabilização da penetração após RTFOT.

O ligante asfáltico modificado com cal antes do RTFOT apresentou menor variação da penetração com o acréscimo de aditivo incorporado em relação aos ligantes asfálticos modificados com lodo de ETA e RMF, sendo que para teores de 30% de aditivo se obteve uma diminuição de 40% na penetração em relação ao CAP 50/70. Porém, após o RTFOT os ligantes asfálticos modificados com cal passaram a apresentar maior redução na penetração sinalizando para o fato de que a estrutura da cal, extremamente agregada e contendo poros de superfície (Figura 4.7 a) estaria, em função do tratamento dado no processo de envelhecimento, se interagindo melhor com o CAP 50/70.

No caso do ligante asfáltico modificado com lodo de ETA pode-se observar menores valores de penetração, no que diz respeito às amostras estudadas antes do RTFOT, indicando maior consistência. O aumento da consistência, traduzido na diminuição da penetração, acontece provavelmente devido a presença de partículas de fíler e superfícies de contato entre os materiais CAP-fíler. Observando as estruturas dos fíleres mostradas na Figura 4.7 esperava-se maiores interações com a cal, no entanto, com base nas penetrações elas foram melhores para os fíleres lodo de ETA e RMF cabendo destaque a semelhança estrutural entre esses dois fíleres e o

paralelismos entre as curvas de penetração obtidas para os dois materiais (Figura 4.9). Destaca-se que esse paralelismo tende a se manter após o ensaio de RTFOT.

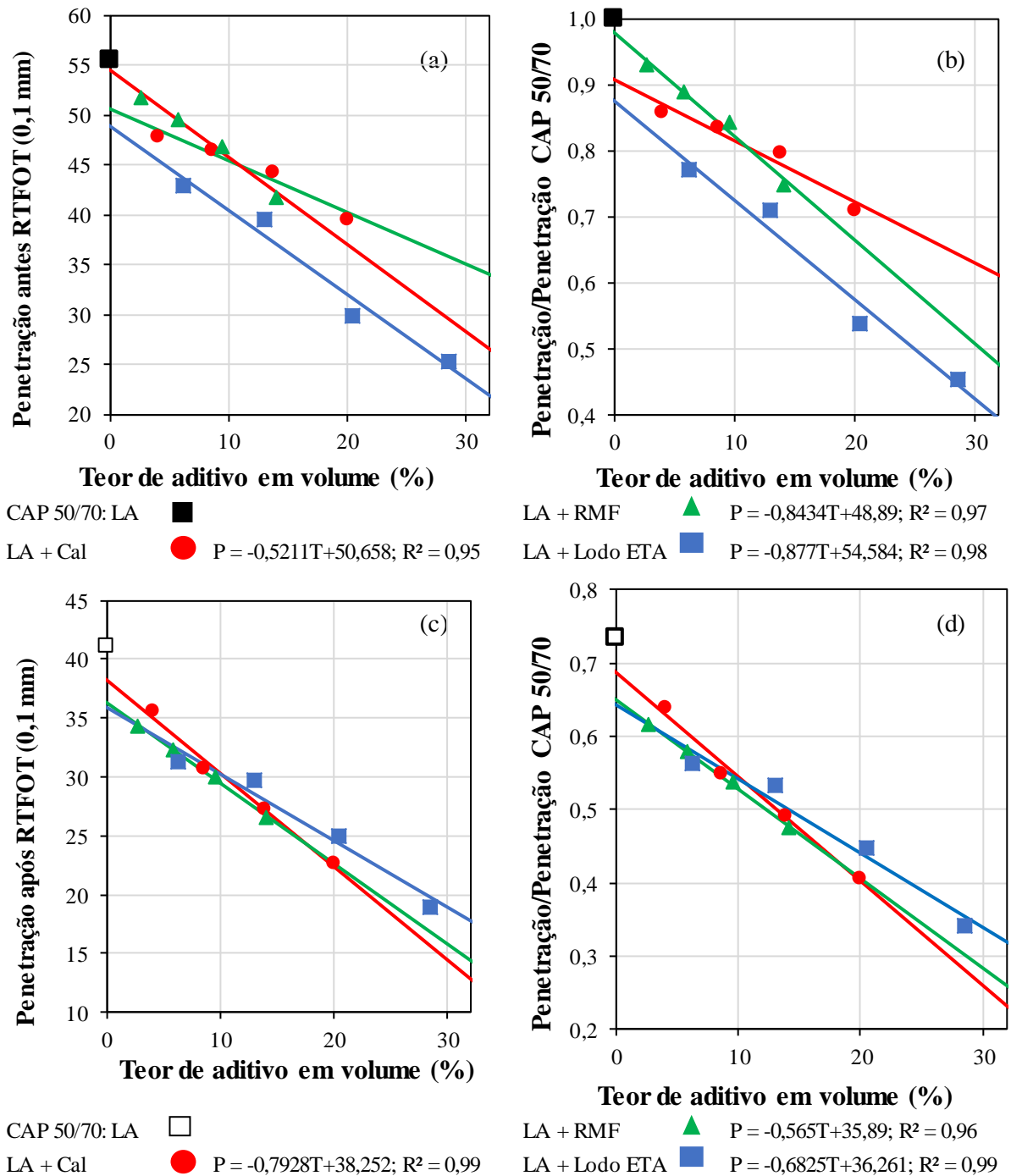


Figura 4.11 Penetração de ligantes asfálticos modificados com fíleres: (a) antes o RTFOT; (b) penetração/penetração CAP 50/70 antes o RTFOT; (c) após o RTFOT; (d) penetração/penetração CAP 50/70 após o RTFOT.

No caso dos ligantes asfálticos modificados com os fíleres alternativos como o lodo de ETA e RMF, os aumentos da rigidez originados pela diminuição da penetração podem ser atribuídos às

características eletroquímicas dos principais compostos químicos, sendo que a presença de alumínio e sílica no lodo de ETA e o ferro no RMF contribuem para o aumento da consistência dos ligante asfáltico CAP 50/70. No processo de envelhecimento a curto prazo RTFOT acontece perda das frações ou componentes mais leves do ligante asfáltico, obtendo-se uma maior consistência. Observa-se que após envelhecimento a curto prazo, os valores de penetração obtidos para os três fíleres são semelhantes.

### 4.2.3 Penetração Retida

A Figura 4.12 indica o efeito do envelhecimento à curto prazo na penetração, na forma de penetração retida, para os ligantes asfálticos modificados com elastômeros do tipo borracha. Esta corresponde à razão em percentual entre a penetração da amostra após do RTFOT e a penetração da amostra virgem. Segundo as especificações DNIT 095 (DNIT, 2006) e DNIT 111 (DNIT, 2009) para asfaltos convencionais e modificados, o valor mínimo admissível de penetração retida deve ser 55%. Ligantes asfálticos com penetrações inferiores a 55% indicam misturas asfálticas com maior susceptibilidade ao envelhecimento.

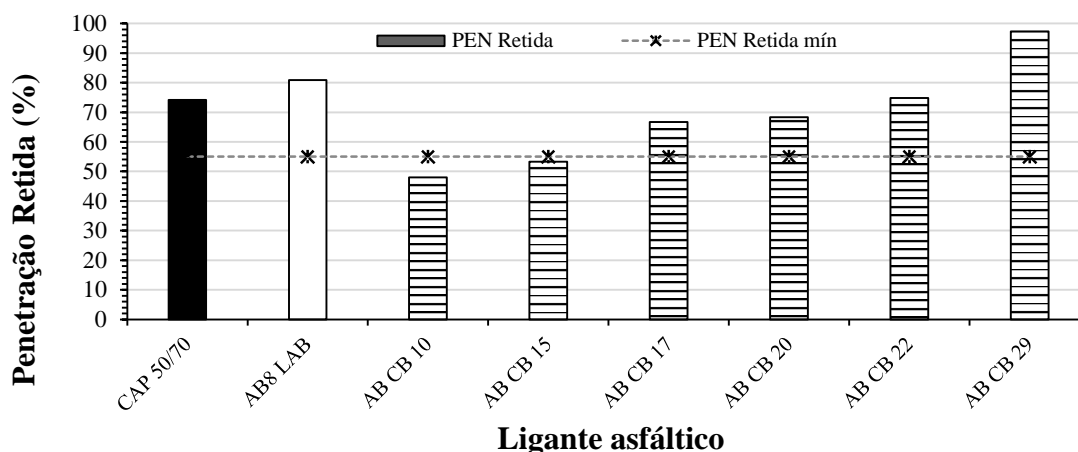


Figura 4.12 Penetração retida antes de asfaltos modificado com elastômeros.

A partir da Figura 4.12 observa-se que o CAP 50/70 apresentou menor percentual de penetração retida em relação à amostra AB8. Este fato pode ser atribuído à susceptibilidade térmica do material, sendo que o CAP 50/70 apresenta variações das características físicas em função do efeito da temperatura e oxidação maior que o asfalto AB8. Os ligantes asfálticos modificados com composto de borracha CB apresentaram aumento da penetração retida de forma proporcional ao teor de aditivo adicionado. O asfalto modificado com 29% CB manteve constante os valores de penetração antes e após o envelhecimento. Este fato pode ser atribuído ao aumento excessivo da consistência do ligante asfáltico que não originou espalhamento nas paredes do frasco, entretanto



o ligante asfáltico AB CB 29 não experimentou na sua totalidade o efeito da oxidação no envelhecimento.

Cabe aqui uma melhor análise sobre o efeito da cal nas misturas AB CB. Essas misturas conforme já indicado no item 3.2.1 são compostas por 62% de borracha, 16% de cal e 22% de CAP 50/70. Logo, a mistura AB CB 29 teria um teor de borracha (17,98%) aproximadamente igual à mistura AB8 (17%). Nesse caso específico a cal aparece contribuindo para o aumento da penetração retida. No entanto, nos demais casos, considerando-se que a borracha segundo a mistura AB8 contribui para o aumento da penetração retida, a cal teria contribuído para a sua redução. Esse efeito é confirmado na Figura 4.13 quando se analisa o efeito da cal sobre a penetração retida.

A Figura 4.13 apresenta os resultados da penetração retida para os ligantes modificados com fíleres. Os resultados apresentam-se superiores ao valor mínimo exigido de 55% pela especificação do DNIT 095 (DNIT, 2006) para o caso do CAP 50/70. Os asfaltos modificados com fíleres apresentaram um padrão de comportamento em relação ao teor de aditivo incorporado. O Ligante asfáltico modificado com RMF apresentou menores variações da penetração retida em relação ao teor de aditivo incorporado, fato atribuído à tendência gerada na variação da perda de massa no processo de envelhecimento guardar certo paralelismo com os resultados obtidos antes do tratamento. Por último, os ligantes asfálticos modificados com os lodos de ETA apresentaram maiores valores de penetração retida em relação ao CAP 50/70, fato que pode ser atribuído à elevada consistência desenvolvida no processo e incorporação e oxidação do ligante asfáltico cabendo destaque, no entanto, que a partir de um determinado teor de lodo incorporado a penetração retida passa a diminuir, ou seja, deve-se buscar o teor ótimo, que nesse caso específico é 30%. Entretanto, outras análises como a sedimentação dos grãos e as características reológicas devem ser analisadas.

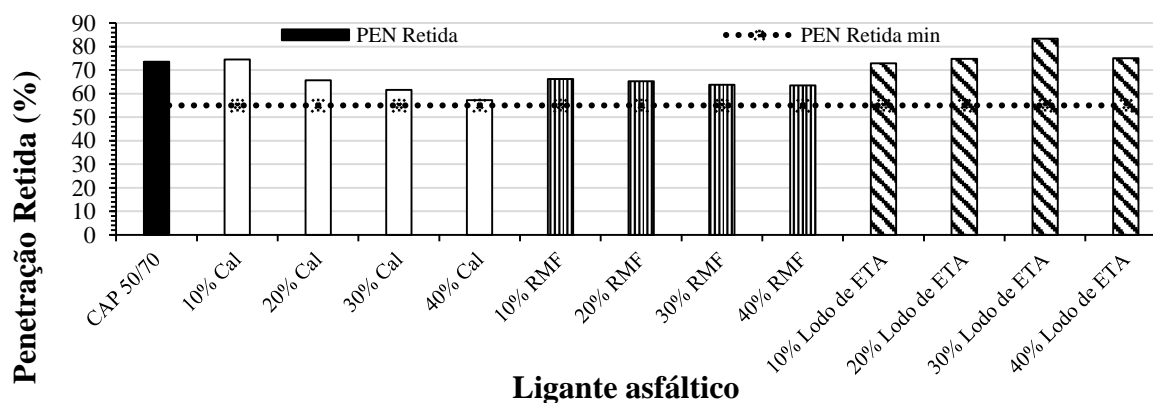


Figura 4.13 Penetração retida de asfaltos modificado com fíleres.

#### 4.2.4 Ensaio de Ponto de Amolecimento

Os resultados do ponto de amolecimento são considerados, empiricamente, como a temperatura na qual o asfalto amolece e apresenta a condição de escoamento. A importância deste parâmetro está relacionada com a resistência às deformações permanentes e ocorrência de afundamento de trilha de roda, sendo que asfaltos modificados de maior consistência apresentam maiores pontos de amolecimento. As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam os resultados do ensaio do ponto de amolecimento para os asfaltos modificados com elastômeros e fíleres respectivamente, antes e após o RTFOT. De forma geral, os resultados indicam aumento do ponto de amolecimento com o incremento do teor de material modificador.

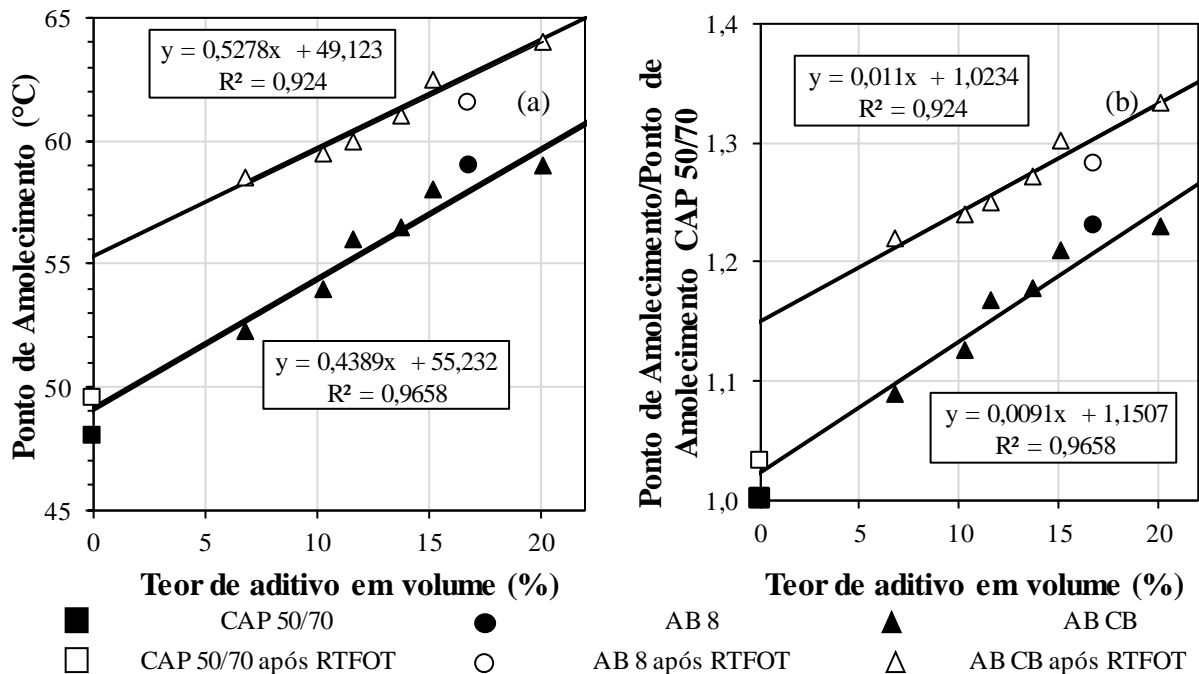


Figura 4.14 (a) Ensaio de ponto de amolecimento antes e após RTFOT de ligantes asfálticos modificados com elastômeros; (b) relação ponto de amolecimento/ponto de amolecimento CAP 50/70.

No ensaio do ponto de amolecimento, observa-se aumento em 2 °C para o CAP 50/70 puro após o RTFOT (Figura 4.14). No caso do AB8 LAB, o aumento do ponto de amolecimento após o RTFOT foi de 2,5 °C conforme mostrado na mesma figura. Já nos asfaltos modificados com o composto de borracha, observa-se maior aumento da temperatura de amolecimento para todos os casos em aproximadamente 5 °C, atribuída provavelmente à incorporação da cal. No entanto, pode-se observar uma tendência de paralelismo nos gráficos antes e após do RTFOT, atribuída ao processo de envelhecimento.

Observa-se na Figura 4.14 que os resultados obtidos para os ligantes asfálticos AB8 se situam dentro das tendências obtidas para as misturas AB CB antes e após os ensaios RTFOT o que sinaliza para a pouca influência da cal sobre o ponto de amolecimento obtido para os ligantes asfálticos com borracha. A maior horizontalidade da tendência dos resultados obtidos para os ligantes asfálticos com o fíler cal, mostrados na Figura 4.15, corroboram com esse entendimento, lembrando que nos ligantes asfálticos com composto de borracha o teor máximo de cal usado foi de 1,7% em volume, 4,6% em peso.

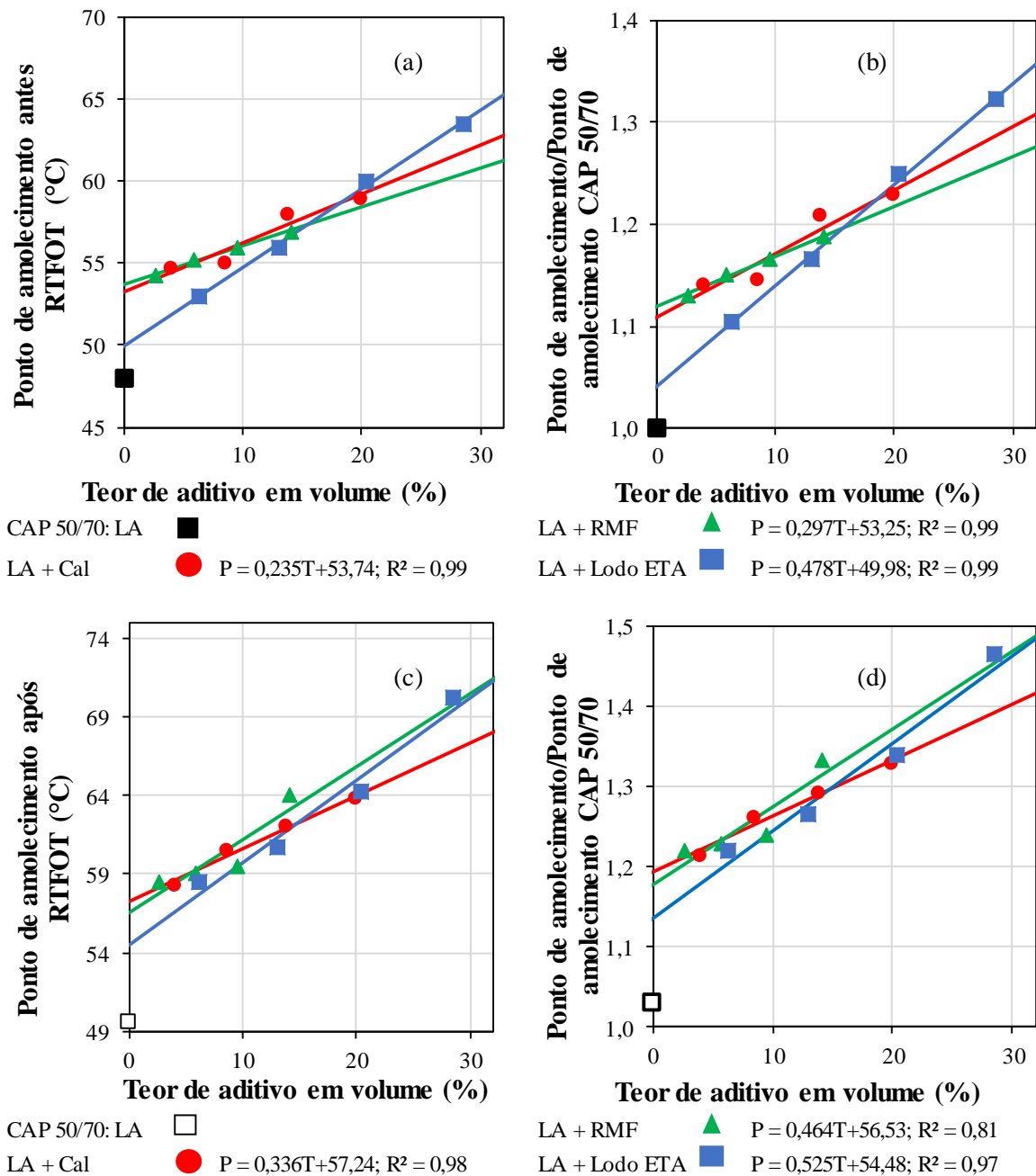


Figura 4.15 Ponto de amolecimento de ligantes asfálticos modificados com fíleres: (a) antes o RTFOT; (b) ponto de amolecimento/ponto de amolecimento CAP 50/70 antes o RTFOT; (c) após o RTFOT; (d) ponto de amolecimento/ponto de amolecimento CAP 50/70 após o RTFOT.

Asfaltos modificados com fíleres, avaliados antes e após o RTFOT, apresentaram aumento do ponto de amolecimento, em função do teor volumétrico incorporado, em relação ao asfalto de referência CAP 50/70. Neste caso, o asfalto modificado com lodo de ETA apresentou maiores acréscimos da temperatura de amolecimento em função do teor volumétrico adicionado. No sentido contrário, os menores acréscimos foram apresentados para o asfalto modificado com cal. Todos os ligantes asfálticos estudados apresentaram aumento do ponto de amolecimento inferior ao preconizado na especificação DNIT 095 (DNIT, 2006), 8°C para o CAP 50/70, sendo que as variações do ponto de amolecimento aumentaram com teor volumétrico de fíler adicionado.

De forma geral, a diminuição do valor da penetração e o aumento do ponto de amolecimento em asfaltos modificados acarretou o aumento da consistência na mistura asfáltica que, associada a temperaturas elevadas de serviço, contribui para a prevenção de trincas por fadiga e minimiza a ocorrência de trilha de roda, elementos que são considerados os principais defeitos em revestimentos de pavimentos flexíveis.

#### 4.2.5 Índice de Suscetibilidade Térmica (IST) ou Índice de Penetração (IP)

O índice de suscetibilidade térmica IST para os asfaltos modificados com elastômeros e fíleres estão apresentados nas Figuras 4.16 e 4.17, respetivamente. De forma geral, a faixa de variação do IST oscila entre -1,5 e +1,0, onde -1,5 indica muita sensibilidade térmica e +1 pouco sensibilidade térmica.

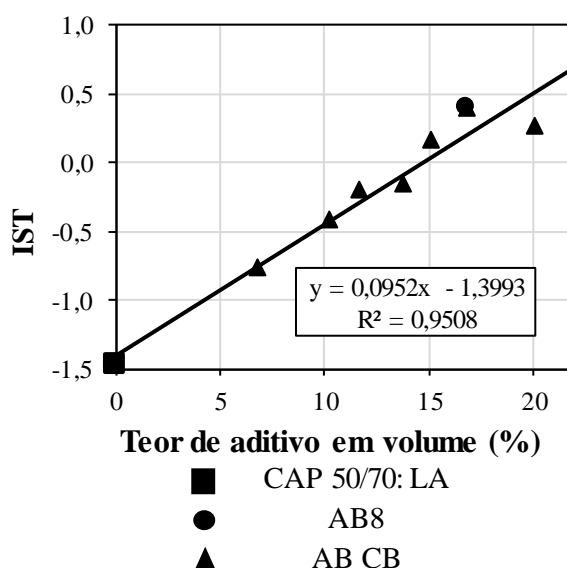


Figura 4.16 Índice de Suscetibilidade Térmica de ligantes asfálticos modificados com elastômeros.

A Figura 4.16 evidencia aumento do IST em função do teor de elastômero em relação ao CAP 50/70, indicando menor susceptibilidade térmica do ligante asfáltico, o que contribui para melhora do desempenho da mistura asfáltica ante às oscilações térmicas. Neste sentido, o asfalto CAP 50/70 apresenta melhoria na susceptibilidade térmica, ao ser acrescido de elastômeros do tipo borracha em percentuais volumétricos entre 10% e 20%.

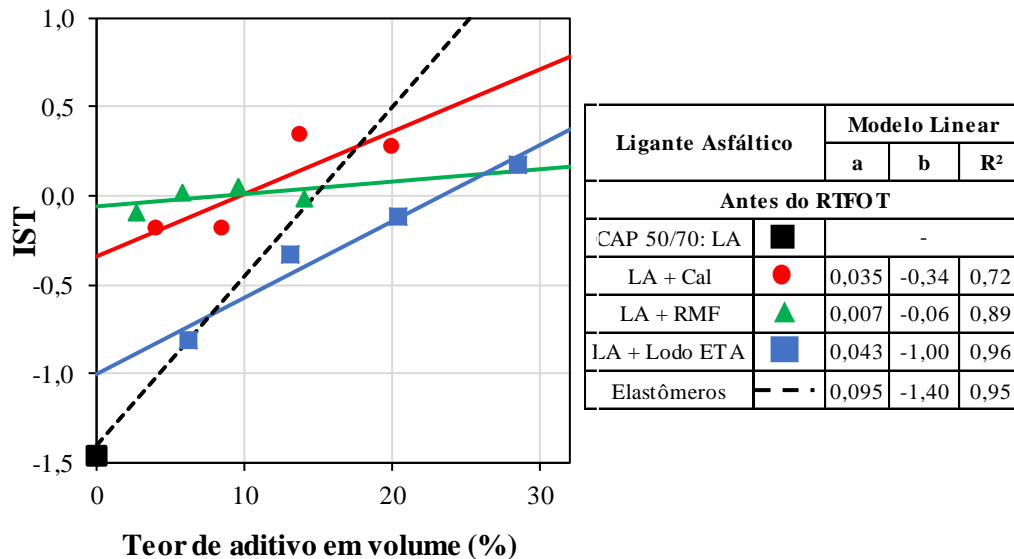


Figura 4.17 Índice de Susceptibilidade Térmica de ligantes asfálticos modificados com fíleres.

A partir dos resultados apresentados na Figura 4.17, os ligantes asfálticos modificados com cal e com RMF, apresentaram tendência a um único valor do IST para todos os teores avaliados. Os ligantes modificados com o lodo de ETA apresentaram aumentos proporcionais ao teor de aditivo sendo estes, no entanto inferiores aos obtidos para os demais fíleres. De forma geral, observa-se aumento significativo do IST pela presença dos materiais modificadores, devido às alterações nas propriedades físicas (aumento do ponto de amolecimento e diminuição da penetração), atingindo uma condição mais satisfatória para o asfalto CAP 50/70, que por sua vez apresentou o IST perto do limite inferior da especificação.

Asfaltos com IST maiores que +1.0 indicam asfaltos oxidados que são pouco sensíveis a elevadas temperaturas e quebradiços a baixas temperaturas. Enquanto que valores inferiores a -1.5 indicam asfaltos muito sensíveis às variações das temperaturas. Apesar do IST ser um parâmetro de avaliação empírica, este é considerado em caráter estimativo como válido na avaliação do comportamento reológico dos ligantes asfálticos. No caso dos materiais fíleres observa-se que os ligantes asfálticos com lodo de ETA em percentuais volumétricos entre 10% e 20%, apresentam melhoria na susceptibilidade térmica do CAP 50/70. No caso dos ligantes

asfálticos com fíleres do tipo cal houve uma melhoria em referência ao CAP 50/70 para teores volumétricos inferiores ao 20% de aditivo, enquanto que para o ligante asfáltico com RMF apresentou-se tendência a zero para qualquer teor de aditivo adicionado.

Plotando-se na Figura 4.17 a linha de tendência obtida para a borracha na figura 4.16 se observa que a melhoria do comportamento foi mais substancial para os fíleres cal e RMF.

#### 4.2.6 Ensaio de Ductilidade

O ensaio de ductilidade determina de forma indireta a coesão entre os agregados e o ligante asfáltico (Gouveia, 2013). A Figura 4.18 apresenta os resultados do ensaio de ductilidade dos ligantes asfálticos modificados com elastômeros antes e após o RTFOT.

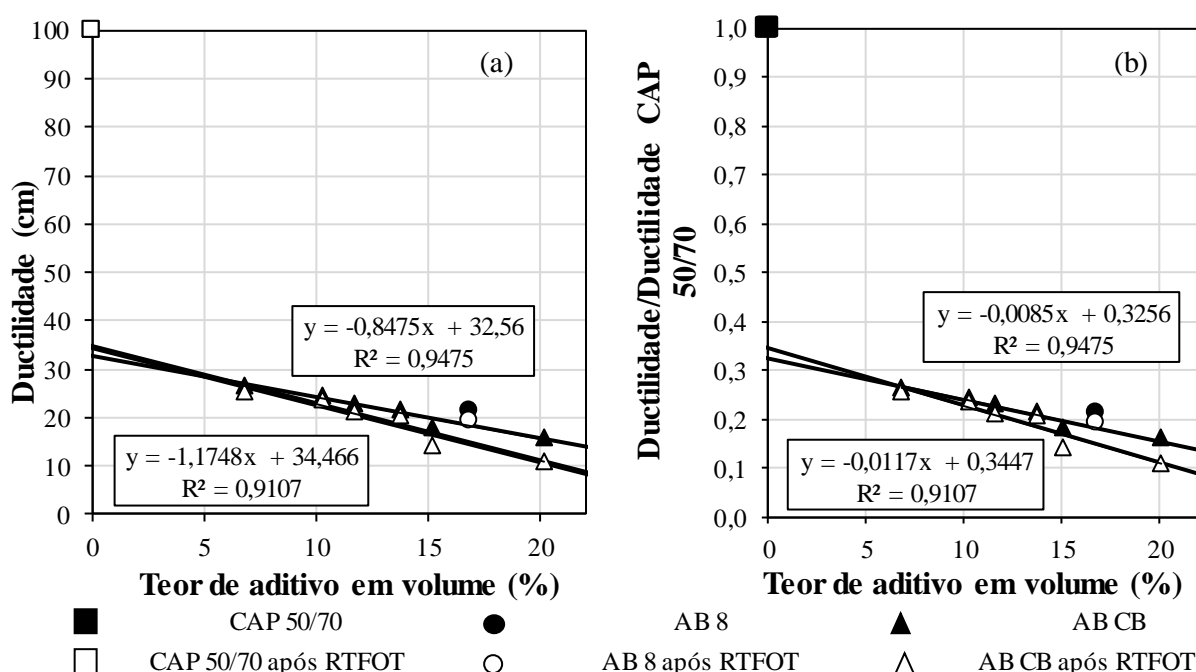


Figura 4.18 (a) Ensaio de ductilidade antes e após RTFOT de ligantes asfálticos modificados com elastômeros; (b) relação ductilidade/ductilidade CAP 50/70.

A incorporação de composto de borracha diminui de modo significativo a ductilidade do ligante asfáltico puro CAP 50/70, entretanto as variações de um teor para outro são pequenas e as reduções após o RTFOT são insignificantes em relação aos resultados obtidos para antes do RTFOT. Comparando-se os resultados obtidos para o ligante asfáltico AB8 (borracha sem cal) com aqueles onde se incorporou cal às misturas com borracha conclui-se que a contribuição da cal para a redução da ductibilidade é muito pequena e compatível, considerando-se o teor de cal incorporada à borracha, com os resultados obtidos para o fíler cal antes do RTFOT (Figura 4.19 a).

A Figura 4.19 apresenta os resultados dos ensaios de ductilidade para os asfaltos modificados com material fíler, antes e após o RTFOT, assim como também são apresentados por meio da relação ductilidade/ductilidade do CAP 50/70 antes e após o RTFOT, segundo o caso.

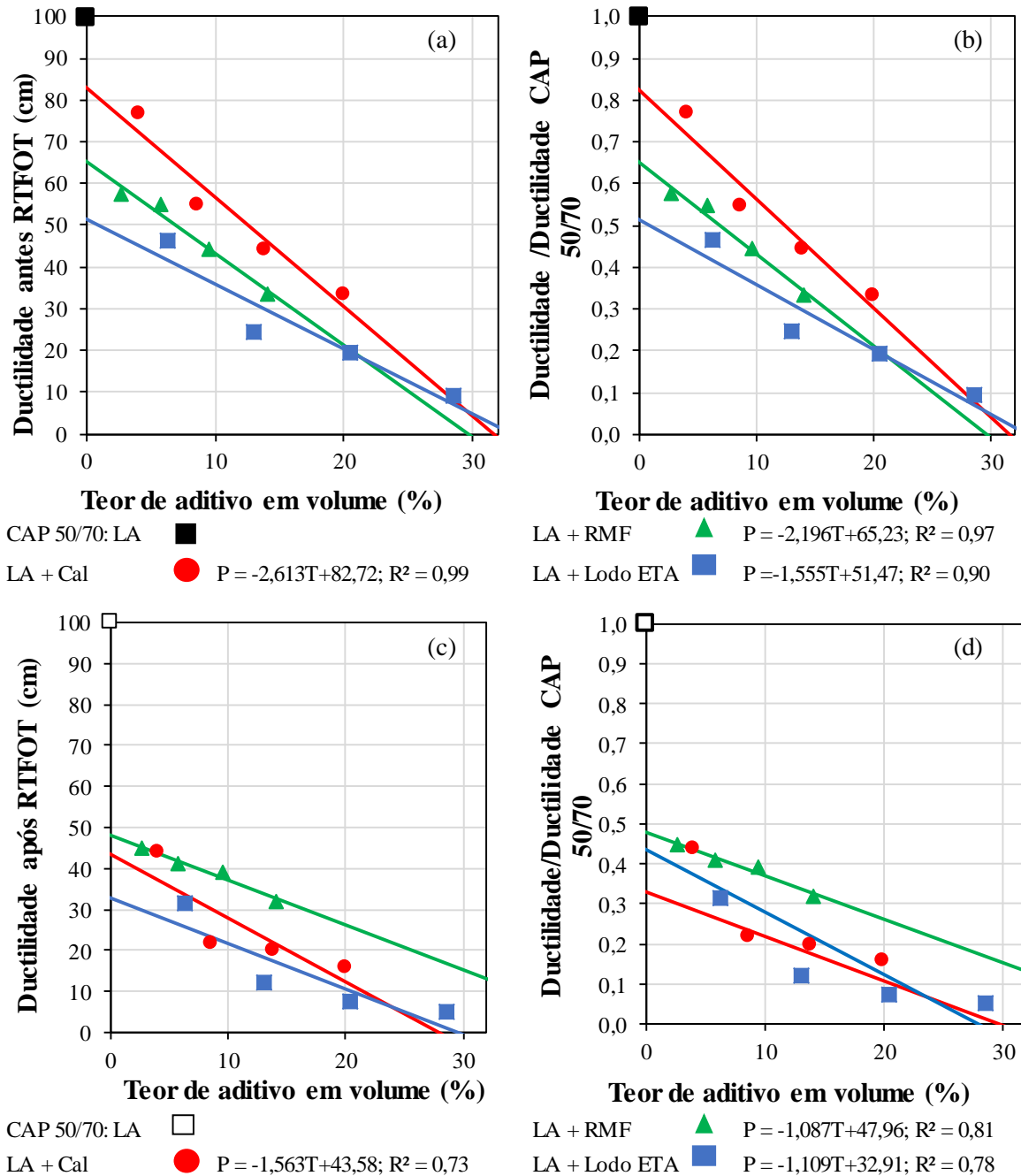


Figura 4.19 Ductilidade de ligantes asfálticos modificados com fíleres: (a) antes o RTFOT; (b) ductilidade/ductilidade CAP 50/70 antes o RTFOT; (c) após o RTFOT; (d) ductilidade/ductilidade CAP 50/70 após o RTFOT.

Observa-se a partir da Figura 4.19, que tanto para o ligante asfáltico modificado com fíler cal como para o modificado como lodo de ETA ocorre antes e após o RTFOT uma grande redução da

ductibilidade para os menores teores de fíler e depois essa redução passa a ser menor com o aumento do teor de fíler. Para o fíler RMF após a grande redução registrada para o menor teor de fíler as variações da ductibilidade com teor de fíler tendem a ser constantes.

Para percentuais menores que 20% de aditivo em volume nos ensaios antes do RTFOT, observa-se maior perda da ductilidade no ligante asfáltico modificado com lodo de ETA, seguidamente do ligante modificado com RMF e finalmente o ligante modificado com cal. Os decréscimos da ductilidade, ou rompimentos mais rápidos da amostra no equipamento, podem ser atribuídos às descontinuidades geradas na interfase asfalto-grão ou à forma da partícula de fíler. Neste contexto, devido ao tamanho dos grãos da cal e à presença de cálcio, criam-se diversos pontos de contato que contribuem para a adesividade do ligante asfáltico e conseqüentemente para uma menor perda da ductilidade em relação às amostras em estudo. Os grãos do fíler cal apresentam maior rugosidade na superfície, segundo as imagens apresentadas no item 4.1.2.6, implicando em maior intertravamento ou interação fíler ligante asfáltico e conseqüentemente menor perda da ductilidade ao ser comparada com a amostra de referência do CAP 50/70. Finalmente, observa-se que as maiores perdas de ductilidade do ligante asfáltico com lodo de ETA em relação à amostra de CAP 50/70, pode estar relacionada à forma laminar das partículas de fíler assim como à natureza de suas cargas de superfície. Após a condição RTFOT, observa-se maiores decréscimos da ductilidade das misturas em relação ao CAP 50/70, fato que pode ser atribuído à oxidação do ligante, o que os torna mais quebradiços. Cabe destaque a observação de que as misturas com RMF foram as que menos variaram com o RTFOT e as misturas com cal as que mais sofreram redução na ductibilidade.

#### **4.2.7 Ensaio de Viscosidade rotacional**

A viscosidade pode ser entendida como a resistência que tem um material a fluir sobre uma superfície, sendo uma medida indireta da consistência e rigidez do ligante asfáltico (Rondon, 2015). A Figura 4.20 apresenta os resultados da viscosidade rotacional antes do RTFOT dos asfaltos modificados com diferentes teores gravimétricos de elastômeros do tipo borracha.

A Figura 4.20 indica, antes do RTFOT, aumento proporcional da viscosidade em função do teor de composto de borracha adicionado ao CAP 50/70. A Figura 4.21 apresenta os resultados da viscosidade antes e após o RTFOT para as temperaturas de 135 °C, 150 °C e 177 °C, a fim de observar os incrementos da viscosidade com o teor de aditivo em volume. Os aumentos de viscosidade são atribuídos ao aumento da espessura da película ou filme do ligante asfáltico devido a adição do elastômero tipo borracha e o composto de borracha.



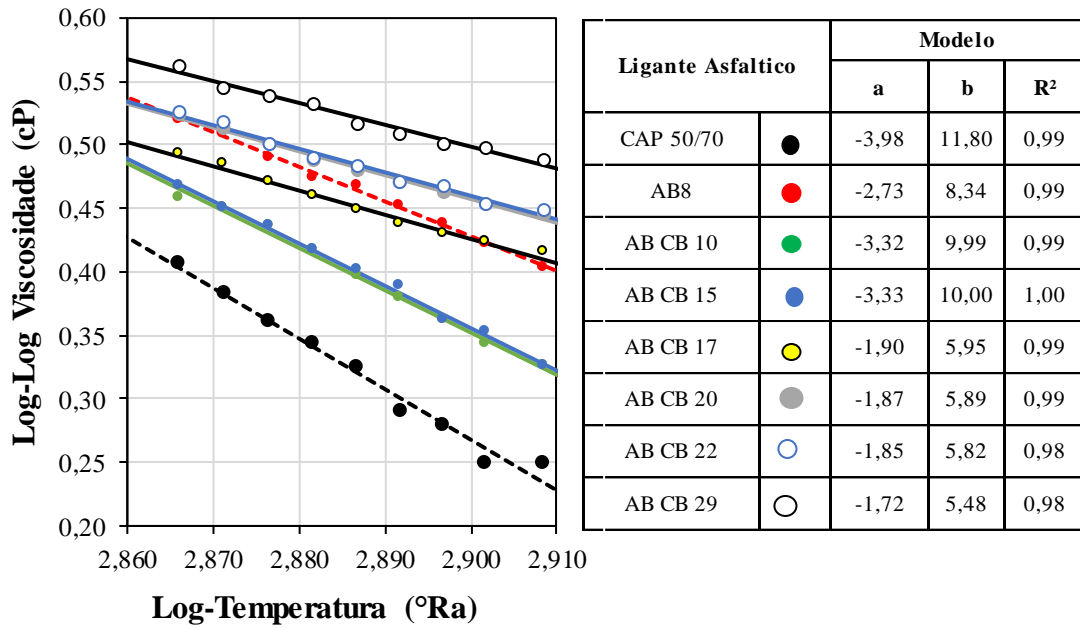


Figura 4.20 Ensaio de viscosidade de CAP 50/70 puro e modificado com elastômeros.

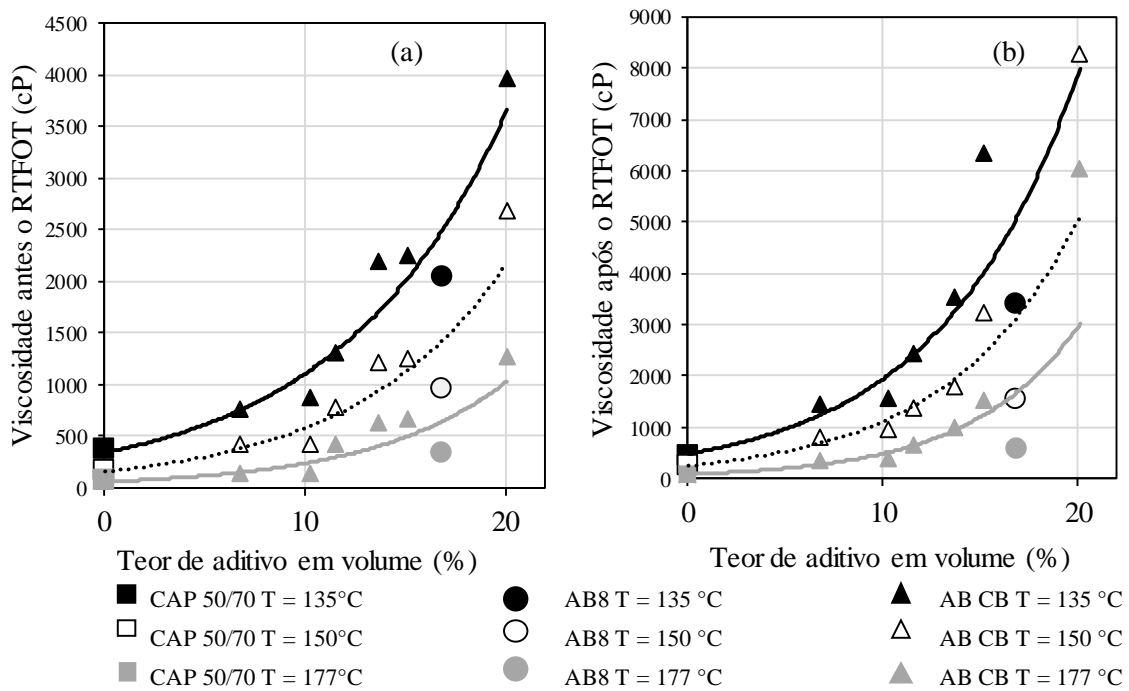


Figura 4.21 Variação da viscosidade com o teor de aditivo em volume: (a) antes e (b) após o RTFOT.

A partir dos resultados apresentados na Figura 4.21, pode-se observar uma tendência do comportamento da viscosidade para cada temperatura avaliada (135 °C, 150 °C e 177 °C) em função do teor de aditivo em volume adicionado, seja borracha (AB8) ou composto de borracha (AB CB). As tendências consideraram a amostra de referência com CAP 50/70 atendendo 0% de

aditivo. A Tabela 4.4 apresenta os modelos exponenciais para a viscosidade *versus* o teor de aditivo volumétrico nas temperaturas de 135 °C, 150 °C e 177 °C.

Tabela 4.4 Modelos exponenciais para a viscosidade *versus* o teor de aditivo volumétrico.

Temperatura [°C]	Antes o RTFOT		Após o RTFOT	
	Modelo Exponencial	R <sup>2</sup>	Modelo Exponencial	R <sup>2</sup>
135	$V^* = 332,96 e^{0,1193T^*}$	0,9527	$V = 476,5 e^{0,1406T}$	0,8948
150	$V = 151,76 e^{0,1326T}$	0,9214	$V = 242,1 e^{0,1518T}$	0,8790
177	$V = 52,424 e^{0,1481T}$	0,8367	$V = 43,469 e^{0,1786T}$	0,6980

V, Viscosidade; T, Temperatura.

A partir da Tabela 4.4 pode-se observar que a viscosidade dos ligantes asfálticos modificados com elastômeros depende do teor volumétrico adicionado. Neste sentido, os ligantes analisados para as temperaturas de 135°C e 150 °C antes e após o RTFOT atingiram coeficientes correlação R<sup>2</sup> superiores a 0,88. Enquanto que as correlações para a temperatura de avaliação de 177 °C, apresentaram valores de 0,83 e 0,70 para a condição antes e após o RTFOT respectivamente.

Pelo método da equi-viscosidade determinou-se temperaturas de usinagem e compactação médias da mistura asfáltica para viscosidades entre 170±20 cP e 280±20 cP respectivamente, os resultados são apresentados na Figura 4.22.

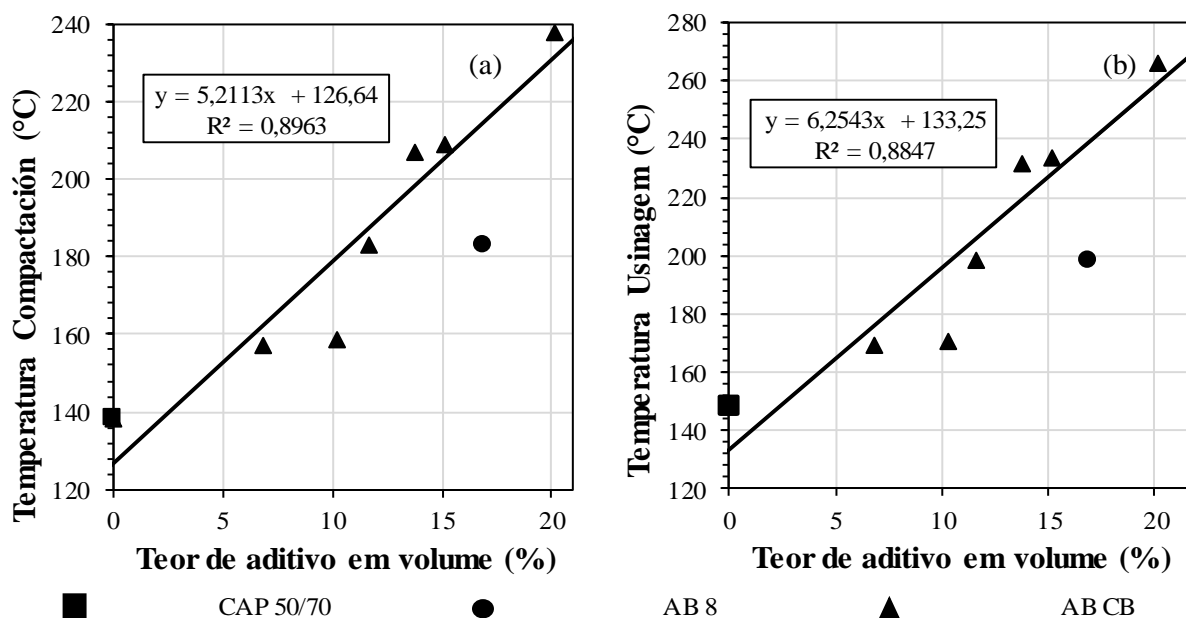


Figura 4.22 Temperaturas médias de: (a) compactação e; (b) usinagem de ligantes asfálticos modificados com elastômeros do tipo borracha.

Os ligantes com teores de AB CB superiores a 15% apresentam elevadas viscosidades, inviabilizando a utilização do método da equi-viscosidade para a determinação das faixas de temperatura de usinagem e compactação recomendadas pela especificação DNIT 043 (DNIT, 1995). Nesse sentido, destaca-se que os resultados apresentados nas Figuras 4.22 não podem ser atingidos na prática da engenharia devido ao envelhecimento excessivo que se teria para o ligante asfáltico e em virtude disso, o Instituto de Asfalto (1994) recomenda empiricamente a redução entre 14 °C e 25 °C para a determinação das temperaturas de usinagem e compactação em ligantes asfálticos modificados (Anderson *et al.*, 1994). A norma DNIT 112 (DNIT, 2009) especifica a faixa de aquecimento do asfalto borracha pela via úmida entre 170 °C e 180 °C.

A partir dos gráficos do log-log viscosidade *versus* log-temperatura determinou-se o índice de susceptibilidade da viscosidade à temperatura SVT conforme a Equação 3.4. Assim, a Figura 4.23 apresenta o SVT para os ligantes asfálticos modificados com elastômeros antes do RTFOT. Ligantes asfáltico apresentam valores típicos do SVT entre 3 e 4, sendo que maiores valores indicam maior susceptibilidade térmica. Neste contexto, observa-se que os asfaltos modificados com elastômero diminuí o SVT em função do aumento do teor de aditivo, sendo que a presença da cal no composto de borracha contribui para a diminuição do SVT.

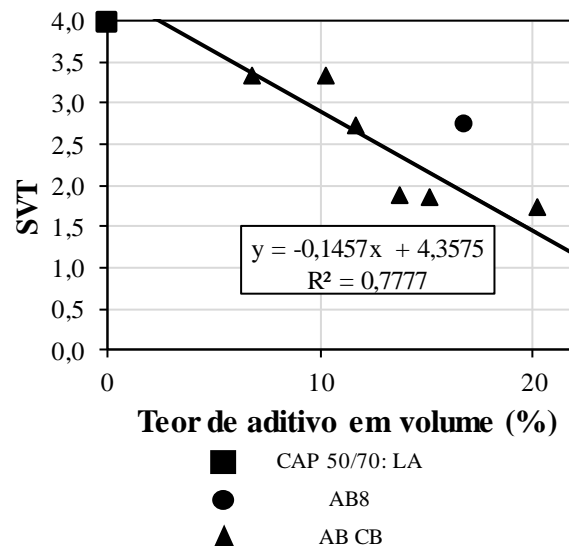


Figura 4.23 Índice de susceptibilidade da viscosidade à temperatura de ligantes asfálticos modificados com elastômeros.

As Figuras 4.24 a 4.26 apresentam as curvas de viscosidade dos ligantes asfálticos modificados com diferentes teores do fíler tipo cal e dos fíleres alternativos (RMF e lodo de ETA). De forma geral, observa-se o aumento da viscosidade em função do teor de aditivo incorporado, sendo que os aumentos estão atrelados à natureza física, apenas pela incorporação de partículas de fíler ao

ligante asfáltico, mesmo que sejam inertes e química, onde podem interferir as cargas de superfície. A partir dos gráficos também pode-se determinar o índice de suscetibilidade da viscosidade à temperatura.

Comparando-se as Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 observa-se que ao considerar os teores volumétricos indicados na Tabela 3.2, os resultados não são tão diferentes, no entanto, percebe-se que com o aumento do teor de lodo de ETA (Figura 4.27), as tendências se tornam mais horizontais o que pode significar uma maior influência da natureza química desse fíler na viscosidade. As tendências obtidas para os ligantes modificados com RMF são mais paralelas do que às obtida para o CAP 50/70 puro, enquanto que as obtidas para o ligante modificado com cal aparecem com inclinação intermediária entre os modificados com RMF e o lodo de ETA, o que mais uma vez aponta para certa influência das cargas de superfície do fíler.

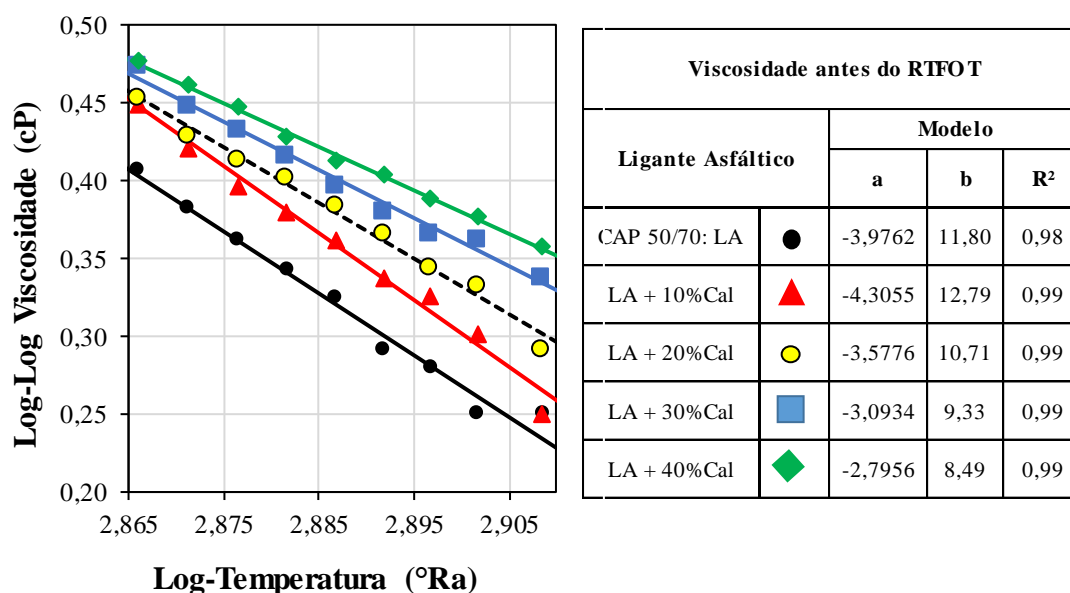


Figura 4.24 Viscosidade CAP 50/70 puro e modificado com tipo Cal.

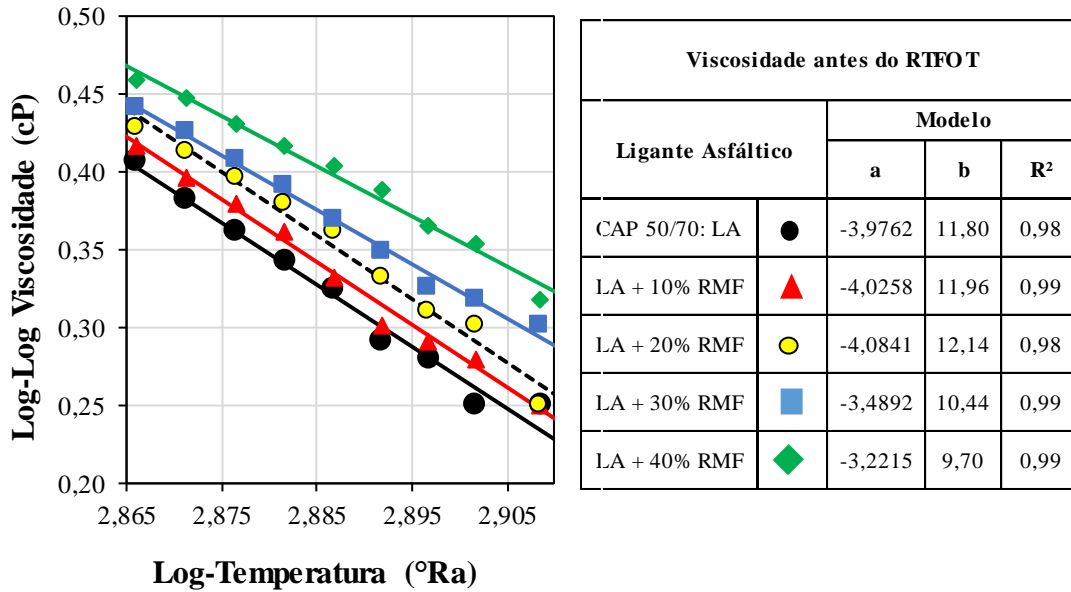


Figura 4.25 Viscosidade CAP 50/70 puro e modificado com rejeito de minério de ferro RMF.

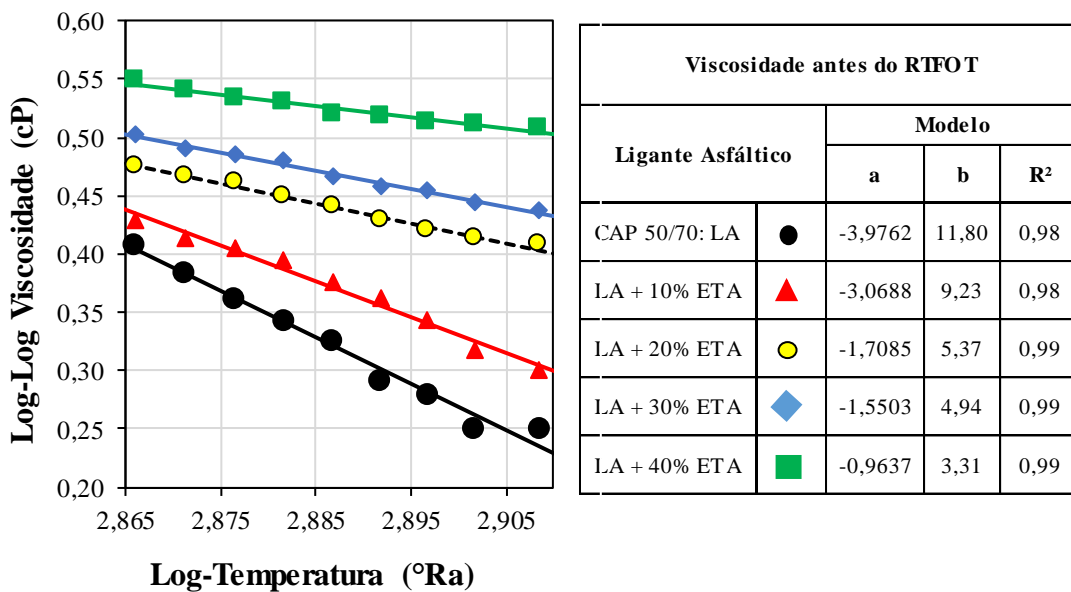


Figura 4.26 Viscosidade CAP 50/70 puro e modificado com lodo de ETA.

A Figura 4.27 apresenta a viscosidade *versus* o teor de aditivo em volume apresentando os incrementos da viscosidade em função do tipo de material fíler adicionado. As curvas apresentadas na Figura 4.27 foram realizadas às temperaturas de 135 °C, 150 °C e 177 °C na condição antes e após do RTFOT. Os resultados indicam que existe uma correlação por meio de uma função exponencial entre a viscosidade e o teor de aditivo incorporado, independentemente do tipo de fíler adicionado. Essa correlação acentua-se para teores menores ao 15% de aditivo, nas condições

antes e após o RTFOT. Entretanto, análises estatísticas serão apresentadas no item 4.2.9 para a validação da hipótese.

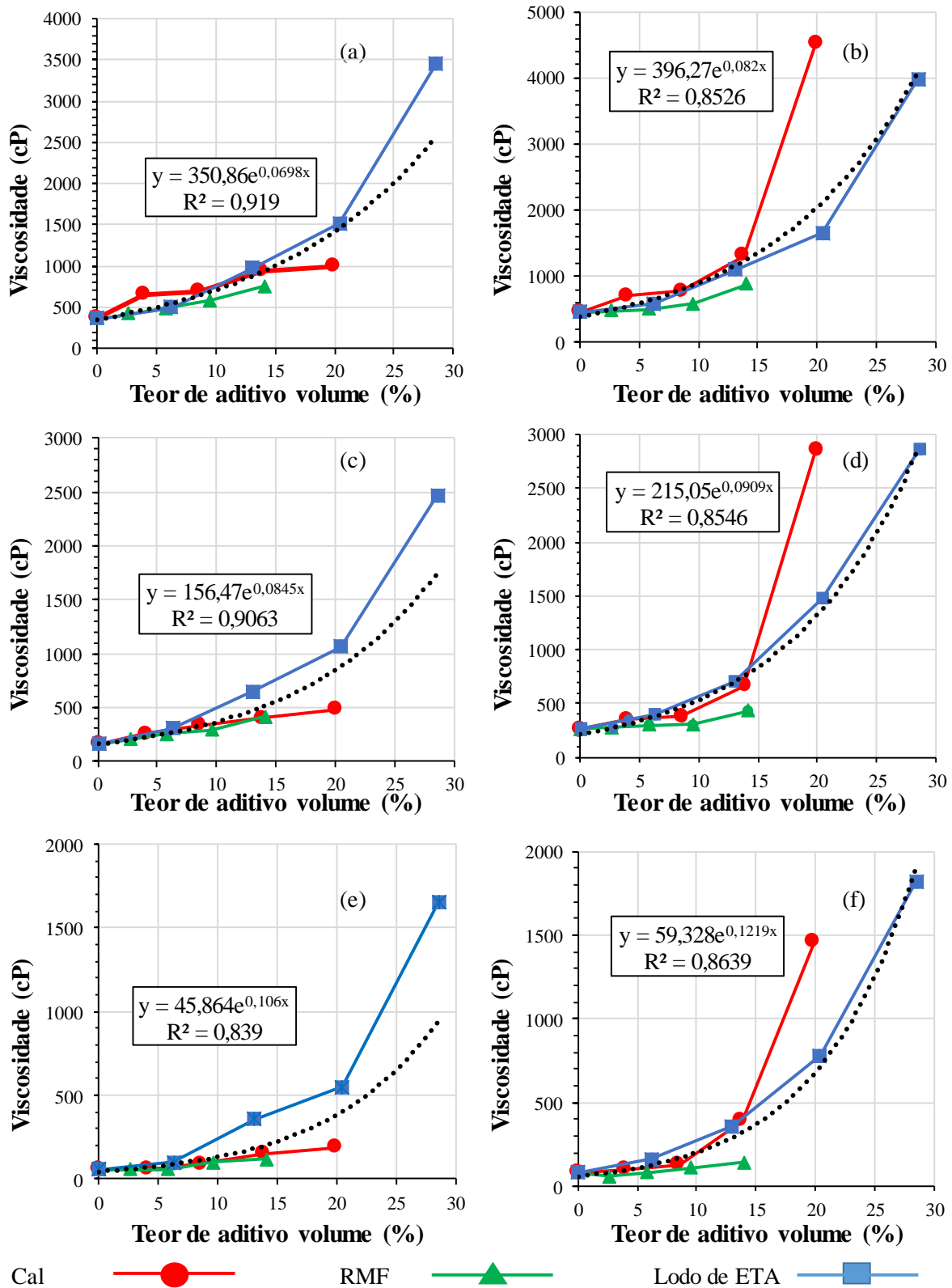


Figura 4.27 Viscosidade versus teor de aditivo em volume: (a) T: 135 °C antes RTFOT; (b) T: 135 °C após RTFOT; (c) T: 150 °C antes RTFOT; (d) T: 150 °C após RTFOT; (e) T: 177 °C antes RTFOT; (f) T: 177 °C após RTFOT

A Figura 4.28 apresenta os valores médios de temperatura de usinagem e compactação recomendadas pela especificação DNIT 043 (DNIT, 1995) para os ligantes de estudo.

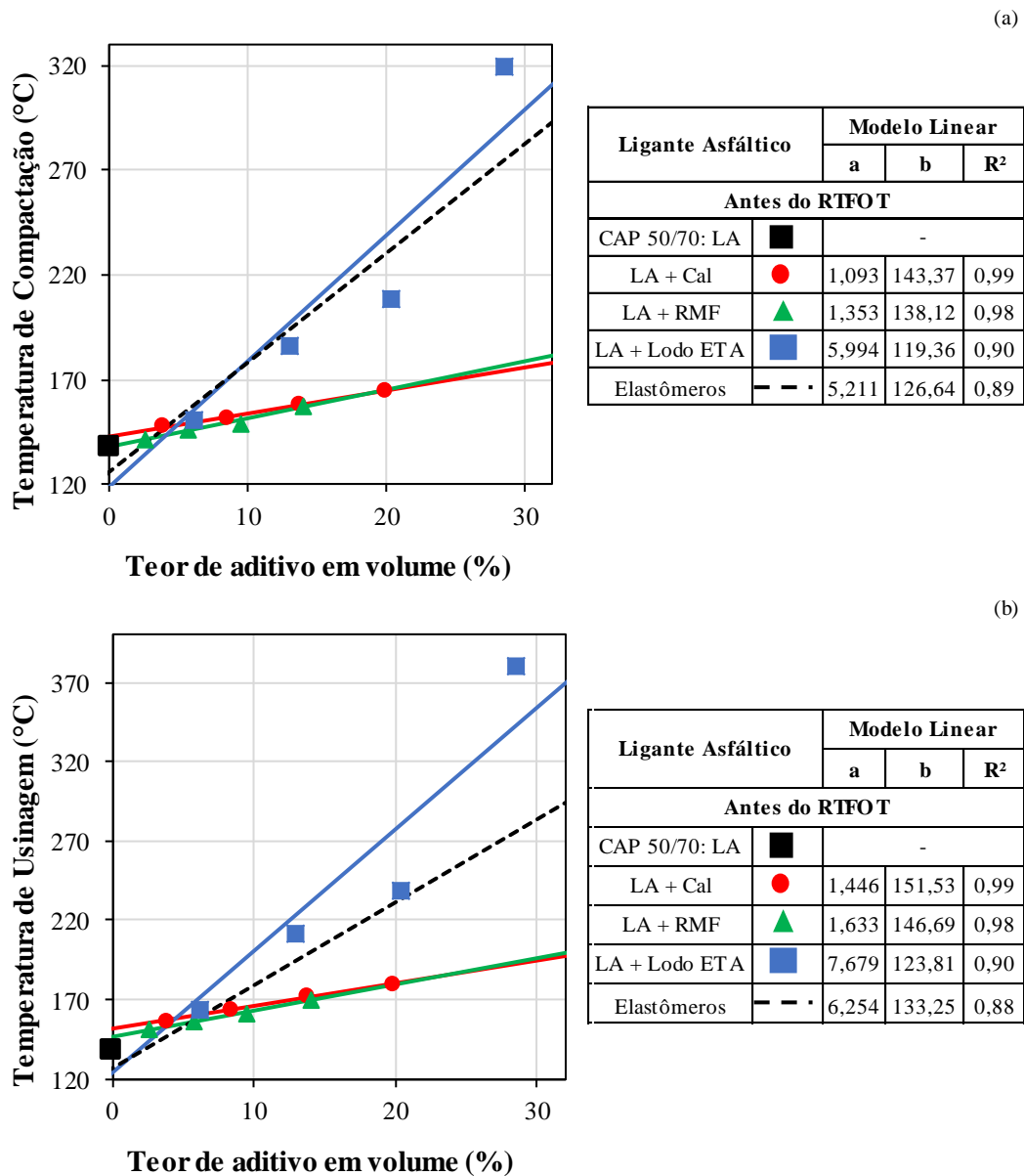


Figura 4.28 Temperaturas médias de: (a) compactação e (b) usinagem de ligantes asfálticos modificados com fíleres.

Os aumentos das viscosidades nos ligantes asfálticos modificados com fíleres, acrescentam os valores médios das temperaturas de usinagem e compactação em função do teor de aditivo. Os ligantes asfálticos modificados com cal e RMF apresentaram comportamento similar, enquanto que o asfalto modificado com lodo de ETA apresentou maiores aumentos deste parâmetro para teores acima de 10% em relação ao CAP 50/70, podendo atingir a temperatura de envelhecimento e oxidação excessiva do ligante asfáltico. No caso do ligante asfáltico modificado com 40% (p/p)

de cal apresentou temperaturas de usinagem (aquecimento do ligante asfáltico) superior a 177 °C, o que pode induzir o envelhecimento e oxidação excessiva do ligante asfáltico.

No caso do ligante asfáltico modificado com 40% (em peso) de cal apresentaram temperaturas de usinagem (aquecimento do ligante asfáltico) superior a 177 °C, o que pode induzir o envelhecimento e oxidação excessiva do ligante asfáltico.

A Figura 4.29 apresenta o índice de susceptibilidade da viscosidade à temperatura SVT dos ligantes asfálticos modificados com fíleres, obtidos das curvas de viscosidade descritas anteriormente. Houve um padrão de comportamento da viscosidade nas amostras dos ligantes asfáltico com cal e RMF em função do teor de aditivo incorporado. No caso do ligante asfáltico modificado com lodo de ETA, as curvas de viscosidade apresentaram aumentos e menor declividade, resultando baixos valores do índice SVT em relação ao CAP 50/70 e em relação às tendências obtidas para os outros fíleres.

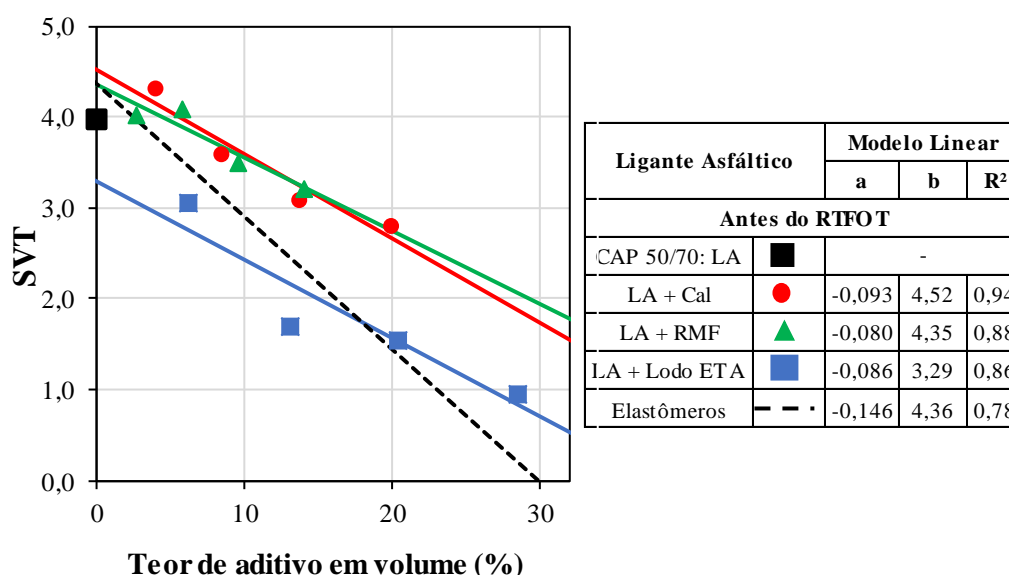


Figura 4.29 Índice de susceptibilidade da viscosidade à temperatura de asfaltos modificados com fíleres.

Se comparados esses resultados com os obtidos para os ligantes asfálticos modificados com elastômero tipo borracha (Figura 4.23), observa-se que aqueles se encontram variando entre os ligantes modificados com fíleres cal e RMF e o lodo de ETA.

#### 4.2.8 Ensaio de Estabilidade à estocagem ou armazenamento

A norma ASTM define dois conceitos para a compatibilidade dos asfaltos modificados: “compatível” quando inexistente a separação de fases durante o processo de manuseio e não é necessária a agitação contínua para a homogeneidade do material e, “semicompatível” quando a



separação de fases pode ocorrer, entretanto, existem alguns mecanismos de agitação que permitem a homogeneidade do material durante processos de transporte e manuseio. A Figura 4.30 apresenta os resultados de estabilidade à estocagem ou armazenamento, considerando as variações do ensaio de ponto de amolecimento no topo superior e inferior de uma amostra de material condicionada, contemplando a variação máxima exigida de 4 °C segundo a especificação DNIT 396 (DNIT, 1999).

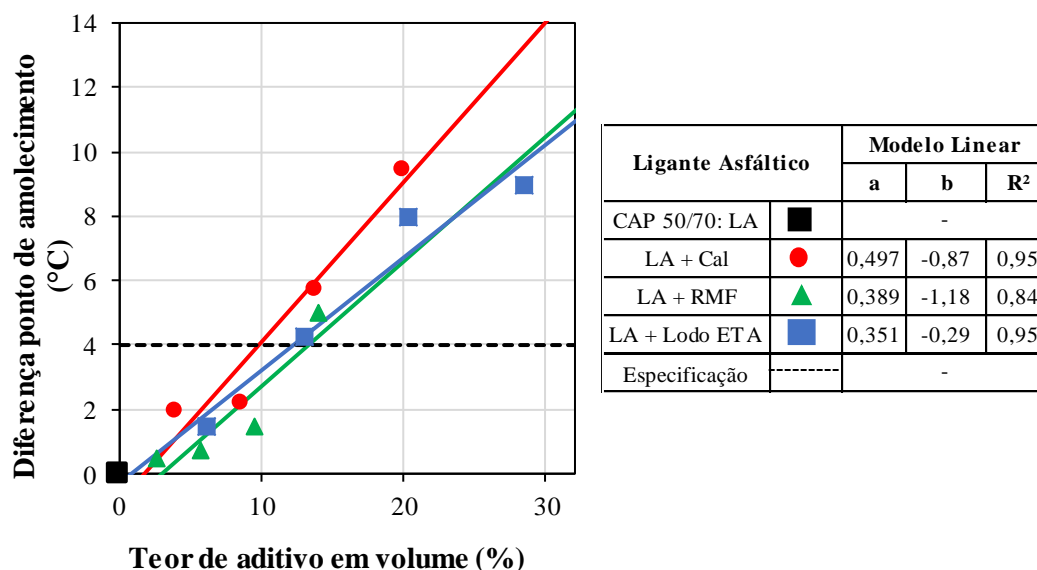


Figura 4.30 Diferença do ponto de amolecimento no ensaio de estabilidade ao armazenamento de ligantes asfálticos modificados com fíleres.

Os acréscimos da diferença das leituras do ponto de amolecimento nos ligantes asfálticos modificados com fíleres ocorrem em função do teor de aditivo adicionado em volume, sendo a separação de fases asfalto-fíler dependente do teor de aditivo adicionado no CAP 50/70. Os asfaltos modificados com teores de cal inferiores ao 10% apresentam diferença do ponto de amolecimento menores que o máximo preconizado pela especificação DNIT 396 (DNIT, 1999), (4 °C). O resíduo de minério de ferro apresenta uma elevada densidade real dos grãos (4,085 g/cm<sup>3</sup>), motivo pelo qual em termos volumétricos houve menores percentuais de adição de aditivo ao CAP 50/70 na dosagem. Entretanto, os ligantes asfálticos modificados com teores volumétricos inferiores ao 30% de RMF apresentaram menores variações das diferenças do ponto de amolecimento, ocasionando maior compatibilidade entre as fases. Os ligantes asfálticos modificados com lodos de ETA com teores superiores a 20% apresentaram diferenças no ponto de amolecimento superiores ao limite máximo admitido de 4 °C, fato que pode ser explicado pelo aumento do teor volumétrico do aditivo adicionado e à diminuição da densidade real dos grãos, em relação aos fíleres convencionais.

Considerando-se que as diferenças de temperatura serão tanto maiores quanto maiores forem as precipitações ocorridas, ou seja, quanto maior for a incompatibilidade, tem-se que a maior incompatibilidade estaria ocorrendo para o ligante asfáltico modificado com cal.

#### **4.2.9 Análise estatística dos resultados da caracterização física dos ligantes asfálticos modificados com fíleres**

De acordo com a metodologia apresentada no item 3.6, este item tem como finalidade determinar se as variações das características físicas do ligante asfáltico modificado com os materiais fíleres convencionais e alternativos em relação ao CAP 50/70 são consideradas significativas. Assim como observar se as variações das características físicas são ocasionadas devido ao tipo de material ou ao teor adicionado. As características físicas avaliadas neste item, correspondem aos ensaios de perda de massa no envelhecimento RTFOT (E), ponto de amolecimento (PA), ponto de amolecimento após o envelhecimento RTFOT (PA-E), penetração (P), penetração após o RTFOT (P-E), ductilidade (D), ductilidade após o RTFOT (D-E) e Índice de Susceptibilidade Térmica (IST), viscosidade nas temperaturas de 135°C, 150 °C e 177 °C nas condições antes e após o RTFOT e o Índice de Susceptibilidade da Viscosidade à temperatura ISV. A Tabela 4.5 apresenta os resultados das três análises estatísticas correspondentes: Análise (1): Determinação das variações significativas do fator para os diferentes teores de fíler adicionados; Análise (2) correlação entre o fator e o teor de aditivo adicionado ao CAP 50/70; Análise (3): Correlação entre o fator e o tipo de aditivo adicionado ao CAP 50/70.

A análise estatística apresentada na Tabela 4.5 indica que os ensaios, ou fatores analisados, tais como penetração, ponto de amolecimento, ductilidade, IST antes e após o envelhecimento RTFOT, apresentaram uma variação significativa para os diferentes teores de material fíler incorporado em referência à amostra de CAP 50/70. Essas variações nas propriedades físicas dos ligantes modificados com fíleres estão correlacionadas ao teor de fíler adicionado e não ao tipo a natureza do fíler. No caso do ensaio RTFOT, ou a condição de envelhecimento (E), observa-se que as perdas de massa dos ligantes modificados com fíleres, ao serem comparados ao CAP 50/70, não dependem do teor de material fíler adicionado, mas sim do tipo e natureza do fíler. A análise estatística para os ensaios de viscosidade antes e após o RTFOT indicam que existe variação significativa desses parâmetros nas temperaturas de 135 °C e 150 °C. Essas variações estatisticamente estão correlacionadas ao teor de aditivo adicionado e não ao tipo ou natureza do material fíler. Na temperatura de 177 °C observou-se que não se apresentaram variações significativas da viscosidade antes e após o RTFOT dos ligantes asfálticos modificados com fíleres

em relação ao CAP 50/70, fato atribuído a que o material nesta temperatura atinge a condição de escoamento, tendo um comportamento viscoso. Conseqüentemente, o IST determinado a partir das viscosidades a 135 °C e 177 °C não apresentou variação significativa em comparação ao CAP 50/70. De forma geral, estatisticamente pode-se concluir que as características físicas analisadas incluindo a viscosidade nas temperaturas a 135 °C e 150 °C antes e após o RTFOT dependem do teor de fíler adicionado e não da natureza do mesmo o que aponta para a possibilidade da opção pelo fíler mais econômico e que contribua para o desenvolvimento ambientalmente sustentável.

Tabela 4.5 Análise estatística das características físicas dos asfaltos modificados com fíleres.

Fator	Análise (1)						Análise (2)				Análise (3)			
	Fo 10	Fo 20	Fo 30	Fo 40	fo	Inf*	Fo	Correlação	R <sup>2</sup>	Inf*	Fo	Correlação	R <sup>2</sup>	Inf*
<b>E</b>	0,686	0,893	0,686	0,686	0,05	<b>Não</b>	0,162	Positiva Fraca	2,6	<b>Não</b>	0,876	Positiva Considerável	76,8	<b>Sim</b>
<b>PA</b>	0,043	0,043	0,043	0,042	0,05	<b>Sim</b>	0,758	Positiva Considerável	57,5	<b>Sim</b>	0,061	Inexistente	0,4	<b>Não</b>
<b>PA-E</b>	0,042	0,043	0,042	0,043	0,05	<b>Sim</b>	0,758	Positiva Considerável	57,5	<b>Sim</b>	0,252	Positiva Fraca	6,4	<b>Não</b>
<b>P</b>	0,043	0,043	0,043	0,043	0,05	<b>Sim</b>	-0,577	Negativa Média	33,3	<b>Sim</b>	-0,403	Negativa Fraca	16,3	<b>Não</b>
<b>P-E</b>	0,043	0,042	0,043	0,043	0,05	<b>Sim</b>	-0,856	Negativa Considerável	73,3	<b>Sim</b>	-0,164	Negativa Fraca	2,7	<b>Não</b>
<b>D</b>	0,042	0,039	0,039	0,039	0,05	<b>Sim</b>	-0,705	Negativa Média	49,7	<b>Sim</b>	-0,511	Negativa Média	26,1	<b>Não</b>
<b>D-E</b>	0,043	0,043	0,043	0,043	0,05	<b>Sim</b>	-0,538	Negativa Média	28,9	<b>Sim</b>	-0,320	Negativa Fraca	10,2	<b>Não</b>
<b>IST</b>	0,043	0,043	0,043	0,043	0,05	<b>Sim</b>	0,407	Positiva Fraca	16,6	<b>Não</b>	-0,483	Negativa Fraca	23,3	<b>Não</b>
<b>V135</b>	0,043	0,043	0,043	0,042	0,05	<b>Sim</b>	0,477	Positiva Média	22,8	<b>Sim</b>	0,309	Positiva Fraca	9,6	<b>Não</b>
<b>VE 135</b>	0,043	0,043	0,043	0,043	0,05	<b>Sim</b>	0,571	Positiva Média	32,6	<b>Sim</b>	0,042	Positiva Fraca	0,2	<b>Não</b>
<b>V150</b>	0,042	0,043	0,043	0,042	0,05	<b>Sim</b>	0,418	Positiva Média	17,5	<b>Sim</b>	0,414	Positiva Fraca	17,2	<b>Não</b>
<b>VE 150</b>	0,043	0,043	0,043	0,042	0,05	<b>Sim</b>	0,532	Positiva Média	28,3	<b>Sim</b>	0,09	Positiva Fraca	0,8	<b>Não</b>
<b>V177</b>	0,18	0,102	0,066	0,66	0,05	<b>Não</b>	0,373	Positiva Média	13,9	<b>Sim</b>	0,425	Positiva Fraca	18,1	<b>Não</b>
<b>VE 177</b>	0,176	0,068	0,043	0,043	0,05	<b>Não</b>	0,525	Positiva Média	27,5	<b>Sim</b>	0,148	Positiva Fraca	2,2	<b>Não</b>
<b>SVT</b>	0,686	0,225	0,080	0,080	0,05	<b>Não</b>	-0,373	Negativa Fraca	13,9	<b>Não</b>	-0,435	Negativa Fraca	18,9	<b>Não</b>

Inf\* Influencia.

#### 4.2.10 Considerações finais sobre a consistência e viscosidade dos asfaltos modificados com fíleres e elastômeros

Em termos do teor de aditivo, nos asfaltos modificados com fíleres, optou-se por trabalhar na proporção em peso de modificação de 20%, ou seja, 20% de material fíler e 80% de ligante asfáltico CAP 50/70 puro, pois verificou-se em laboratório que teores acima de 20% apresentam dificuldade no processo de manuseio do ligante modificado. Em termos volumétricos, os teores de aditivos tipo cal, rejeito de mineração de ferro RMF, e lodo de ETA, correspondem a 8,5%, 5,8% e 13% respectivamente. Além disso, os resultados da variação do ponto de amolecimento no ensaio de estabilidade à estocagem apontaram que a incorporação de teores superiores ao 20% no CAP 50/70 tornam o ligante não compatível, ocorrendo separação de fases. A Tabela 4.6 apresenta um comparativo da trabalhabilidade dos asfaltos modificados com os materiais fíleres baseados nas faixas de temperaturas de compactação e usinagem obtidos a partir da viscosidade. Os ligantes asfálticos apresentados na Tabela 4.6 correspondem ao grupo dos modificados com fíler que foram escolhidos para o estudo reológico e incorporação nas misturas asfálticas.

Tabela 4.6 Temperaturas de usinagem e compactação dos asfaltos modificados com fíleres.

Ligante asfáltico modificado com	Aditivo em volume (%)	Aditivo em peso (%)	Temperatura de Compactação (°C)			Temperatura de Usinagem (°C)		
			Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima
CAP 50/70: LA	0	0	137	139	141	145	148	151
LA + Cal	8,5	20	150	152	155	161	164	167
LA + RMF	5,8	20	144	146	148	154	156	159
LA + Lodo de ETA	13	20	181	186	192	206	212	219

A partir dos aumentos da consistência e viscosidade dos ligantes asfálticos com incorporação de fíleres, pode-se observar aumento das faixas de temperaturas de compactação e usinagem, entretanto, excetuando a amostra com lodo de ETA, os resultados das faixas de temperaturas obtidas encontram-se inferiores a temperatura do envelhecimento e oxidação excessiva do ligante asfáltico de 177 °C. Essa elevação de temperatura do lodo de ETA se deve certamente às suas características químico-mineralógicas e estruturais e ao seu maior volume na mistura em relação aos demais fíleres como mostra a Figura 4.31. Cabe ainda destacar que ponderando-se a temperatura em relação ao teor de CAP, ou seja, em relação a 100% menos o teor volumétrico do fíler usado nas misturas, se observa (Tabela 4.7) que as temperaturas de usinagem e compactação, com exceção do fíler lodo de ETA são diretamente proporcionais ao teor de CAP presente nas

misturas. Essa análise indica que o fíler lodo de ETA apresenta grande interação com o CAP requerendo temperaturas de compactação e usinagem mais elevadas.

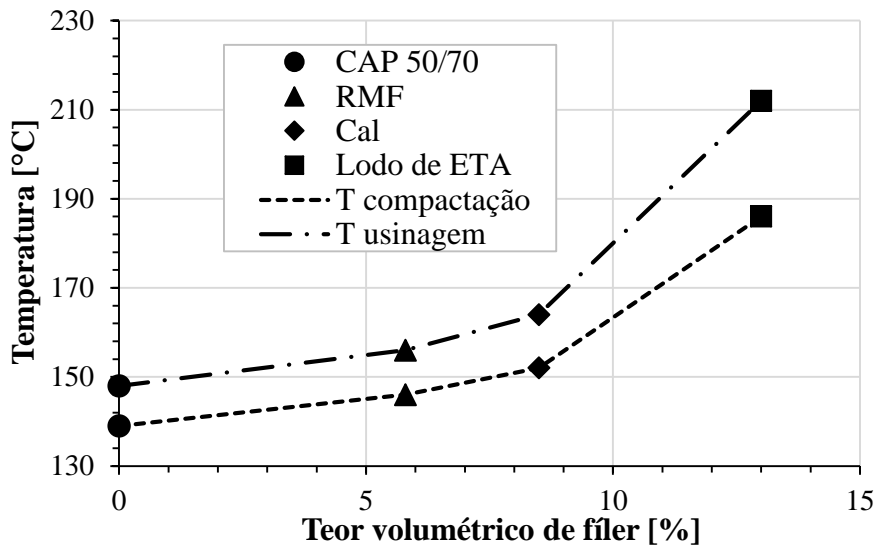


Figura 4.31 Influência do teor volumétrico de fíler nas temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas.

Tabela 4.7 Temperaturas de usinagem e compactação ponderadas em relação ao teor de CAP 50/70 presente nos asfaltos modificados com fíleres.

Ligante asfáltico modificado com	Aditivo em volume (%)	Aditivo em peso (%)	Temperatura de Compactação (°C)			Temperatura de Usinagem (°C)		
			Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima
CAP 50/70: LA	0	0	137	139	141	145	148	151
LA + Cal	8,5	20	137	139	142	147	150	153
LA + RMF	5,8	20	136	138	139	145	147	150
LA + Lodo de ETA	13	20	157	162	167	179	184	191

No caso dos asfaltos modificados com elastômeros, seguiram-se as especificações americanas ASTM D 6114 (ASTM, 2009) para a fabricação do asfalto borracha AB8, utilizando as proporções em peso de 17% de borracha e 83% de ligante asfáltico puro. No asfalto modificado AB CB, a fim de avaliar o efeito da cal na superfície da borracha, trabalhou-se com o mesmo teor de borracha efetiva do AB8, porém a composição de ligante que atinge essa condição é, devido a presença do fíler cal, o AB CB 22. Os resultados da viscosidade para os asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha, conforme o item 4.2.7 inviabilizam a determinação da viscosidade pelo método da equi-viscosidade. Porém, a temperatura de aquecimento do AB8 adotada nesta pesquisa foi 175 °C, enquanto que para o AB CB 22 adotou-se a temperatura de 160 °C. Para o caso do AB CB 22 a temperatura de 160 °C garantiu o recobrimento dos agregados na etapa experimental da elaboração das misturas asfálticas.

## 4.3 ESTUDO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO – DSR

### 4.3.1 Curvas isócronas

A Figura 4.32 apresenta os resultados das curvas isócronas (variação do módulo de cisalhamento dinâmico e do ângulo de fase) considerando a faixa de temperatura entre 40 °C e 88 °C para os diferentes teores de composto de borracha adicionados ao CAP 50/70.

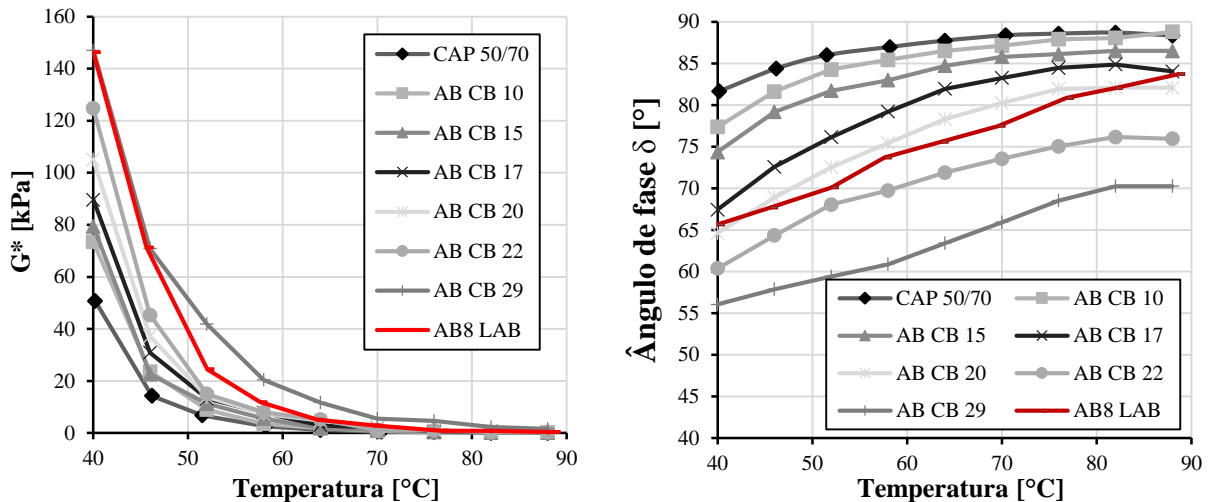


Figura 4.32 Curvas isócronas para os asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha.

A Figura 4.32 mostra que aparentemente os asfaltos modificados com elastômero tipo borracha e com o composto de borracha com cal apresentaram aumentos significativos de  $G^*$  e diminuição do  $\delta$  em relação ao CAP 50/70 nas temperaturas de estudo, fato que merece análise mais detalhada buscando separar os efeitos dos elementos que compõem as misturas. Observa-se nessa figura que o aumento do  $G^*$  e diminuição do  $\delta$  realiza-se gradualmente em função do teor de aditivo incorporado, mas também, por consequência, em função da redução do teor de CAP 50/70 em consequência dos ligantes asfálticos com borracha e com composto de borracha.

Observa-se que o ligante asfáltico AB CB 29 e o AB CB 22 apresentaram maior queda dos valores de  $\delta$  em relação ao AB8. Para estes ligantes, os teores de borracha pura incorporados foram respectivamente 18 % e 13,6% enquanto o do ligante asfáltico de referência AB8 foi de 17%. Nesses ligantes foram adicionados percentuais de cal respectivamente 3,5 % e 4,6% em peso e 0 % no ligante asfáltico AB.

De modo a melhor visualizar os efeitos do elastômero tipo borracha e da cal sobre o comportamento dos ligantes asfálticos apresenta-se na Figuras 4.33 os resultados obtidos para  $G^*$

e ângulo de fase respectivamente em função do teor de aditivo considerando três temperaturas de avaliação 40 °C, 64 °C e 88 °C.

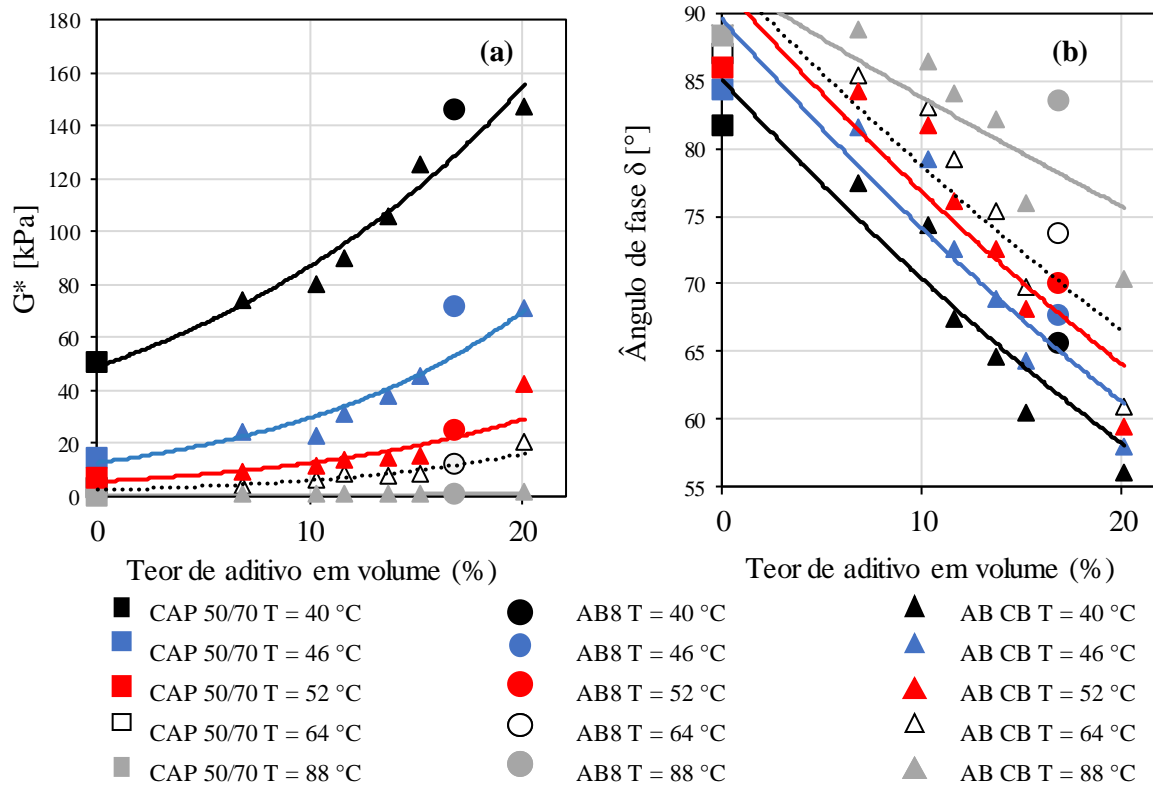


Figura 4.33 Variação dos parâmetros reológicos com o teor de aditivo em volume: (a) Módulo de cisalhamento dinâmico e (b) ângulo de fase.

Os resultados apresentados na Figura 4.33 mostram que para baixa temperatura a cal está exercendo pouca influência no  $G^*$ , no entanto, quando se aumenta a temperatura ela passa a contribuir de modo significativo para o aumento do  $G^*$ . Observa-se ainda que para maiores temperaturas (maiores que 46 °C) embora continue aparecendo a influência da cal, a influência do elastômero só ocorre para teores mais elevados. No ângulo de fase observa-se uma influência significativa da cal, contribuindo à maior elasticidade dos ligantes asfálticos modificados com borracha. Em relação a amostra de referência do CAP 50/70, a colocação de 29% de CB origina uma diminuição do  $\delta$  em 25,7° e 18° nas temperaturas baixas (40 °C) e altas (88 °C), respectivamente. Já o ligante asfáltico convencional AB8 apresentou uma diminuição do  $\delta$  em 16° e 4,6° nas temperaturas de 40 °C e 88 °C, respectivamente. De forma geral, os asfaltos modificados com elastômeros apresentam maior rigidez pelos aumentos do  $G^*$  e maior elasticidade pela diminuição do  $\delta$ , podendo apresentar misturas asfálticas provavelmente com maior retorno elástico, contribuindo ao aumento da vida de fadiga e menor susceptibilidade à ocorrência de trincas por deformação permanente.

A Figura 4.34 apresentam as curvas isócronas dos ligantes asfálticos modificados com cal e com os fíleres alternativos estudados (RMF e lodo de ETA) em relação ao CAP 50/70.

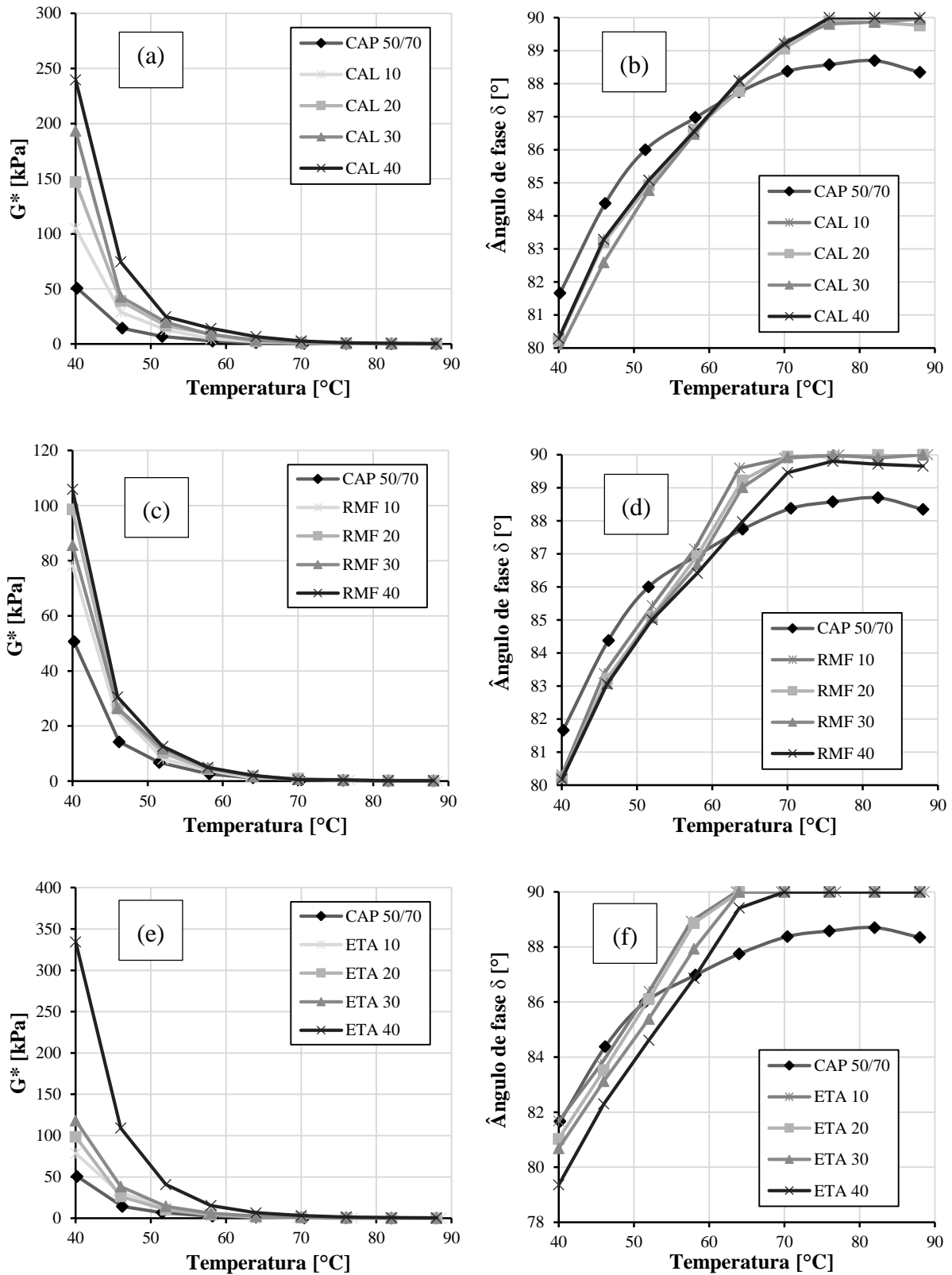


Figura 4.34 Curvas Isócronas de asfaltos modificados com fíleres: (a-b) cal; (c-d) RMF; (e-f) Lodo de ETA.



Em relação ao CAP 50/70, os asfaltos modificados com o lodo de ETA apresentaram maiores valores do  $G^*$  enquanto que os menores aumentos do  $G^*$  foram encontrados para os ligantes modificados com RMF. De forma geral, os asfaltos modificados com fíleres, em diferentes teores, apresentaram decréscimos do  $\delta$  em 2 graus em relação ao CAP 50/70 na temperatura de 40 °C e acréscimos do  $\delta$  nas temperaturas elevadas, atingindo o comportamento viscoso. O comportamento viscoso é atingido para maiores temperaturas para o ligante asfáltico modificado com fíler cal e menores temperaturas para o ligante asfáltico modificado com lodo de ETA, sendo importante que se considere o clima regional na avaliação do teor de fíler a ser adotado.

Consola (2010) define que o limite de comportamento puramente viscoso para o ligante asfáltico ocorre no  $\delta$  entre 85° e 90°. Neste caso, os ligantes asfálticos modificados com fíleres alternativos (RMF e lodo de ETE) e convencional (cal) apresentaram comportamento puramente viscoso nas temperaturas superiores a 70 °C, 64°C, e 76 °C respectivamente. Observa-se que a cal interfere pouco no limite de temperatura em que atinge o comportamento viscoso em relação ao CAP 50/70, no entanto, o RMF e o lodo de ETA o reduz.

De modo a melhor visualizar os efeitos do elastômero tipo borracha e da cal sobre o comportamento dos ligantes asfálticos apresenta-se na Figuras 4.35 os resultados obtidos para  $G^*$  e ângulo de fase respectivamente em função do teor de aditivo considerando três temperaturas de avaliação 40 °C, 64 °C e 88 °C.

De forma geral pode-se observar um padrão de comportamento entre o módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e o teor de aditivo em volume adicionado, sendo para todos os casos superiores ao CAP 50/70. Os resultados de  $G^*$  para as temperaturas avaliadas de 40 °C, 64 °C e 88 °C apresentam mesmo padrão de comportamento em função do teor volumétrico de aditivo entre os ligantes asfálticos modificados com RMF e com o lodo de ETA. Neste sentido, o ligante asfáltico modificado com cal apresenta valores superiores aos ligantes modificados com materiais alternativos.

Além disso, observa-se diminuição do ângulo de fase com o aumento do teor volumétrico de aditivo para as temperaturas de avaliação de 40 °C e 64 °C. Neste contexto, o ligante asfáltico modificado com lodo de ETA apresenta maior rigidez com o aumento do aditivo e menor ângulo de fase com o aumento do aditivo, ou seja, maior retorno elástico. Já os ligantes asfálticos modificados com RMF e cal apresentaram poucas variações do ângulo de fase, apresentando uma tendência constante com o aumento do teor de aditivo nas temperaturas de 40 °C e 64 °C. Para o

caso da temperatura de 88°C apresenta-se uma tendência dos ligantes asfálticos com fíleres do ângulo de fase a 90 graus, indicando a condição de comportamento puramente viscoso.

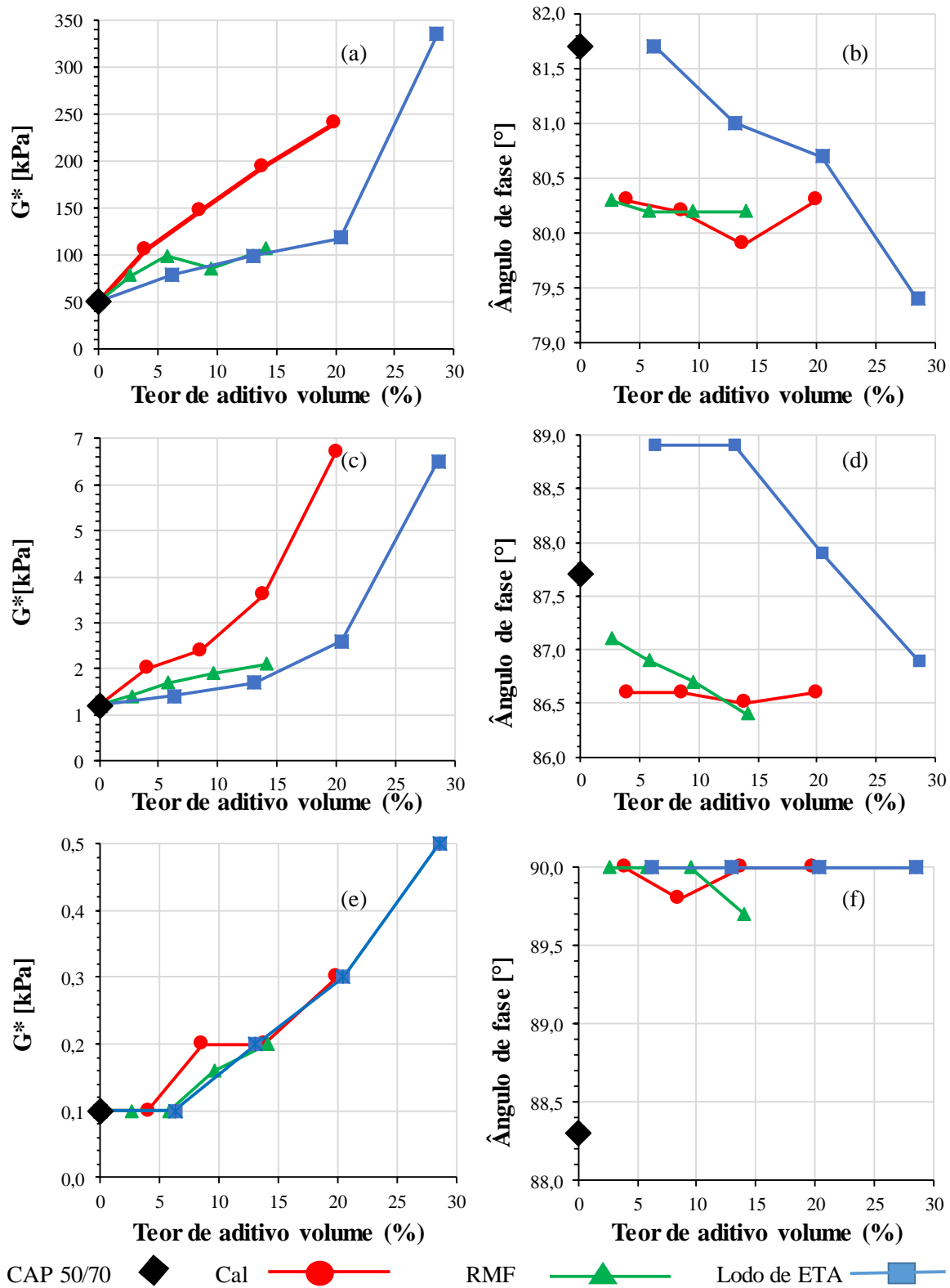


Figura 4.35 Parâmetros reológicos *versus* teor de aditivo em volume: (a) G\* a 40°C; (b) ângulo de fase a 40°C; (c) G\* a 64°C; (d) ângulo de fase a 64°C; (e) G\* a 88°C; (f) ângulo de fase a 88°C.

### 4.3.2 Curvas mestras

Neste subitem serão apresentados os resultados das curvas mestras em dois grupos. O primeiro grupo corresponde ao estudo dos ligantes asfálticos modificados com elastômeros tipo borracha e composto de borracha. O segundo grupo corresponde ao estudo dos asfaltos modificados com materiais fileres.

As formas das curvas mestras com os ligantes modificados utilizados nesta pesquisa correspondem a curvas típicas de asfaltos convencionais, em que o módulo de cisalhamento dinâmico aumenta com a frequência de carregamento. A principal alteração do comportamento reológico devido aos materiais modificadores é o aumento da rigidez nas frequências baixas, equivalentes às altas temperaturas. Já nas frequências altas, equivalentes às baixas temperaturas, o aumento do módulo de cisalhamento dinâmico é menos efetivo. Esses comportamentos são observados nos asfaltos virgens, sem envelhecimento (Nascimento, 2015). No caso dos ligantes modificados com materiais elastômeros, a presença da borracha mostra tendências de comportamento diferentes em relação à curva mestre do CAP 50/70, considerando-se característico dos asfaltos modificados com polímeros (Bringel et al., 2008). A Figura 4.36 apresenta as curvas mestras do CAP 50/70 puro e modificado com diferentes teores de CB.

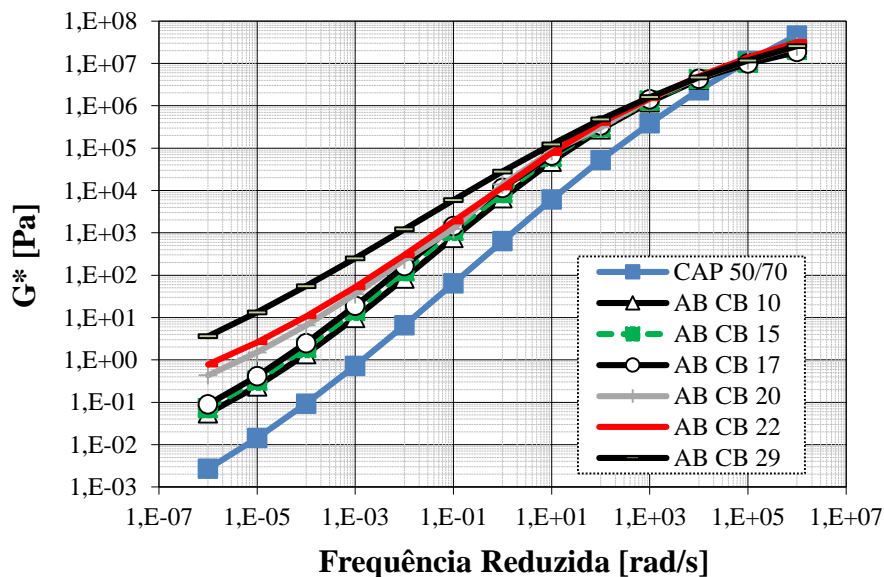


Figura 4.36 Curvas mestras: CAP 50/70 puro e modificado com diferentes teores de CB.

A partir das curvas mestras apresentadas na Figura 4.36, a presença do CB gera incrementos de  $G^*$  notórios para frequências inferiores a  $10^3$  rad/s. Para frequências superiores a  $10^3$  rad/s, observa-se um padrão de comportamento similar independentemente do teor de aditivo CB

adicionado, criando um único ponto de interseção com o CAP 50/70 à aproximadamente  $10^5$  rad/s. A partir dessa frequência ( $10^5$  rad/s) observa-se que a borracha em interação com a cal no composto CB, produz uma tendência única de comportamento, e  $G^*$  para as misturas tende a se tornar inferior ao obtido para CAP 50/70. As interseções devem resultar numa alteração à contribuição do desempenho mecânico do material aglutinante no concreto asfáltico, por meio de maior capacidade de recuperação elástica (Bahia & Davies, 1994).

A Figura 4.37 apresenta de modo comparativo a influência da cal no CB, em relação ao ligante asfáltico de referência AB-8 tendo sido consideradas comparativamente as amostras CB 22 e CB 29, isso porque volumetricamente, embora com menor teor de borracha, o teor total de fíler 22 (CB 22) se aproxima da mistura com AB 8, enquanto a CB 29 apresenta teor de borracha (18%) próximo da AB 8 (17%).

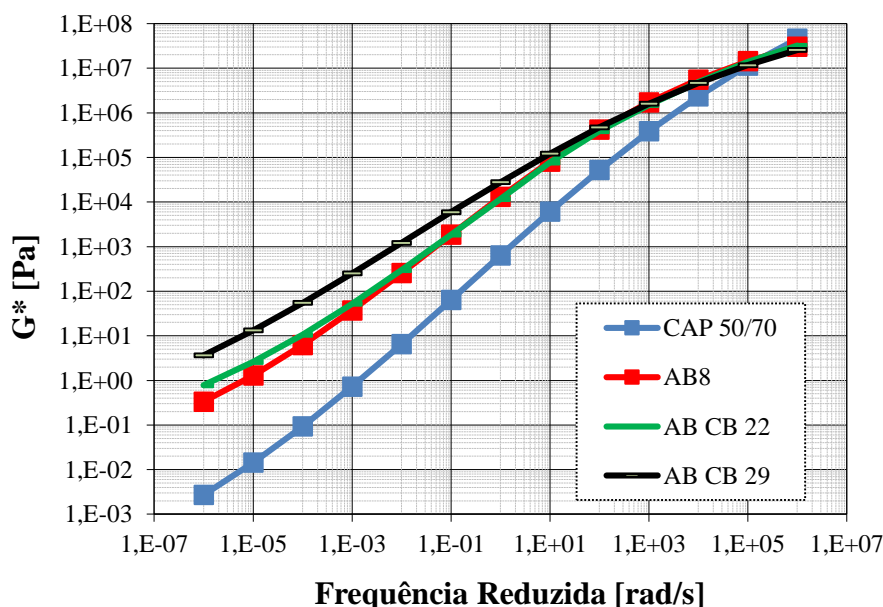


Figura 4.37 Curvas mestras: CAP 50/70, AB-8 LA e AB CB 22.

Segundo a Figura 4.37 os ligantes AB8, AB CB 22 e AB CB 29 apresentam um mesmo padrão de comportamento com valores mais elevados de  $G^*$  a altas temperaturas ou baixas frequências, e menores valores de  $G^*$  a baixas temperaturas ou altas frequências, indicando os aumentos de rigidez ao serem comparados com a amostra de referência do CAP 50/70. Valores mais elevados de rigidez são observados para a mistura AB CB 29 que apresenta teor de borracha semelhante à AB8. Portanto, é possível concluir que o que predomina no comportamento não é o teor de borracha, mas sim, o teor de fíler, borracha ou composto de borracha conforme o caso, sendo que a cal deve ter sua relevância, o que poderá ser melhor avaliado no estudo da incorporação do fíler

cal. O comportamento aqui apresentado corresponde ao comportamento típico do asfalto borracha descrito por diferentes pesquisadores (Bahia & Davies, 1994; Radziszewski et al., 2012; Camargo, 2016).

O segundo grupo de avaliação corresponde ao estudo dos asfaltos modificados com materiais fíleres. Inicialmente são apresentadas as curvas mestras do CAP 50/70 modificado com diferentes teores (10%, 20%, 30% e 40%) em peso dos fíleres cal (amostra de referência), RMF e lodo de ETA. Finalmente é apresentado um comparativo entre os diferentes materiais fíleres considerando-se 20% de adição. Para a comparação dos resultados se considerou os três tipos de fíleres analisados.

As Figuras 4.38 a 4.40 apresentam as curvas mestras do CAP 50/70 puro e modificado com cal e fíleres alternativos RMF e lodo de ETA. As proporções de modificadores foram de 10%, 20%, 30% e 40% com relação ao peso do CAP 50/70. De forma geral, pode-se observar um padrão de aumento do deslocamento vertical do  $G^*$  praticamente uniforme, em função do teor de material fíler, conforme observado em pesquisas similares (Bardini et al., 2012; Bardini, 2013; Pereira, 2014; Moreno, 2015).

Na Figura 4.38, observa-se que ao adicionar um teor de 10% de cal no CAP 50/70, gera-se um aumento significativo de  $G^*$ , da ordem de ( $10^1$  Pa), em relação à amostra de referência. Teores entre 10% e 40% de cal apresentam aumentos proporcionais de  $G^*$ , porém, com acréscimos entre os teores de fíler inferiores ao ocorrido para 10% em relação ao CAP 50/70. Constata-se que, à medida que se aumenta o teor de aditivo, a rigidez aumenta, por meio do aumento de  $G^*$ , no entanto, deve-se avaliar por questões econômicas teores inferiores a 10%.

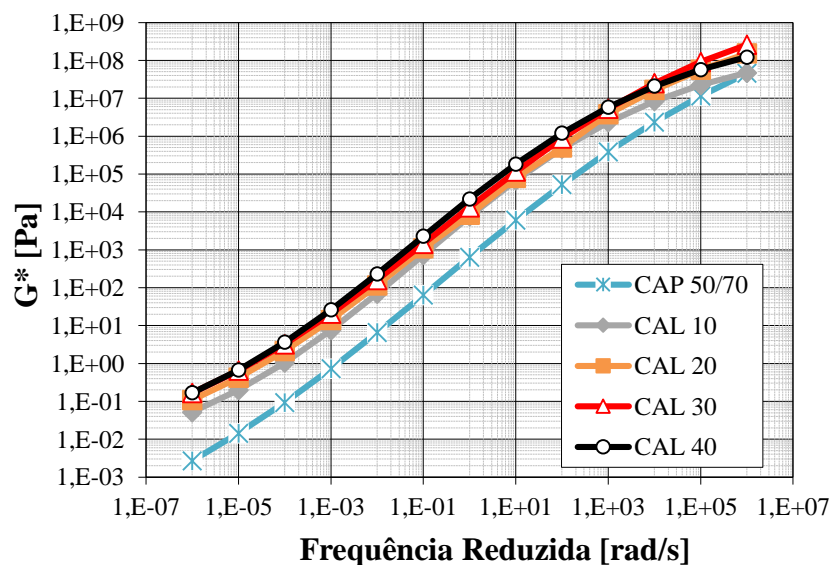


Figura 4.38 Curvas mestras: CAP 50/70 puro e modificado com diferentes teores de cal.

A Figura 4.39 apresenta as variações de  $G^*$  dos asfaltos modificados para os diferentes teores de RMF. Apesar dos resultados físicos de consistência dos asfaltos modificados apresentarem maiores incrementos, no comportamento reológico observa-se pouca variação do  $G^*$  dos ligantes com aditivo em relação ao CAP 50/70. Os poucos incrementos apresentam-se proporcionais ao teor de aditivo incorporado, em frequências menores que  $10^2$  (rad/s). As curvas mestras com adição de RMF não apresentam um comportamento proporcional ao teor de aditivo, quando analisadas para frequências maiores que  $10^2$  (rad/s). De forma geral, o comportamento reológico do CAP 50/70 com a adição de RMF apresentou poucas variações do  $G^*$ .

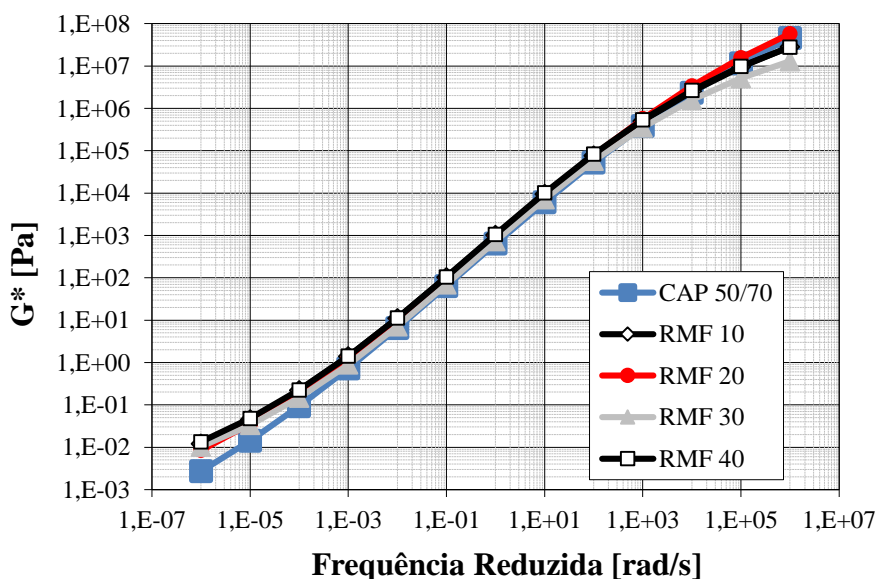


Figura 4.39 Curvas mestras: CAP 50/70 puro e modificado com diferentes teores de cal.

A Figura 4.40 indica aumentos significativos de  $G^*$  dos ligantes modificados com a incorporação dos resíduos de lodo de ETA, aumentos estes proporcionais ao teor de aditivo. De forma geral, observa-se um mesmo padrão de comportamento das curvas mestre em relação à obtida para o CAP 50/70. O padrão de comportamento é expresso pelo paralelismo uniforme das curvas mestras. Nesse caso, o aumento da rigidez em função do teor de lodo de ETA indica o aumento do desempenho mecânico da mistura asfáltica, em termos da resistência às deformações permanentes (Martinez, 2014).

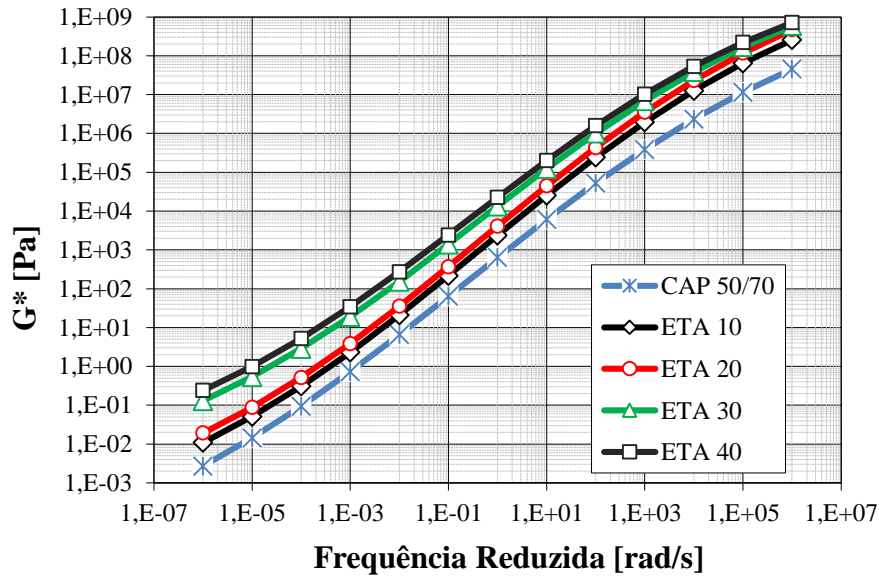


Figura 4.40 Curvas mestras: CAP 50/70 puro e modificado com diferentes teores de lodos de ETA.

A Figura 4.41 (a) apresenta um comparativo das curvas mestras das amostras virgens do CAP 50/70 e dos asfaltos modificados com o mesmo teor em peso dos materiais fíleres: cal, rejeito de minério de ferro RMF e lodo de ETA. Os resultados mostram a influência do fíler no comportamento reológico. De forma geral, pode-se observar que a presença dos materiais modificadores fíleres originam efeitos diferentes na alteração do comportamento do CAP 50/70. Os efeitos dos materiais fíleres se expressam pelos desvios das curvas mestras dos ligantes asfálticos modificados em relação ao comportamento do CAP 50/70 puro. Para maior entendimento sobre a influência do tipo de fíler no comportamento na Figura 4.40(b) são comparados os valores obtidos para 30 % de cal (11,2 % em volume), 40% de RMF (9,8% em volume e 20% para o lodo de ETA (11,9% em volume).

Nessa comparação em termos de teor volumétrico o maior acréscimo ocorre para o fíler cal enquanto ligante asfáltico com o fíler de RMF apresentou valores similares ao ligante asfáltico CAP 50/70. O ligante asfáltico modificado com lodo de ETA apresentou valores de  $G^*$  inferiores e superiores a partir da frequências de  $10^3$  (rad/s) respectivamente, em referência ao ligante asfáltico modificado com cal. Se observadas as imagens microscópicas dos fíleres (Figura 4.7) verifica-se, embora fatores de ordem químico-mineralógica possam intervir, que fisicamente a cal, devido às características de superfície, é o fíler com maior possibilidade interativa com o ligante asfáltico enquanto o lodo de ETA e o RMF apresentam características de superfície diferentes, sendo que pode existir menor área superficial RMF devido à uniformidade dos tamanhos de

partículas, enquanto que no lodo de ETA observa-se maior irregularidade das formas e tamanho dos grãos.

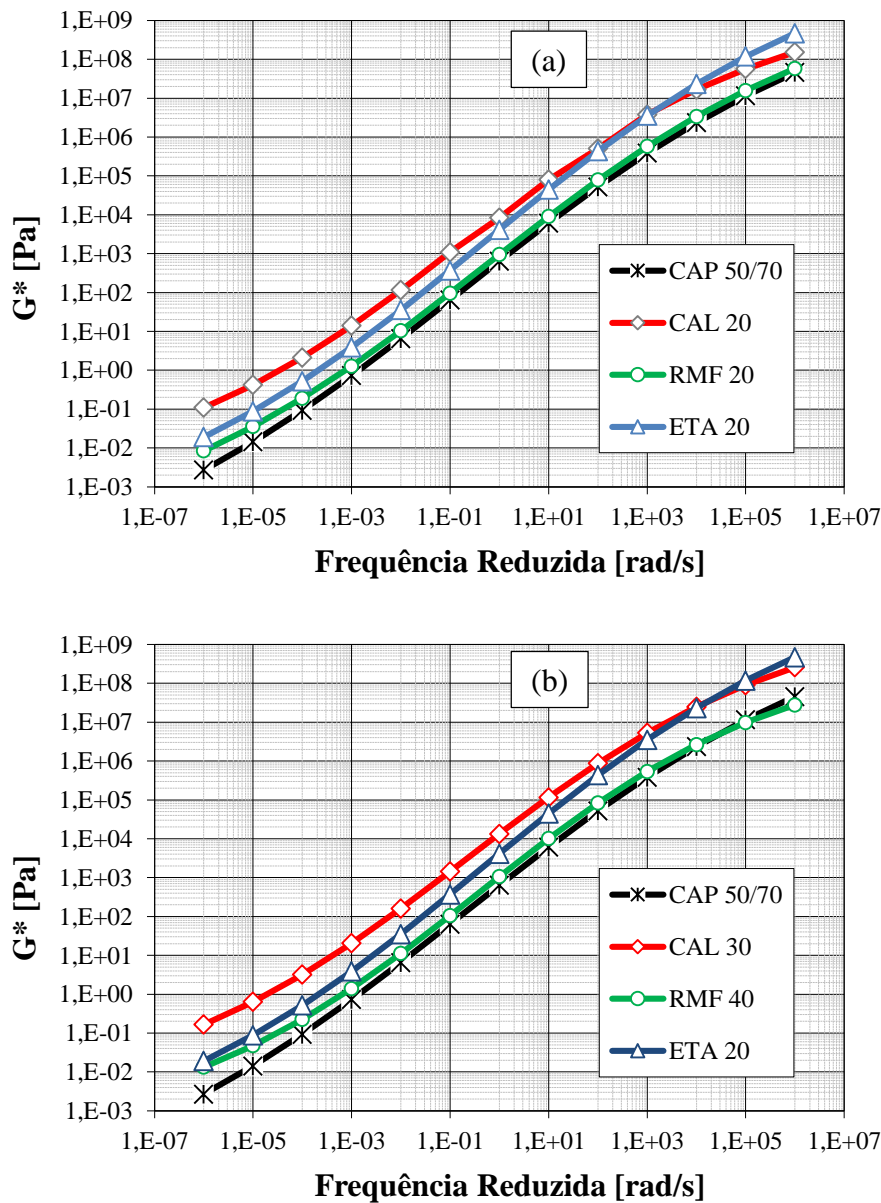


Figura 4.41 Curvas mestras: CAP 50/70 e ligantes asfálticos modificados com fíleres (a) 20% de teor gravimétrico e (b) 30% cal, 40% RMF e 20% de lodo de ETE em teores volumétricos.

Analisando a Figura 4.41 verifica-se que o ligante asfáltico modificado que apresentou menor enrijecimento pela adição do material fíler, quando comparado com o CAP 50/70 puro, foi o modificado com RMF. Em sentido contrário, a amostra que mais enrijeceu foi o ligante asfáltico modificado com cal. Pesquisas (Bardini et al., 2012; Bardini, 2013) avaliando o desempenho reológico do asfalto com diferentes fíleres (cal, cimento, sílica e pó de brita), indicaram a cal como o fíler que apresentou maior rigidez, em relação a amostras de CAP 50/70 e 85/100. Segundo os autores, o efeito enrijecedor da cal é atribuído à forma de partícula, textura superficial e afinidade



físico-química com o ligante asfáltico. As curvas mestras dos asfaltos modificados apresentaram de um modo geral tendência de paralelismo em relação à curva mestre do CAP 50/70. A adição dos materiais fíleres contribuiu para o aumento da resistência à deformação permanente das misturas asfálticas, atribuída aos aumentos do módulo de cisalhamento dinâmico nas temperaturas elevadas (Nascimento, 2015). No entanto, a resistência à fadiga deve ser analisada a fim de prever a susceptibilidade das misturas ao trincamento prematuro.

### **4.3.3 Fluência e recuperação sob tensão múltipla, *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR)**

Neste subitem são apresentados os resultados da recuperação elástica e a da compliance não recuperável (Jnr) do ligante asfáltico convencional CAP 50/70 e dos ligantes asfálticos modificados. Os ligantes asfálticos modificados foram estudados em dois grupos. O primeiro grupo corresponde aos ligantes modificados com elastômeros do tipo borracha e composto de borracha (borracha mais cal), enquanto que o segundo grupo corresponde ao estudo dos ligantes modificados com 20% em peso dos materiais fíleres cal, RMF e lodo de ETA.

A Figura 4.42 apresenta os percentuais de recuperação dos asfaltos modificados com elastômeros, a temperaturas na faixa de 40 °C a 64 °C para os carregamentos de 0,1 kPa, 1,6 kPa e 3,2 kPa respectivamente. As temperaturas avaliadas correspondem às recomendações do Instituto do asfalto (Institute, 2010) que consideram aquelas que ocorrem durante a vida útil do pavimento. As temperaturas de avaliação do ligante asfáltico estão baseadas no grau de desempenho PG do ligante asfáltico, neste contexto, o CAP 50/70 apresentou a classificação PG 64-XX. Sobreiro (2014) relata que o edital 0448/10-00 DNIT referente ao levantamento deflectométrico constata que a temperatura máxima do revestimento asfáltico em 30.000 km da malha rodoviária do Brasil não ultrapassa 64 °C, razão pela qual os ensaios de fluência e recuperação elástica foram realizados a temperaturas entre 40°C e 64 °C, destacando a temperatura crítica de 64°C para a avaliação da deformação permanente.

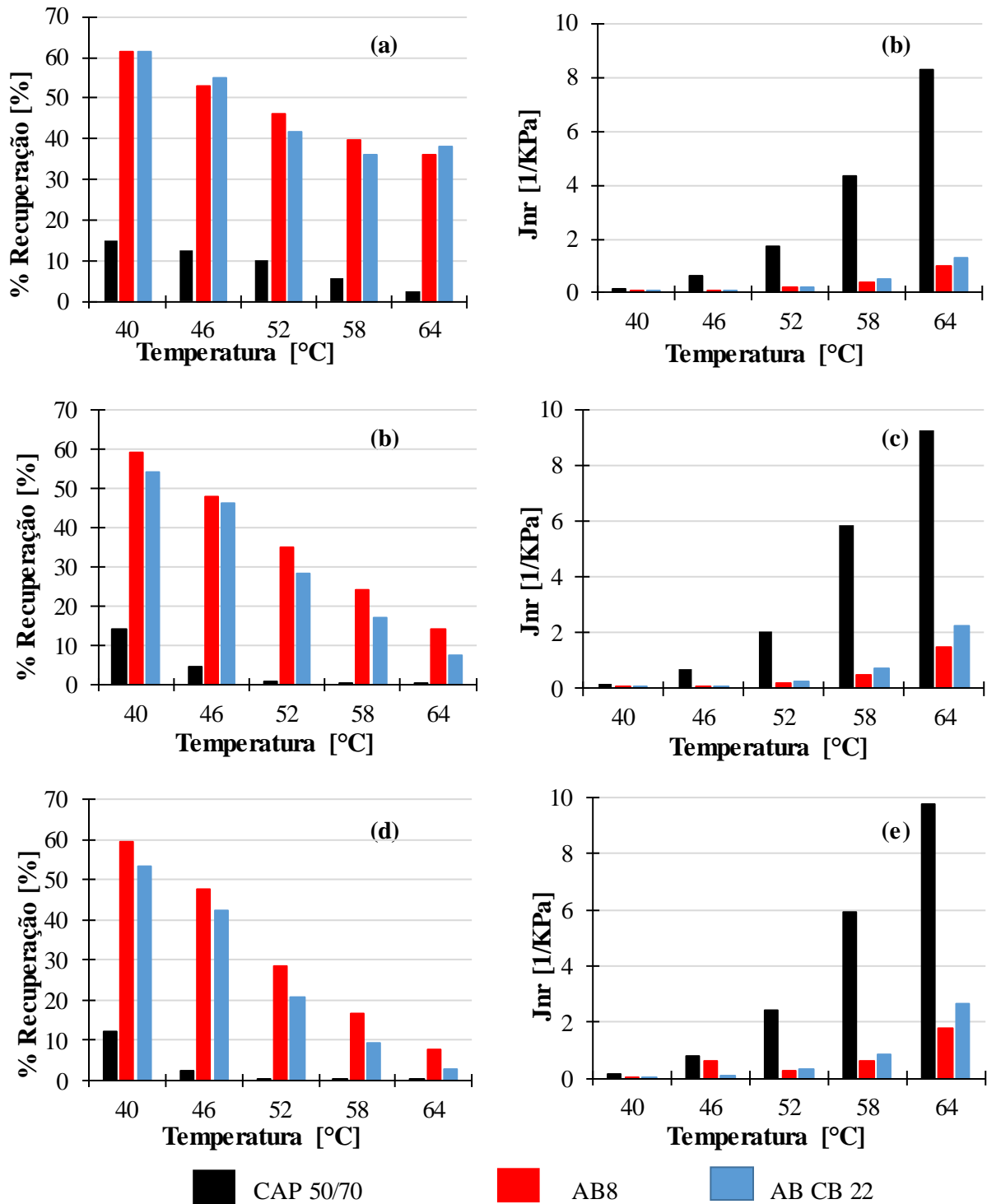


Figura 4.42 Resultados do ensaio MSCR de ligantes modificados com elastômeros: (a-b) carregamento 0.1 kPa; (c-d) carregamento 1.6 kPa; (e-f) carregamento 3.2 kPa.

De forma geral, pode-se observar que a adição dos modificadores, tipo elastômero, aumenta o percentual de recuperação em relação à amostra de referência de CAP 50/70. O percentual de recuperação dos asfaltos modificados com elastômeros decresce gradualmente em função do aumento da temperatura de avaliação. Os maiores e menores percentuais de recuperação

apresentam-se às temperaturas de 40 °C e 64 °C, respectivamente. Observa-se que o maior percentual de recuperação ocorreu para as menores magnitudes de tensão cisalhante impostas durante o ensaio, ou seja, maior recuperação para a tensão cisalhante de 0,1 kPa e menor recuperação para a tensão cisalhante de 1,6 kPa.

A recuperação identifica a resposta elástica do ligante asfáltico, o valor nulo indica que a deformação acumulada não apresenta recuperação (Adorjányi & Fuleki, 2011; Sobreiro, 2014). A amostra de referência do CAP 50/70 apresenta valores de recuperação elástica ao longo da faixa de temperatura analisada menores que 15% para o nível de tensão de 0,1 kPa. Já para os níveis de tensões de 1,6 kPa e 3,2 kPa, observa-se que os valores de recuperação elástica são apreciáveis para temperaturas de até 46 °C. Para as temperaturas acima de 52 °C observa-se que o percentual de recuperação elástica do material de referência é desprezível, sendo inferior a 1%. Pode-se então deduzir que a utilização do CAP 50/70 para temperaturas de serviço altas (acima de 52 °C) pode induzir a geração de afundamento por trilha de roda devido ao baixo percentual de recuperação. Resultados similares são encontrados na literatura (Domingos & Faxina, 2012, 2015; Domingos et al., 2014; Sobreiro, 2014; Camargo, 2016).

Com a finalidade de melhorar a condição de consistência do ligante asfáltico CAP 50/70 e aumentar a capacidade de recuperação elástica às solicitações de tráfego impostas, os resultados obtidos mostram que a incorporação de materiais elastômeros tipo borracha pode ser eficiente nessa ação. No Item 4.3.1 será observado que a borracha aumenta a elasticidade do material, por meio da diminuição do ângulo de fase em relação à amostra de CAP 50/70 puro. Constatou-se aumento da recuperação elástica do AB8 e do AB CB 22 em relação à amostra CAP 50/70 puro. Os percentuais de recuperação do AB8 e do AB CB 22 decrescem em função do aumento da temperatura e da tensão de cisalhamento. Ressalta-se que o aumento na recuperação do AB8 em relação ao AB CB22 pode ser atribuído a dois fatores: a) ao menor teor de borracha no AB CB22 (13,6%) em relação ao AB8 LAB (17%); b) à presença do material fíler tipo cal incorporado à borracha havendo a possibilidade da cal reagir com a borracha, diminuindo a elasticidade do ligante, embora, conforme será mostrado na Figura 4.44, a cal por si só já pode contribuir para a redução da recuperação elástica das misturas a depender da temperatura e tensão atuante.

O parâmetro  $J_{nr}$  é um indicativo da deformação permanente (Adorjányi & Fuleki, 2011; Golalipour, 2011). Maiores valores do  $J_{nr}$  se traduzem em maior susceptibilidade à ocorrência de deformações permanentes no revestimento asfáltico do pavimento. De forma geral, constata-se que os ligantes asfálticos modificados com elastômeros apresentam menores valores do parâmetro

Jnr em relação ao CAP 50/70, apresentando maior capacidade de suporte às deformações permanentes ao longo da faixa de temperatura para os estágios de tensões impostos nos ensaios.

Em referência à compliance não recuperável, os ligantes asfálticos avaliados (AB8 e AB CB 22) nas temperaturas entre 40 °C e 46 °C apresentaram menores valores de Jnr. Para temperaturas na faixa de 52 °C a 64 °C observou-se diminuição do Jnr para os ligantes asfálticos modificados com elastômeros em comparação ao CAP 50/70. As reduções do parâmetro Jnr apresentam-se proporcionais ao aumento da temperatura e da tensão. Pode-se observar que a grandeza do Jnr para o CAP 50/70, à temperatura de 64 °C, varia entre 8 e 10 (1/kPa) para os carregamentos de 0,1, 1,6 e 3,2 kPa, respectivamente. Enquanto que considerando uma média dos dois asfaltos borracha, os valores do Jnr à temperatura de 64°C oscilam entre 1 e 3 (1/kPa) para os carregamentos de 0,1, 1,6 e 3,2 kPa, respectivamente. Todavia, pode-se descrever que existe uma defasagem do parâmetro Jnr em aproximadamente 7 vezes a unidade (1/kPa), entre o CAP 50/70 e a média dos asfaltos modificados com elastômeros (AB8 e AB CB 22). A diminuição média do parâmetro Jnr nos asfaltos modificados com elastômeros, em relação ao CAP 50/70, é atribuída principalmente à capacidade de recuperação elástica e aumento de consistência pela presença da borracha.

A Figura 4.43 apresenta os resultados do Jnr diff para os ligantes modificados com elastômeros do tipo borracha. Os níveis de tensões analisados correspondem a 0,1 kPa – 1,6 kPa e 0,1 kPa - 3,2 kPa. Os ligantes asfálticos modificados com elastômeros apresentaram melhor recuperação elástica e menor suscetibilidade a deformações permanentes, entretanto, apresentam sensíveis às mudanças de tensões inesperadas que podem acontecer no revestimento do pavimento, na temperatura de 64 °C.

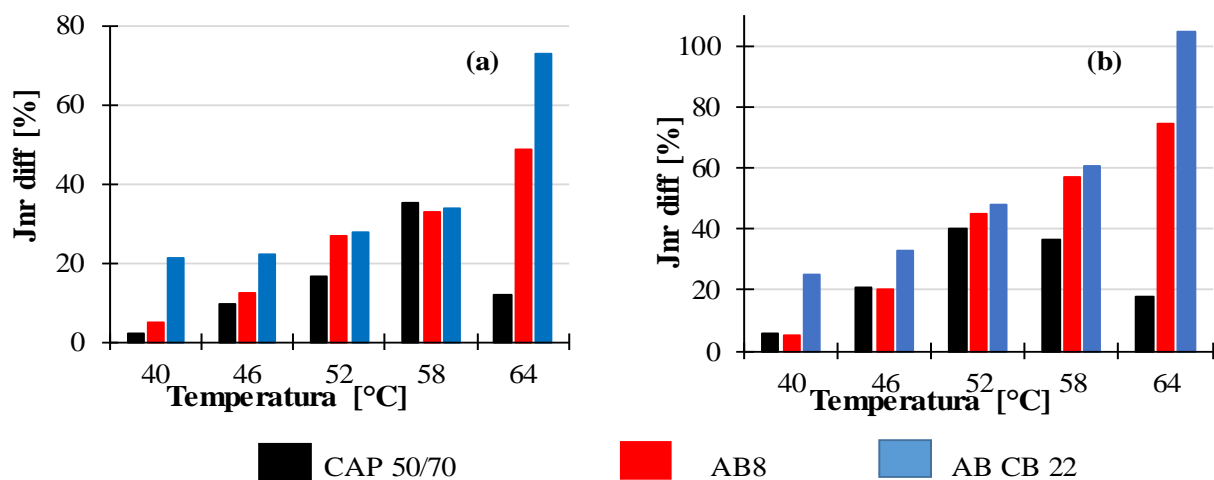


Figura 4.43 Resultados do ensaio MSCR – Jnr diff: (a) 0,1 kPa – 1,6 kPa; (b) 0,1 kPa - 3,2 kPa.

A Figura 4.44 apresenta os percentuais de recuperação dos asfaltos modificados com materiais fileres (cal, RMF e lodo de ETA) para temperaturas na faixa de 40 a 64 °C, para os carregamentos de 0,1; 1,6 e 3,2 kPa respectivamente. Apesar do ensaio MSCR ser concebido para ligantes asfálticos modificados com polímeros, no presente estudo avaliou-se também a deformação permanente dos ligantes asfálticos modificados com fileres.

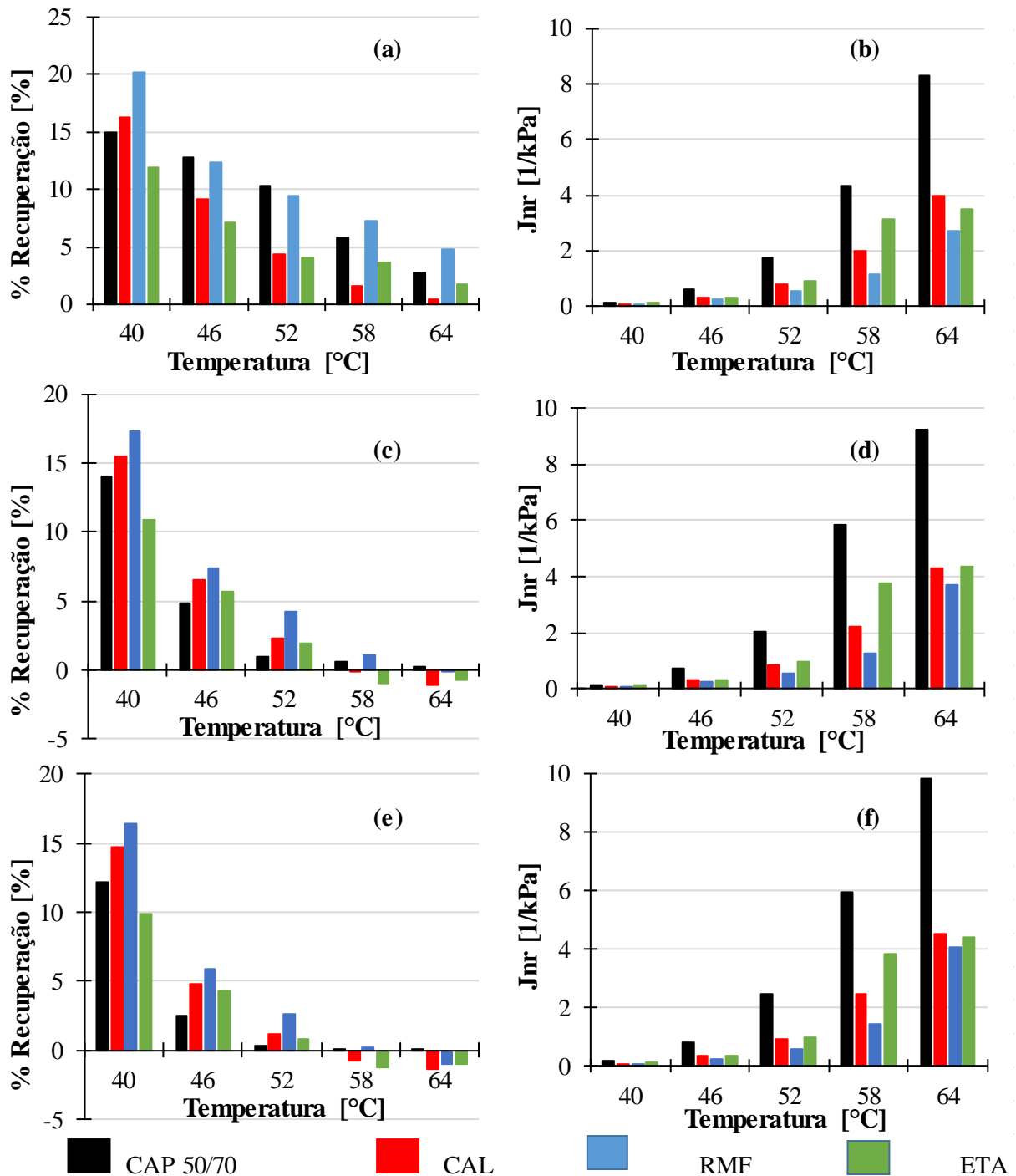


Figura 4.44 Resultados do ensaio MSCR de ligantes modificados com fileres: (a-b) carregamento 0.1 kPa; (c-d) carregamento 1.6 kPa; (e-f) carregamento 3.2 kPa.

A partir da Figura 4.44 observa-se que os ligantes asfálticos modificados com materiais fíleres apresentaram um percentual de recuperação não muito distinto do CAP 50/70 como verificado para o caso dos elastômeros. No entanto, ainda assim, é possível notar que a recuperação dos ligantes modificados com fíler tende a diminuir em relação ao CAP 50/70 com o aumento da temperatura e a se ampliar com a tensão de carregamento. Como era esperado, o CAP 50/70 e os ligantes asfálticos modificados com material fíler apresentam maiores percentuais de recuperação elástica quando submetidos à temperatura de avaliação baixa (40 °C). Em alta temperatura (acima de 40 °C) os ligantes asfálticos modificados apresentaram menores valores de recuperação elástica. Esse tipo de comportamento é característico dos materiais viscoelásticos. Existe uma temperatura em que o material deixa de se comportar como viscoelástico e passa a ter um comportamento puramente viscoso. No comportamento viscoelástico ainda há alguma parcela de recuperação, enquanto que no comportamento viscoso o material torna-se fluido. Em termos da aplicação do carregamento, observa-se que os percentuais de recuperação são diretamente proporcionais às magnitudes das tensões impostas, ou seja, maiores percentuais de recuperação foram obtidos na tensão de 0,1 kPa, enquanto que os menores valores foram obtidos para a tensão de 3,2 kPa. Os resultados aqui mostrados são coerentes e complementam os obtidos para o ângulo de fase mostrados na Figura 4.34 quanto ao regime de comportamento viscoso das misturas.

De forma geral, observa-se que o ligante asfáltico modificado com cal apresentou maiores valores de recuperação elástica que o CAP 50/70 para o carregamento de 0,1 kPa à temperatura de 40 °C, e para as temperaturas de 40 °C e 46 °C nos carregamentos de 1,6kPa a 3,2 kPa. Já nas temperaturas de 52°C a 64°C, o asfalto modificado com cal apresentou menores valores que a amostra de referência. Dessa forma, constata-se que a temperaturas entre 40 °C e 46 °C a cal proporciona uma maior elasticidade no CAP 50/70. O resíduo RMF apresentou maior ou igual percentual de recuperação elástica ao longo da faixa de temperatura para todos os estágios de carregamento em relação ao CAP 50/70, podendo proporcionar um aumento da elasticidade ou de vida de fadiga no concreto asfáltico. O asfalto modificado com lodo de ETA, apresentou comparativamente ao CAP 50/70, comportamento variável com a tensão de carregamento e temperatura. Entretanto, deve ser avaliada a vida de fadiga dos ligantes asfálticos modificados com lodo de ETA, a fim de prevenir o surgimento de trincas devido à limitada recuperação elástica das misturas contendo esse material.

As compliances não recuperáveis ( $J_{nr}$ ) para os ligantes modificados com fíler (Cal; RMF e Lodo de ETA) apresentaram decréscimos em relação ao CAP 50/70 puro. A diminuição do  $J_{nr}$  ocorre em função inversa do aumento da temperatura, obtendo variações relevantes para as

temperaturas superiores a 52 °C nos diferentes estágios de tensões de carregamento. O ligante modificado com fíler que apresentou menores valores de Jnr para os diferentes níveis de tensões e temperaturas entre 52 °C e 64 °C foi o asfalto modificado com RMF. A amostra que apresentou maiores valores do Jnr, após o CAP 50/70, foi o asfalto modificado com lodo de ETA. Os asfaltos modificados com cal apresentaram valores de Jnr menores que o CAP 50/70. Entretanto, os valores do Jnr do asfalto modificado com cal se situaram na ordem intermediária entre os valores obtidos para os asfaltos modificados com RMF e com o lodo de ETA lembrando que volumetricamente ele também se encontra em percentual intermediário entre os dois fíleres. A incorporação do material fíler, de forma geral, aumenta a rigidez do material, aumentando a capacidade de suporte do ligante asfáltico à ocorrência de deformações permanentes no pavimento

A Figura 4.45 apresenta os resultados do Jnr diff para os ligantes modificados com fíleres do tipo cal, RMF e o lodo de ETA. Os níveis de tensões analisados correspondem a 0,1 kPa – 1,6 kPa e 0,1 kPa - 3,2 kPa.

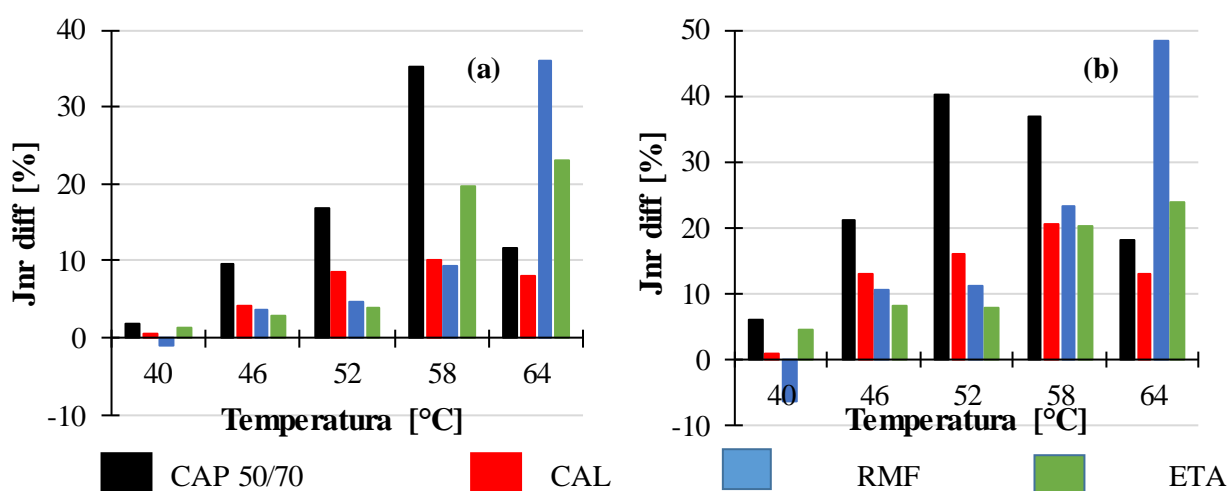


Figura 4.45 Resultados do ensaio MSCR – Jnr diff: (a) 0,1 kPa – 1,6 kPa; (b) 0,1 kPa - 3,2 kPa.

A partir da Figura 4.45 pode-se observar que o ligante asfáltico modificado com cal apresentou diminuição do Jnr diff para as temperaturas de avaliação entre 40 °C e 64 °C em referência ao CAP 50/70. Porém, pode-se observar que a cal contribui à diminuição da susceptibilidade das mudanças de tensões inesperadas, provavelmente devido às transformações químicas na matriz do ligante asfáltico, no intuito da melhoria da adesividade. De forma geral, observa-se que os ligantes asfálticos com adição de materiais fíleres alternativos (RMF e lodo de ETA) tornam-se menos susceptíveis às mudanças de tensões inesperadas nas temperaturas entre 40 °C e 58 °C.

Cabe ainda lembrar que as análises foram realizadas para o mesmo percentual dos diferentes fileres em peso sendo que em termos volumétricos esses percentuais seriam iguais a 8,5%, 5,8% e 13,5% respectivamente para a cal, o RMF e o lodo de ETA sendo relevante a realização de estudos complementares comparativos considerando-se os mesmos teores volumétricos para as misturas. A título de exemplo da importância desse estudo, as Figuras 4.46 e 4.47 apresentam os valores da recuperação e Jnr em função do teor de aditivo nos ligantes asfálticos modificados.

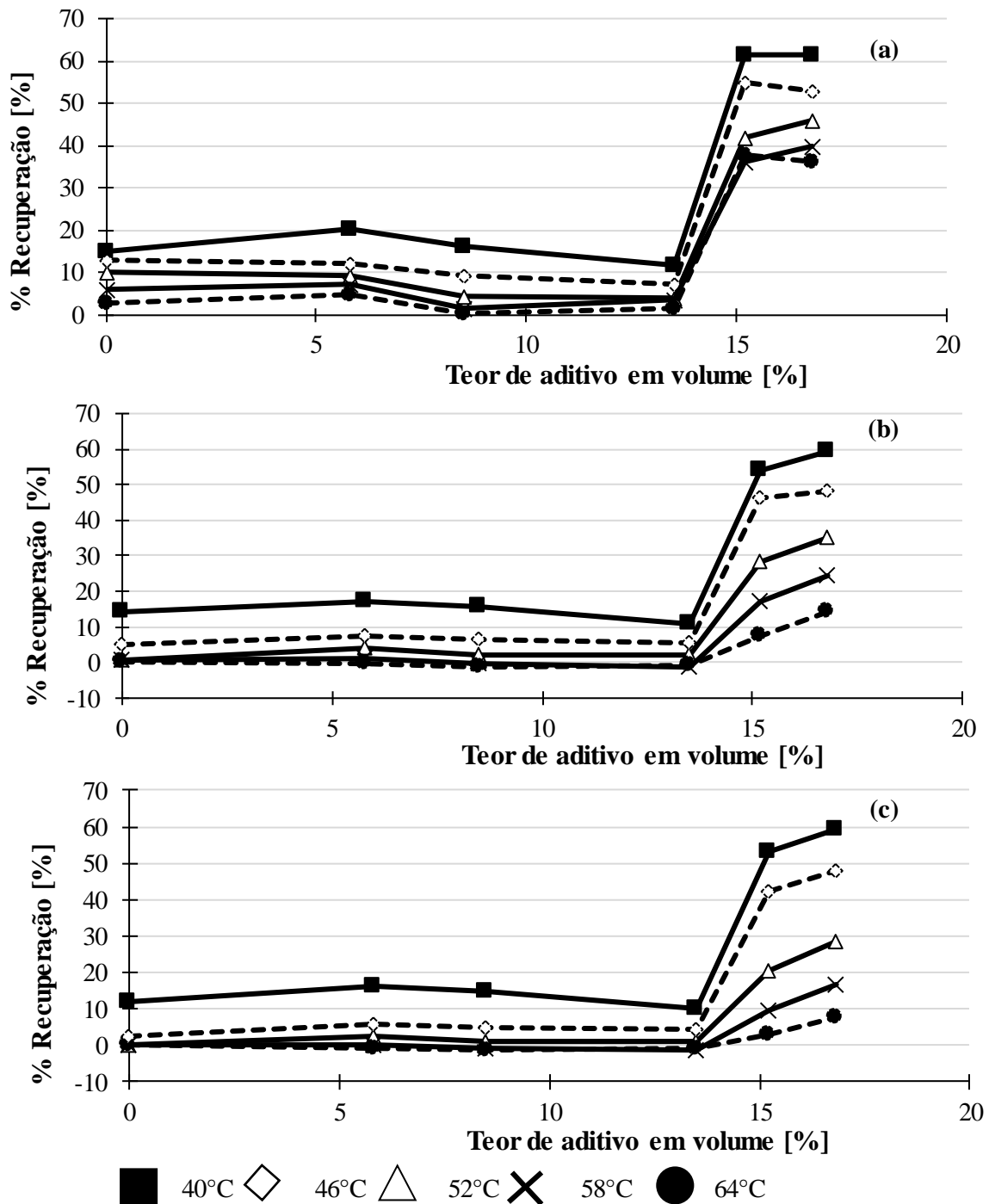


Figura 4.46 Recuperação elástica *versus* teor de aditivo nos ligantes asfálticos modificados: (a) Carregamento 0,1 kPa; (b) Carregamento 1,6 kPa; (c) Carregamento 3,2 kPa.



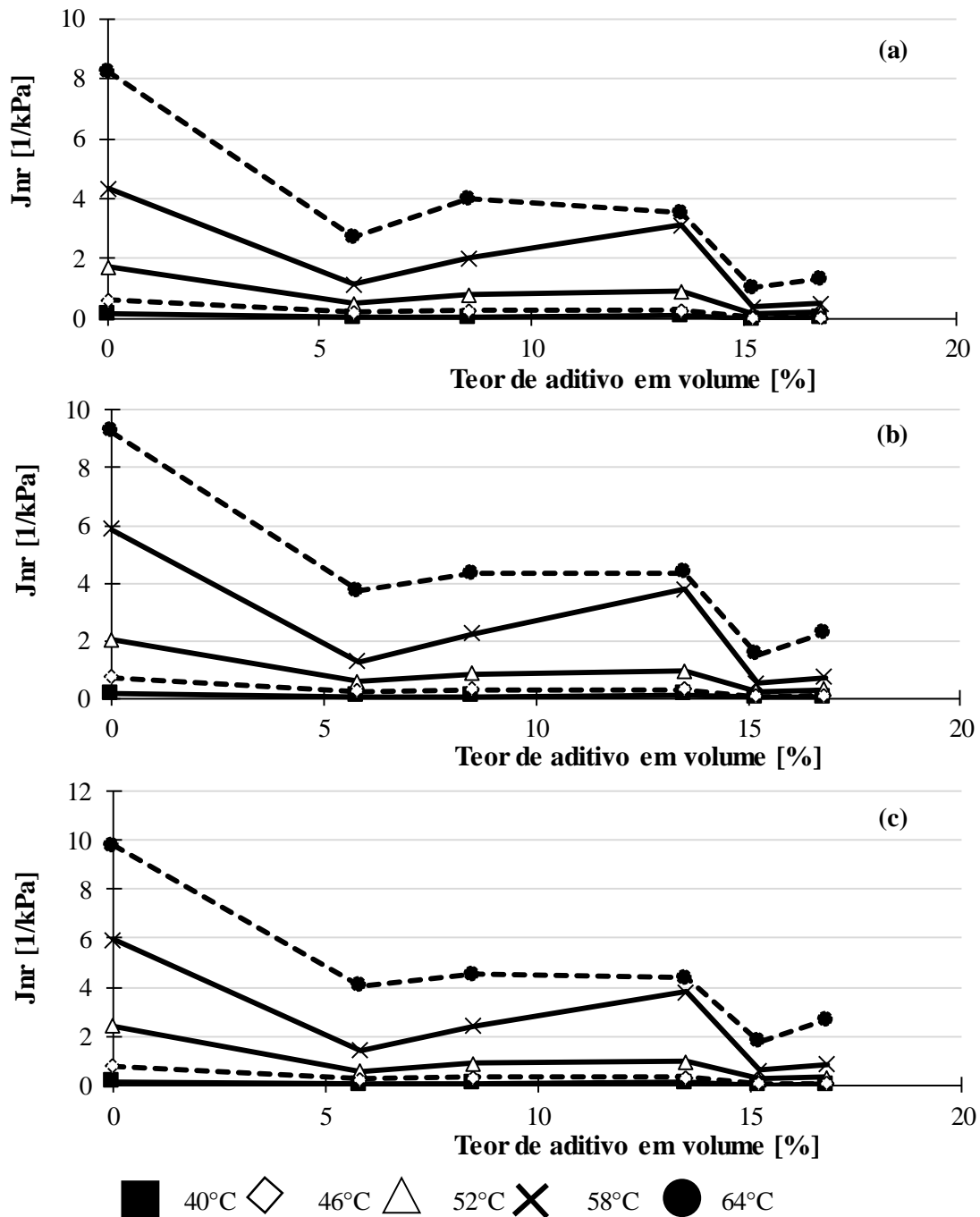


Figura 4.47  $J_{nr}$  versus teor de aditivo nos ligantes asfálticos modificados: (a) Carregamento 0,1 kPa; (b) Carregamento 1,6 kPa; (c) Carregamento 3,2 kPa.

As Figuras 4.46 e 4.47 indicam que o ligante asfáltico modificado com fíler RMF tende a não afetar ou afetar pouco a recuperação elástica e a compliance não recuperável  $J_{nr}$ , enquanto os ligantes asfálticos com os fíleres cal e lodo de ETA apresentam, apesar da diferença no teor volumétrico, resultados similares, o que torna relevante estudos comparativos entre os fíleres com o mesmo teor volumétrico, pois isso pode ajudar a colocar em evidência a influência das características físicas e químico-mineralógica dos fíleres. As Figuras 4.46 e 4.47 mostram ainda

que se considerando apenas a fração borracha como fíler, os ligantes asfálticos modificados com elastômeros AB8 e AB CB20 apresentam resultados similares e valores de recuperação elástica muito superiores aos fíleres estudados. Além disso, observa-se que os valores da compliance não recuperável  $J_{nr}$  nos ligantes asfálticos modificados com elastômeros são inferiores aos fíleres estudados, cabendo aqui a observação de que no tocante a esses parâmetros, ou existe um teor volumétrico de borracha ideal inferior aos valores adotados (13,4% para o ligante asfáltico AB CB20 e 17% para o ligante asfáltico AB8) ou a cal desempenhou o seu papel substituindo a diferença no teor de borracha entre os dois ligantes asfálticos.

#### 4.3.4 Ensaio de Varredura de Amplitude Linear (LAS)

Neste subitem são apresentados os resultados do ensaio de Varredura de Amplitude Linear (LAS) para os dois grupos de asfaltos estudados. O primeiro grupo corresponde aos asfaltos modificados com elastômeros tipo borracha (AB8 LAB, AB CB 22). Enquanto o segundo grupo corresponde aos asfaltos modificados com 20% em peso de material fíler (cal, RMF e Lodo de ETA). Em ambos os casos se considerou o CAP 50/70 como material de referência. Os parâmetros obtidos para o ensaio LAS correspondem à média de três réplicas ensaiadas.

A Figura 4.48 apresenta as curvas características do comportamento dos ligantes asfálticos modificados com elastômeros, por meio da curva tensão *versus* deformação cisalhante. A relação constitutiva foi obtida da segunda fase do ensaio LAS a 25 °C, em que se aplica um incremento linear de deformação entre 0 e 30% ao longo de 3.100 ciclos de carga em 300 segundos, na frequência constante de 10 Hz.

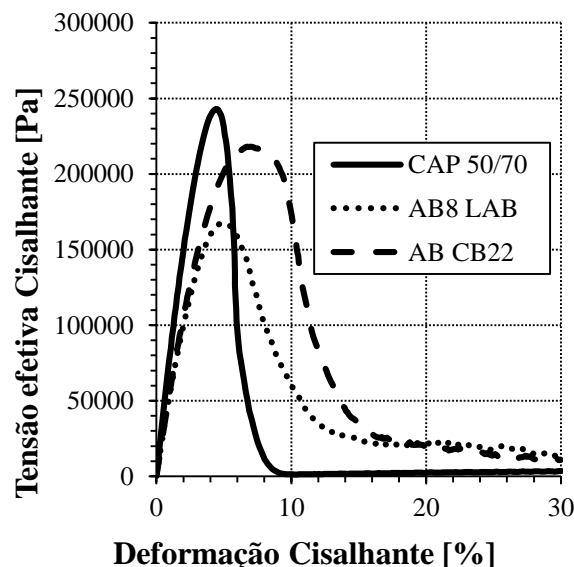


Figura 4.48 Ensaio LAS os asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha.

Segundo a Figura 4.48 pode-se observar diminuição da tensão cisalhante de pico nos asfaltos modificados com elastômeros, tendendo a apresentar maior deformação para o pico em relação ao CAP 50/70. Essa deformação é maior para o composto de borracha o que aponta para a influência da cal. A relação inicial entre a tensão e deformação cisalhante antes de atingir o pico máximo da curva denota a rigidez do material. Neste caso, o CAP 50/70 torna-se o material mais rígido, apresentando maior fragilidade pela queda brusca após o ponto de máxima tensão e atingindo a tensão residual após 10% de deformação cisalhante. No caso dos ligantes AB8 LAB e AB CB 22 eles apresentaram padrão de comportamento, indicado pela rigidez inicial e as tensões residuais após a queda da tensão máxima, contudo mostram ser mais dúcteis ao serem comparados com o CAP 50/70 de referência. Segundo Cardoso (2016) e Micaelo *et al.* (2015) as curvas de comportamento tensão deformação cisalhante dos asfaltos modificados com elastômero tipo borracha apresentam uma forma mais achatada que os asfaltos convencionais, podendo apresentar menor tensão cisalhante de pico e maior nível de deformação, o que corresponde aos resultados obtidos nesse estudo.

A Tabela 4.8 apresenta os parâmetros A e B do ensaio LAS, enquanto que a Figura 4.49 apresenta as curvas de fadiga dos asfaltos modificados com elastômeros.

Tabela 4.8 Valores dos coeficientes A e B dos modelos de fadiga a 25°C para os ligantes modificados com elastômeros.

Ligante asfáltico	A			B		
	Média	Desvio Padrão	Cof. Variação (%)	Média	Desvio Padrão	Cof. Variação (%)
CAP 50/70	3087,5	505,8	16,4	-2,377	0,10	4,2
AB8	14731,2	651,7	4,4	-2,896	0,05	1,6
AB CB 22	69322,7	2093,3	3,0	-2,991	0,02	0,7

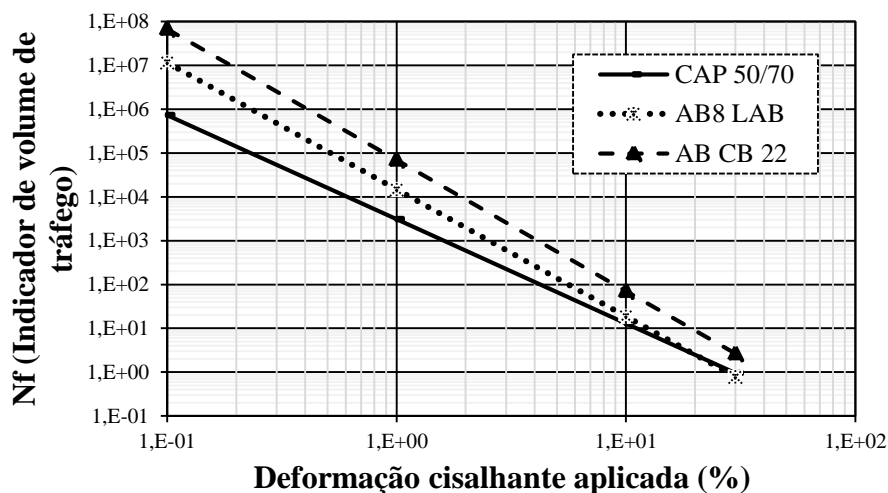


Figura 4.49 Estimativa da vida de fadiga (25°C) em função da deformação para asfaltos modificados com elastômeros.

A partir da Figura 4.49 pode-se constatar o aumento da vida de fadiga à temperatura de 25 °C dos asfaltos modificados com elastômeros tipo borracha em relação ao CAP 50/70, sendo que o AB8 apresentou aumentos significativos para os níveis de deformação baixos, e tendências a valores inferiores em níveis de deformações superiores a 10% em relação à amostra de referência. Enquanto que o AB CB 22 apresentou maior vida de fadiga ao longo dos níveis de deformação avaliados em relação ao AB8 LAB o que pode ser resultante da atuação da cal, uma vez que como se verá a seguir na Figura 4.51 a cal amplia a vida de fadiga da mistura asfáltica. Contudo, os aumentos de rigidez observados na Figura 4.38 podem ser traduzidos em menor vida de fadiga. O fator importante na vida de fadiga é a capacidade de recuperação elástica do ligante asfáltico, expressa por meio da diminuição do ângulo de fase ( $\delta$ ), aumento da recuperação elástica e diminuição da compliance não recuperável ( $J_{nr}$ ), como foi observado nos asfaltos modificados com elastômeros, em relação à amostra de ligante asfáltico puro. Os aumentos de vida de fadiga dos asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha podem ser traduzidos em menores espessuras dos revestimentos asfálticos ou em maiores tempos de vida útil da estrutura do pavimento, ao serem comparados com o ligante convencional de referência.

As Figuras 4.50 a 4.51 e Tabela 4.9 apresentam os resultados do ensaio LAS para a avaliação da vida de fadiga dos asfaltos modificados com adição de 20% em peso de fíleres (cal, RMF e Lodo de ETA).

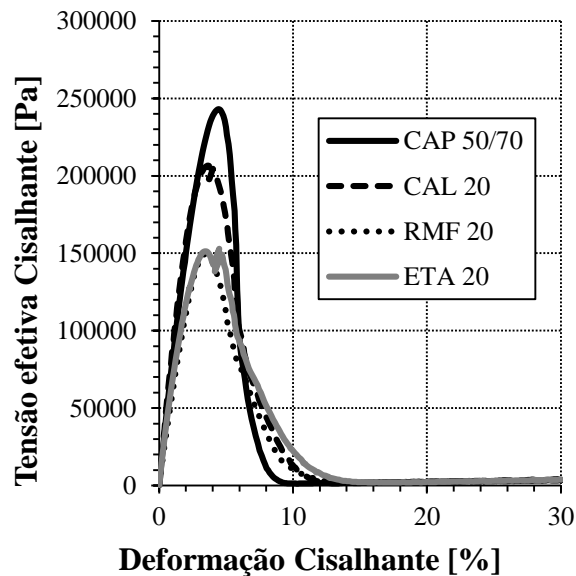


Figura 4.50 Ensaio LAS os asfaltos modificados com fíleres.

Analisando a Figura 4.50 os asfaltos modificados com materiais fíleres (cal, RMF e lodo de ETA) apresentaram menor valor de pico de tensão cisalhante em relação ao CAP 50/70. Os

menores valores foram obtidos para os ligantes modificados com RMF e ETA que apresentaram resultados similares. Os níveis de deformação cisalhante correspondente ao pico característico de cada curva de ligante oscilam na faixa de 3,7 % a 5 %. De forma geral, observa-se que os asfaltos modificados com fíler retardam a ocorrência da tensão cisalhante residual (12%) em relação ao CAP 50/70 (8%). Além disso nota-se que a rigidez inicial dos materiais é semelhante.

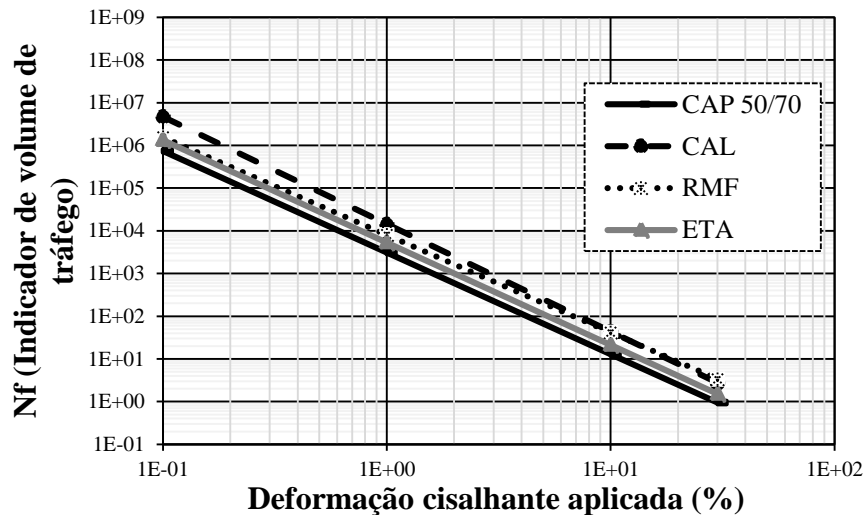


Figura 4.51. Estimativa da vida de fadiga (25°C) em função da deformação para asfaltos modificados com fíleres.

Tabela 4.9 Valores dos coeficientes A e B dos modelos de fadiga a 25°C para os ligantes modificados com fíleres.

Ligante asfáltico	A			B		
	Média	Desvio Padrão	Cof. Variação (%)	Média	Desvio Padrão	Cof. Variação (%)
CAP 50/70	3087,52	505,78	16,38	-2,377	0,10	4,19
CAL	14343,52	302,51	15,64	-2,52	0,02	0,77
RMF	8068,70	241,57	26,54	-2,29	0,01	0,60
ETA	5277,22	892,29	16,91	-2,40	0,03	1,07

Analisando a Figura 4.51 observa-se que os asfaltos modificados com fíleres apresentaram aumento do desempenho da vida de fadiga em relação ao CAP 50/70 puro, atribuído à melhoria das características físicas analisadas anteriormente. O ligante modificado com cal apresentou maior ganho de vida de fadiga ao longo da faixa de deformação cisalhante, entretanto para maiores níveis de deformação o comportamento do ligante com RMF tende a superar o obtido para o ligante com cal. Os ligantes modificados com o fíler alternativo de lodo de ETA apresentaram pouco ganho de vida de fadiga ao serem comparados com o CAP 50/70, ocorrendo um certo paralelismo entre as curvas obtidas. Observa-se que o asfalto modificado com RMF não obedece ao mesmo padrão de comportamento do CAP 50/70, apresentando maiores valores de vida de fadiga a um elevado nível de deformação (30%). Apesar dos asfaltos modificados com fíleres não

apresentarem incrementos altos na vida de fadiga, observa-se que a incorporação dos resíduos sólidos dentro da matriz do asfalto não prejudica o desempenho tradicional do CAP 50/70, ao contrário, o melhora um pouco, o que transforma o uso desses resíduos em uma alternativa válida em termos de disposição final dos resíduos sólidos e preservação ambiental além de gerar economia no uso do asfalto um vez que parte deste é substituído pelo resíduo.

## 5 APRESENTAÇÃO E DISCUSÃO DE RESULTADOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Neste capítulo são inicialmente apresentados e discutidos os resultados obtidos nas dosagens de misturas asfálticas tipo CBUQ e CPA. Em seguida são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios da caracterização mecânica dos dois tipos de misturas asfálticas, incorporando os ligantes asfálticos modificados com influência dos materiais elastômeros e fíleres. No caso dos asfaltos modificados com elastômero foram estudados o AB8 e AB CB 22, enquanto que para os asfaltos modificados com fíleres foram estudados a incorporação da cal como amostra de referência, e os materiais alternativos rejeito de minério de ferro RMF e lodo de ETA.

### 5.1 PARÂMETROS DE DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

#### 5.1.1 Ensaio Marshall de misturas asfálticas CBUQ

A Figura 5.1 apresenta as características volumétricas de dosagem, assim como também os parâmetros da solicitação da carga monotônica estabilidade [E], fluência [F] e relação estabilidade/fluência Marshall [E/F] *versus* o teor de ligante asfáltico para a amostra de referência com CAP 50/70 e para as misturas realizadas com asfaltos modificados com elastômeros.

As características volumétricas das misturas asfálticas com ligantes asfálticos modificados com elastômeros do tipo borracha obedecem ao padrão de comportamento esperado, apresentado: diminuição do volume de vazios (Vv); aumento dos vazios do agregado mineral (VAM) e conseqüentemente diminuição da relação betume vazios (RBV) para o aumento do teor de asfalto.

A mistura com asfalto borracha AB8 apresentou maior Vv em função do aumento do teor de asfalto, fato que pode ser atribuído ao aumento da viscosidade. Asfaltos mais viscosos precisam de maior espessura para recobrir as partículas de agregado da mistura asfáltica, que associados a baixos teores de asfaltos, podem resultar em ainda maior volume de vazios. No caso da mistura com AB CB 22 observa-se uma diminuição do Vv em relação à mistura com AB8 para uma mesma energia de compactação, fato que pode ser atribuído à presença da cal virgem. Neste caso, a cal virgem por ser material fíler cria pontos de contato entre os agregados apresentando menor volume de vazios. Porém, as misturas densas com asfalto borracha precisam de maior energia de compactação para o fechamento dos vazios, quando se tem por referência o CAP 5070 (Neto, 2004).

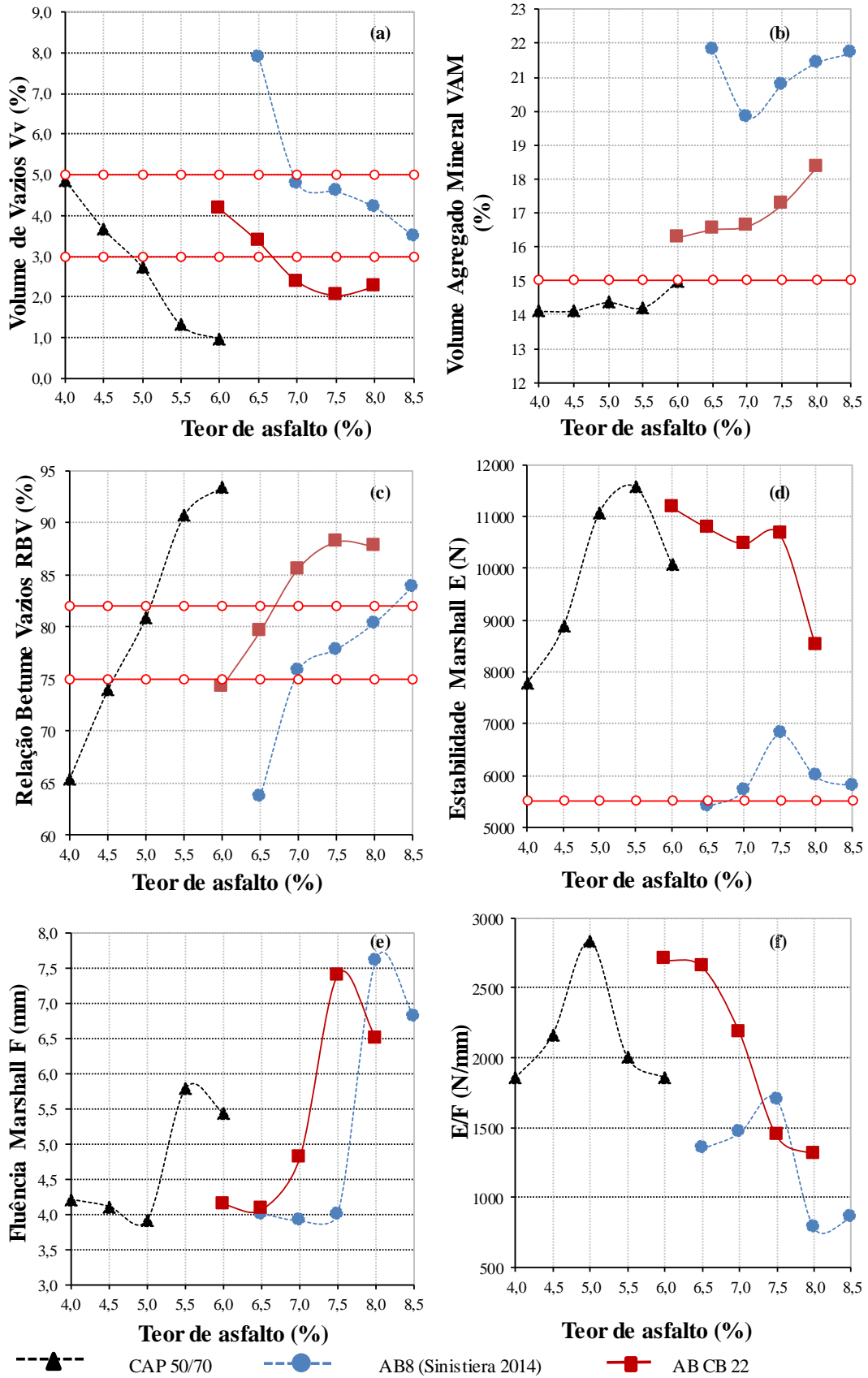


Figura 5.1 Ensaio Marshall: (a) Volume de vazios [Vv]; (b) Volume de Agregado Mineral [VAM]; (c) Relação Betume Vazios [RBV]; (d) Estabilidade Marshall [E]; (e) Fluência Marshall [F]; (e) Relação [E/F] em misturas CBUQ.



Os vazios do agregado mineral podem ser considerados como a representação do que não é agregado numa mistura, ou seja, o volume de ar e ligante efetivo na mistura (Bernucci *et al.*, 2008). A mistura de referência (CAP 50/70) apresentou menores valores de vazios para menores teores de asfalto com relação à mistura com AB8. No caso da mistura com AB CB 22 observa-se que a presença da cal virgem gerou um volume de vazios menor e conseqüentemente menor VAM que a mistura com AB8. De forma geral, o VAM pode ser entendido como o volume de película que recobre os agregados, sendo que misturas asfálticas modificadas com borracha, precisam maior volume de asfalto para o recobrimento dos agregados.

A relação betume vazios (RBV) pode ser entendida como o grau de saturação de material asfáltico na mistura asfáltica. Porém, maiores teores de asfalto numa mistura asfáltica, refletem em maiores valores da RBV. Para um mesmo teor de asfalto, as misturas AB8 e AB CB 22 apresentam menores valores de RBV em relação ao CAP 50/70, sendo ainda menor na mistura AB8. Este fato é atribuído aos aumentos do VAM.

A estabilidade Marshall *versus* o teor de ligante asfáltico corresponde ao comportamento típico pico para as misturas CBUQ com CAP 50/70 e AB8. A mistura com AB8 apresentou diminuição da estabilidade Marshall em relação à mistura de referência, fato que pode ser atribuído ao aumento do volume de vazios como mostra a Figura 5.2 (a).

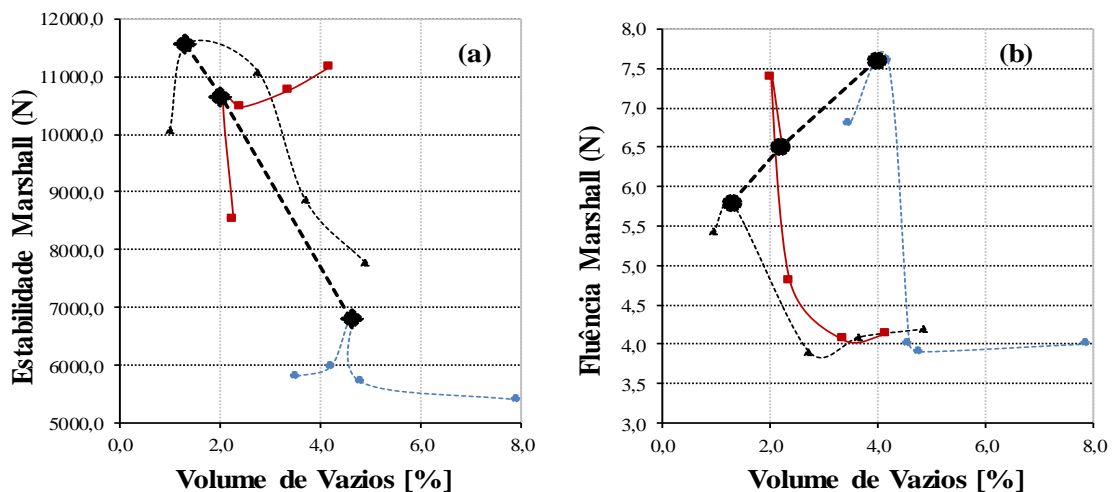


Figura 5.2 (a) Estabilidade e (b) fluência Marshall *versus* volume de vazios.

Cabe destacar que nas misturas com asfaltos modificados com borracha (AB8) não ocorre uma ampliação da perda de estabilidade com o aumento do volume de vazios determinado após o ponto considerado como ótimo como ocorre para o CAP 50/70. Isso pode ser atribuído à ação da

borracha na mistura AB 8 e à ação da borracha e do fíler cal na mistura AB CB 22 sendo que nessa última chega mesmo a ocorrer um aumento com a ampliação do volume de vazios.

As curvas de fluência Marshall para as misturas asfálticas com CAP 50/70 e asfaltos modificados com elastômeros indicam um mesmo padrão de comportamento. O pico de fluência Marshall no caso da mistura com CAP 50/70 foi atingido para teores superiores de 5%, enquanto as misturas com asfaltos modificados com elastômeros AB8 e AB CB 22 atingiram os picos de máximo nos teores superiores de 7.5% e 6.5% respectivamente. A Figura 5.2 (b) mostra que em termos de fluência ela se amplia quando se atinge valores de volume de vazios inferior a determinado limite. No presente estudo esse limite de  $V_v$  inferior, ou seja, para o qual menores valores de  $V_v$  ampliam a fluência foram de aproximadamente 2,7% para o CAP 50/70; 4,8% para a mistura AB 8 e 2,4% para a mistura AB CB 22. Observa-se ainda nessa figura que o valor da máxima fluência tende a aumentar com o  $V_v$  o que era de se esperar.

Finalmente, as curvas da relação entre estabilidade e fluência Marshall (E/F) poderia ser entendida como o parâmetro de rigidez e de avaliação da coesão entre os agregados (Masoudi *et al.*, 2017). A mistura asfáltica de referência com 5% de CAP 50/70 apresenta maior rigidez em comparação com as misturas com ligantes asfálticos modificados com elastômeros (AB8 e AB CB 22). Pesquisas similares com utilização de asfalto borracha na via úmida indicam diminuição da relação E/F em relação a ligantes convencionais (Ghasemi & Marandi, 2013). As misturas com AB8 e AB CB 22 apresentaram respectivamente uma diminuição da relação E/F máxima de aproximadamente 6% e 40% em relação à mistura com CAP 50/70, podendo concluir que a presença da cal no composto de borracha AB CB 22 melhora as características mecânicas em resposta às cargas monotônicas.

A Figura 5.3 e Tabela 5.1 apresentam os parâmetros volumétricos no teor ótimo de ligante asfáltico para as misturas CBUQ elaboradas com asfaltos modificados com elastômeros.

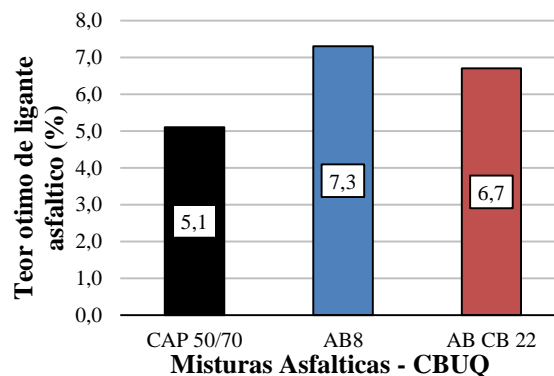


Figura 5.3 Teor ótimo de asfalto em misturas CBUQ com asfaltos modificados com elastômeros.

Tabela 5.1 Parâmetros de dosagem Marshall das misturas CBUQ com asfaltos modificados com elastômeros e amostra de referência CAP 50/70.

Parâmetro	Especificação (DNIT 2006)	CAP 50/70	AB8 (Sinisterra 2014)	AB CB 22
Teor de Asfalto (%)	----	5,1	7,3	6,7
d (g/cm <sup>3</sup> )	----	2,421	2,320	2,4
DMT (g/cm <sup>3</sup> )	----	2,480	2,440	2,475
Vv (%)	3 a 5	3,0	5,1	3,0
VAM (%)	15	14,1	15,0	16,5
RBV (%)	75 a 82	82,0	68,0	82,0
Estabilidade E (N)	5500	11150	6250	10500
Fluência F (mm)	----	3,9	4,0	3,9
E/F (N/mm)	----	286	156	269

Os teores ótimos de asfalto nas misturas CBUQ com asfaltos modificados com elastômeros apresentaram maiores teores em relação ao CAP 50/70. Esses resultados são coerentes com os obtidos por diversos pesquisadores (Neto 2004, Sinisterra 2014, Camargo 2016, Nuñez 2017). Os acréscimos do teor de asfalto nas misturas AB8 e AB CB22 em relação ao CAP 50/70 foram da ordem de 2.2% e 1.6% respectivamente, fato atribuído à presença dos grãos de borracha e composto de borracha com cal respectivamente, o que resulta se deduzido, os teores de elastômeros adicionados em teores se asfalto usados ligeiramente superiores ao teor ótimo obtido para o CAP 50/70 (5,1%), ou seja, tem se um teor de CAP aproximadamente igual 6,1% na mistura AB 8 e 5,4 na mistura AB CB 22. O aumento da viscosidade no ligante asfáltico, especialmente no asfalto borracha, requer maior espessura de película para cobrir as partículas de agregado (Sinisterra, 2014), gerando maior Vv e VAM, assim como também diminuição da RBV.

A Figura 5.4 apresenta as características volumétricas de dosagem, assim como também os parâmetros da solicitação da carga monotônica estabilidade [E], fluência [F] e relação estabilidade/fluência Marshall [E/F] *versus* o teor de ligante asfáltico para a amostra de referência com CAP 50/70 e para as misturas realizadas com asfaltos modificados com fileres.

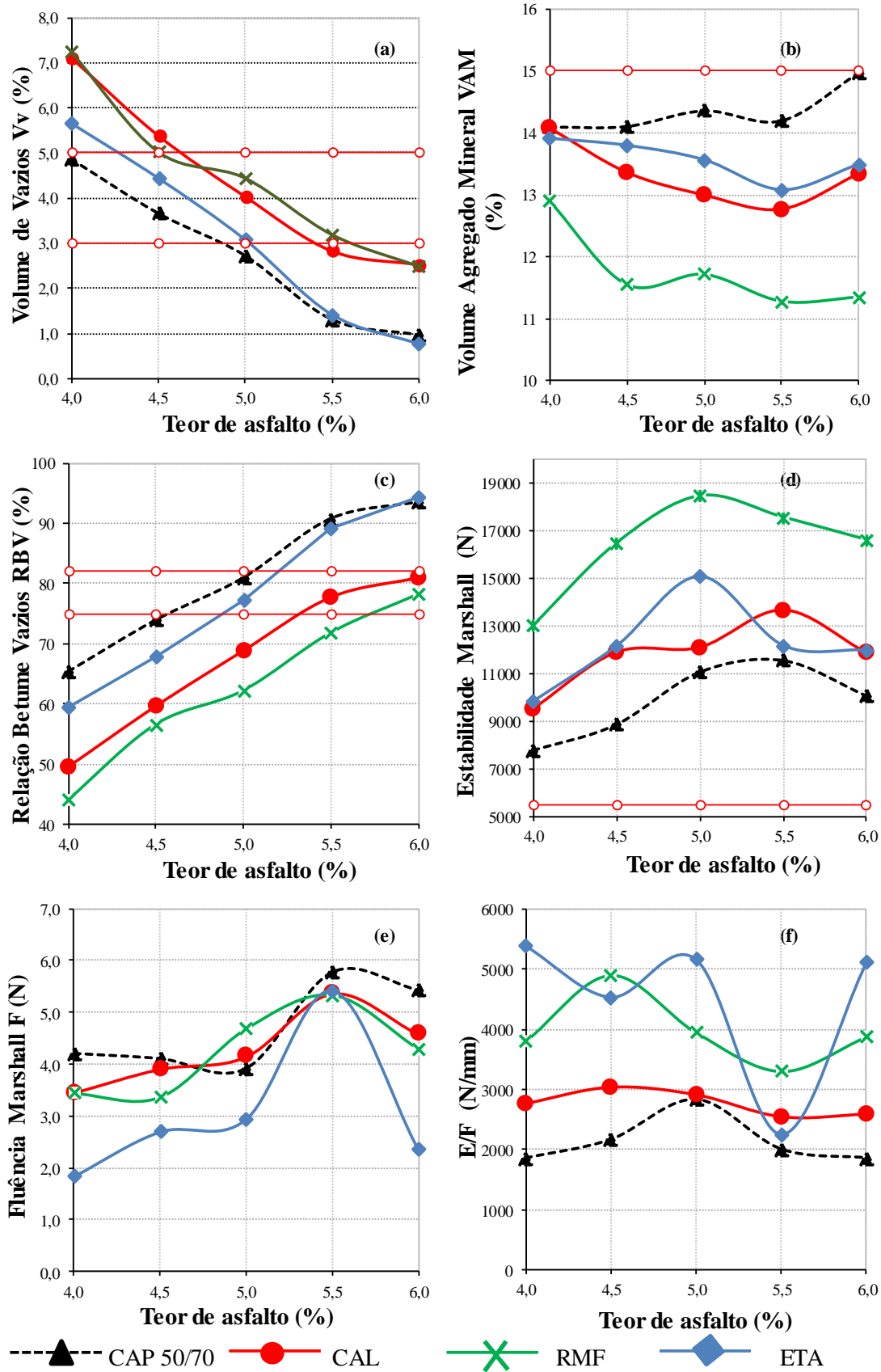


Figura 5.4 Ensaio Marshall: (a) Volume de vazios [Vv]; (b) Volume de Agregado Mineral [VAM]; (c) Relação Betume Vazios [RBV]; (d) Estabilidade Marshall [E]; (e) Fluência Marshall [F]; (e) Relação [E/F] em misturas CBUQ.

Para a faixa de teor provável analisado, o volume de vazios  $V_v$  das amostras CBUQ com asfaltos modificados com fíleres apresentaram acréscimos em relação à amostra de referência CBUQ com CAP 50/70. Esse fato pode ser atribuído à densidade real do ligante asfáltico. Os ligantes asfálticos modificados apresentam maior densidade real devido ao aumento da densidade real dos fíleres em relação ao CAP 50/70. Neste sentido, ligantes asfálticos modificados com materiais de densidades elevadas ocupam menores volumes de asfalto na matriz de agregados, gerando maiores volumes de vazios ao serem comparados com a amostra de referência do CAP 50/70. Assim, observa-se que a mistura elaborada com o asfalto de maior densidade RMF (1,620 g/cm<sup>3</sup>) apresentaram maiores acréscimos do  $V_v$  em relação ao CAP 50/70, seguidamente do asfalto Cal (1,342 g/cm<sup>3</sup>) e finalmente o asfalto ETA (1,138 g/cm<sup>3</sup>).

Observou-se diminuição do VAM nas misturas modificadas com ligantes asfálticos modificados com 20% em peso de matérias fíleres, em relação à mistura CBUQ com CAP 50/70. As diminuições do VAM estão relacionadas à densidade real do ligante asfáltico, onde ligantes asfálticos modificados com fíleres de maior densidade apresentaram menor VAM.

A relação betume vazios foi definida como o grau de saturação de material asfáltico na mistura asfáltica. Os asfaltos modificados com fíleres apresentam maior consistência e maior densidade, porém criam maior dificuldade para saturar os agregados da mistura asfáltica. A partir da Figura 5.4, para a faixa de teores prováveis, observa-se diminuição da RBV em referência ao CAP 50/70. As misturas com asfaltos modificados de maior densidade real, apresentaram diminuições maiores de RBV em referência da mistura com CAP 50/70.

Observa-se o aumento da estabilidade Marshall das misturas com asfaltos modificados com fíleres em relação à mistura com CAP 50/70, fato que pode ser atribuído ao contato entre os grãos de fíler com agregados pétreos ou o que é mais provável, à própria melhoria do ligante com a adição do fíler. As misturas CBUQ com CAP 50/70 e com o ligante modificado com cal tendem a apresentar curvas de estabilidade mais abatidas que as misturas com RMF e lodo de ETA (Figura 5.4 c) isso resulta em uma maior tolerância em campo, pois as pequenas variações no teor de ligante não refletem em demasia no comportamento mecânico da mistura. Entretanto as quatro misturas estudadas apresentam um ponto máximo característico. De forma geral, as misturas estudadas atenderam ao limite mínimo de estabilidade Marshall (550 Kgf) preconizado na especificação DNIT 031 (DNIT, 2006).

A Figura 5.5 (a) apresenta a estabilidade Marshall em função do volume de vazios obtidos para os diferentes teores de ligante indica também a tendência das curvas obtidas para o CAP 50/70 e

para a mistura com cal serem mais aplainadas. Ela mostra ainda que para os fíleres usados o melhor comportamento foi obtido para as misturas contendo RMF o que corrobora com o estudo realizado por Moizinho (2007) que estudou fíler de laterita, material rico em ferro, em misturas betuminosas obtendo melhores resultados que os oriundos das misturas com cal. A Figura mostra também que o fíler Lodo de ETA oferece melhor comportamento quanto à estabilidade do que o CAP 50/70 e que as misturas contendo o fíler cal.

As curvas de fluência Marshall apresentam a resposta à ação da carga monotômica em termos da deformabilidade do material. Pode-se observar a partir da Figura 5.4 (e) que todas as amostras CBUQ com apresentaram um ponto pico de no teor ótimo de ligante asfáltico de 5.5%. A Figura 5.5 (b) apresenta a relação entre a fluência e volume de vazios para o CAP 50/70 e para o fíleres estudados. Observa-se nessa figura que apesar de corresponderem a volumes de vazios distintos as fluências máximas são semelhantes entre as diferentes misturas estudadas. No entanto, essa figura coloca em evidência que exceto os pontos de maior fluência, o lodo de ETA foi o fíler que apresentou menores fluências o que aponta para a sua melhor vida em deformação permanente.

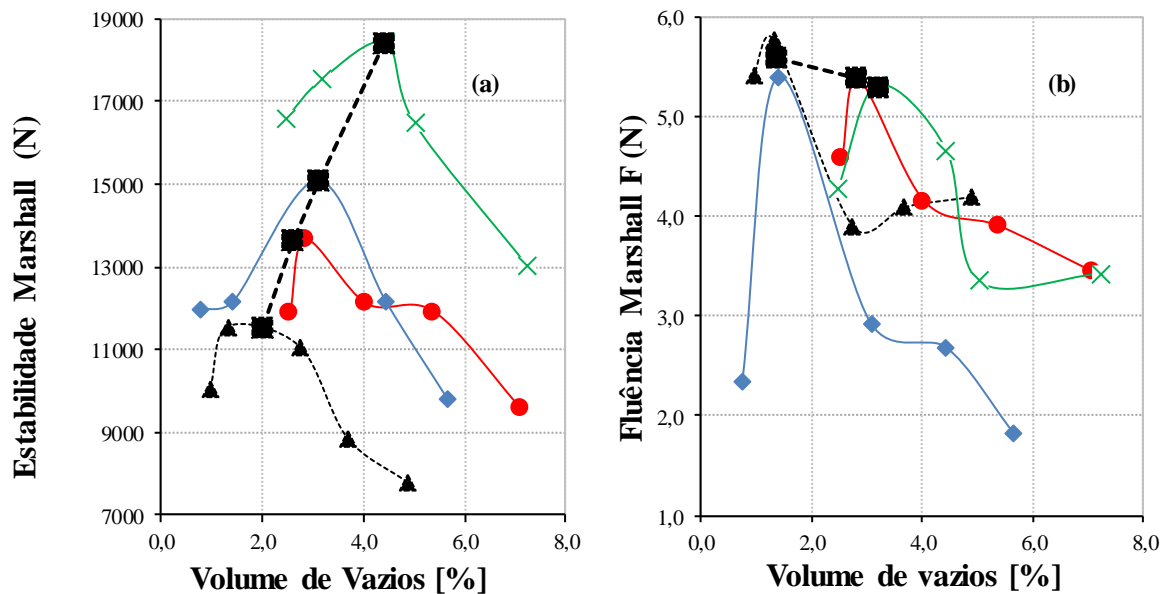


Figura 5.5 (a) Estabilidade e (b) fluência Marshall *versus* volume de vazios.

A Figura 5.6 e Tabela 5.2 apresentam os resultados do teor ótimo de ligante asfáltico das misturas CBUQ com adição dos fíleres estudados, assim como também o resumo dos parâmetros de dosagem obtidos com o ensaio Marshall.

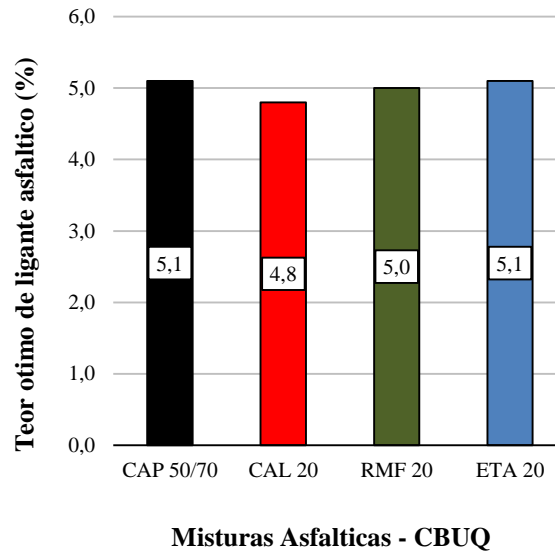


Figura 5.6 Teor ótimo de asfalto em misturas CBUQ com asfaltos modificados com fíleres.

Tabela 5.2 Parâmetros dosagem Marshall de misturas CBUQ com asfaltos modificados com fíleres.

Parâmetro	Especificação (DNIT 2006)	CAP 50/70	CAL	RMF	ETA
Teor de Asfalto (%)	----	5,1	4,8	5,0	5,1
d (g/cm <sup>3</sup> )	----	2,421	2,390	2,440	2,390
DMT (g/cm <sup>3</sup> )	----	2,480	2,510	2,551	2,460
V <sub>v</sub> (%)	3 a 5	3,0	4,4	4,4	2,9
VAM (%)	15	14,1	13,2	11,7	13,4
RBV (%)	75 a 82	82	68	62	80
Estabilidade (N)	5500	11150	12000	18500	14900
Fluência F (mm)	----	3,9	4,3	4,8	3,0
E/F (N/mm)	----	286	279	385	497

Apesar da semelhança dos resultados a Figura 5.6 mostra uma pequena diminuição do teor ótimo de asfalto para as misturas CBUQ com asfalto modificado com adição de Cal (4,8%) e RMF (5,0%) em relação à mistura de referência com CAP 50/70 (5,1%). A mistura CBUQ com asfalto modificado com lodo de ETA apresentou o mesmo teor ótimo que a mistura de referência com CAP 50/70. De forma geral, as misturas CBUQ com asfaltos modificados com fíleres apresentaram aproximadamente 1% de redução do teor efetivo de CAP 50/70 em relação ao peso total da mistura asfáltica, ou seja, 20% de CAP 50/70 puro foi substituído pelo material fíler, considerando-se em especial o RMF e o lodo de ETA por constituírem resíduos, a essa redução de custo deve ser agregada a redução do passivo ambiental gerado pelos mesmos.

### 5.1.2 Dosagem de misturas asfálticas CPA

A Figura 5.7 apresenta os parâmetros volumétricos de dosagem, parâmetros da reação à carga monotônica como a resistência à tração e o desgaste à abrasão cantabro *versus* o teor de ligante asfáltico para as misturas realizadas com asfaltos modificados com elastômeros, assim como também para a amostra de referência com CAP 50/70. Essa Figura mostra resultados semelhantes do volume de vazios comunicantes em função do teor de ligante para o CAP 50/70 e para a mistura com o AB 8. Resultados próximos são também mostrados para as misturas contendo AB 8 e AB CB 22 em função do teor de asfalto.

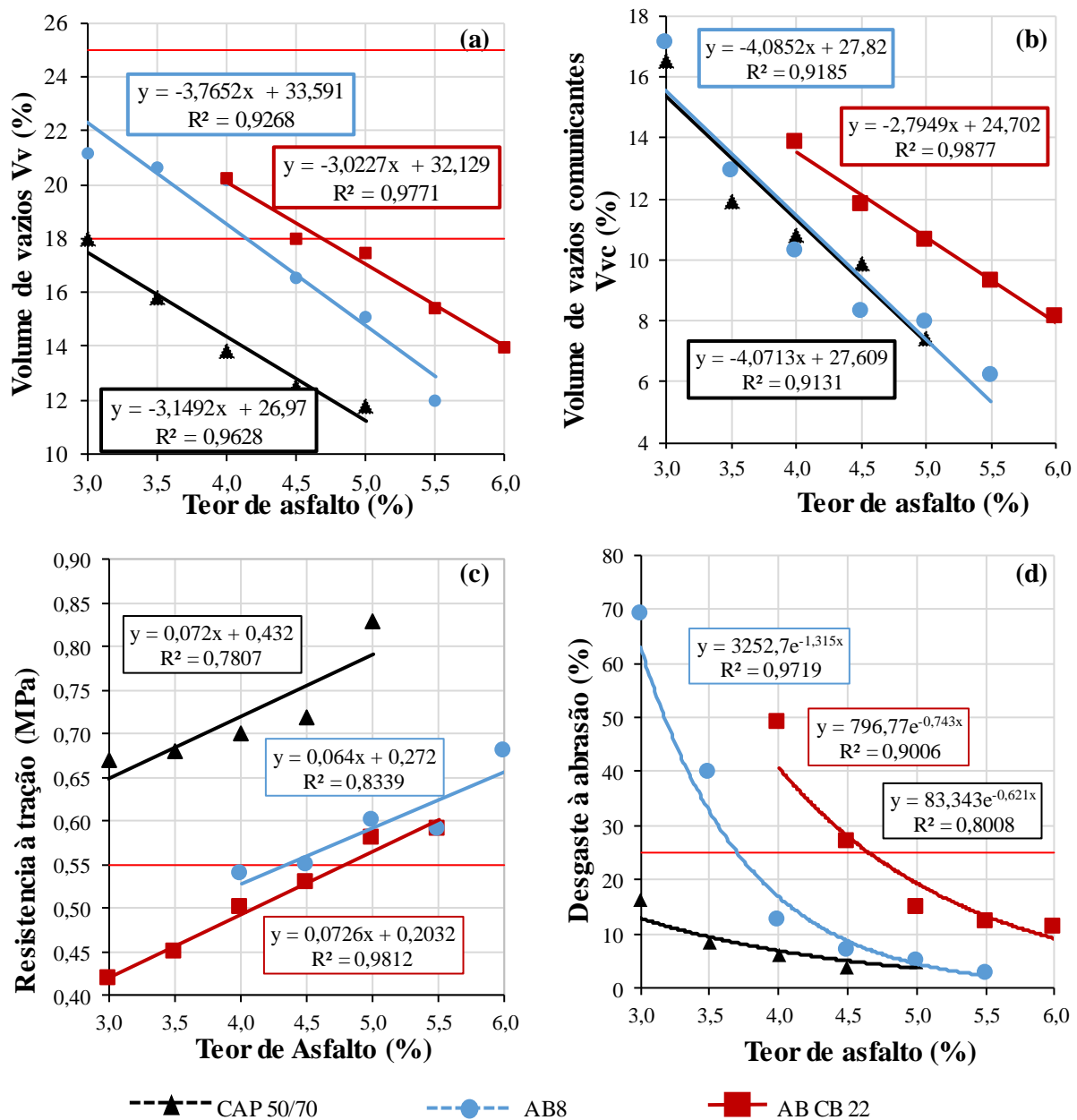


Figura 5.7 Parâmetros de dosagem: (a) Volume de vazios ( $V_v$ ); (b) Volume de vazios comunicantes ( $V_{vc}$ ); (c) Resistência à tração; (d) Desgaste à abrasão *versus* teor de asfalto.



A partir da Figura 5.7 pode-se observar a diminuição do Volume de vazios  $V_v$  e Volume de vazios comunicantes  $V_{vc}$  em função do aumento de teor de asfalto para as misturas de estudo. Para uma mesma energia de compactação, pode observar-se que a mistura CPA com AB CB 22 apresenta maior  $V_v$  em relação à mistura com AB-8 e à mistura com CAP 50/70. O aumento do  $V_v$  nas misturas CPA em relação à mistura de referência com CAP 50/70 pode ser atribuído ao acréscimo da lâmina de asfalto modificado por elastômero, sendo maior no caso do asfalto AB CB 22 pela presença dos grãos cal.

O volume de vazios comunicantes  $V_{vc}$  depende do arranjo estrutural das partículas do agregado, características do ligante asfáltico e energia de compactação. Neste contexto, observa-se que a mistura CPA de referência com CAP 50/70 apresentou a mesma tendência de comportamento da mistura com AB-8. Enquanto que a mistura com AB CB 22 provavelmente devido aos grãos de cal virgem, apresentou maior  $V_{vc}$  em relação às demais misturas.

O conjunto de resultados apresentados na Figura 5.7 aponta para a necessidade de análises complementares dos resultados obtidos na busca de uma maior compreensão dos mesmos, pois o comportamento das misturas depende não apenas do teor de ligante como também do volume de vazios e do volume de vazios comunicantes. Nesse sentido a Figura 5.8 (a) mostra que o volume de vazios comunicantes é função do volume de vazios das misturas. Para um mesmo volume de vazios os volumes de vazios comunicantes são menores na mistura AB 8 e maiores no CAP 50/70. A mistura AB CB 22 assume posição intermediária apontando, seja para a influência do fíler cal nesse parâmetro, seja para a influência da menor presença de elastômero nessa mistura em relação às misturas com AB 8.

A resistência à tração apresentou aumentos em função do aumento do teor de ligante asfáltico para cada mistura estudada. Geralmente observa-se que os valores de resistência à tração são inversamente proporcionais aos volumes de vazios, ou seja, para maiores volumes de vazios ocorrem menores valores da resistência à tração. No entanto, apesar de sua relevância observa-se na Figura 5.8 (b) que para  $V_v$  semelhantes a resistência à tração é maior para misturas com o CAP 50/70 e menor para misturas com o ligante AB 8, assumindo valores intermediários as misturas com o ligante AB CB 22. Também nesse caso os resultados intermediários obtidos para as misturas contendo o ligante AB CB 22 podem ser devidos à influência do fíler cal nesse parâmetro, e/ou à influência da menor presença de elastômero na mistura em relação às misturas com AB 8. Como o  $V_{vc}$  está relacionado ao  $V_v$  a Figura 5.8 (c) mostra tendências semelhantes às obtidas

em relação à influência de Vv na resistência à tração quando se analisa esse parâmetro em função de Vvc.

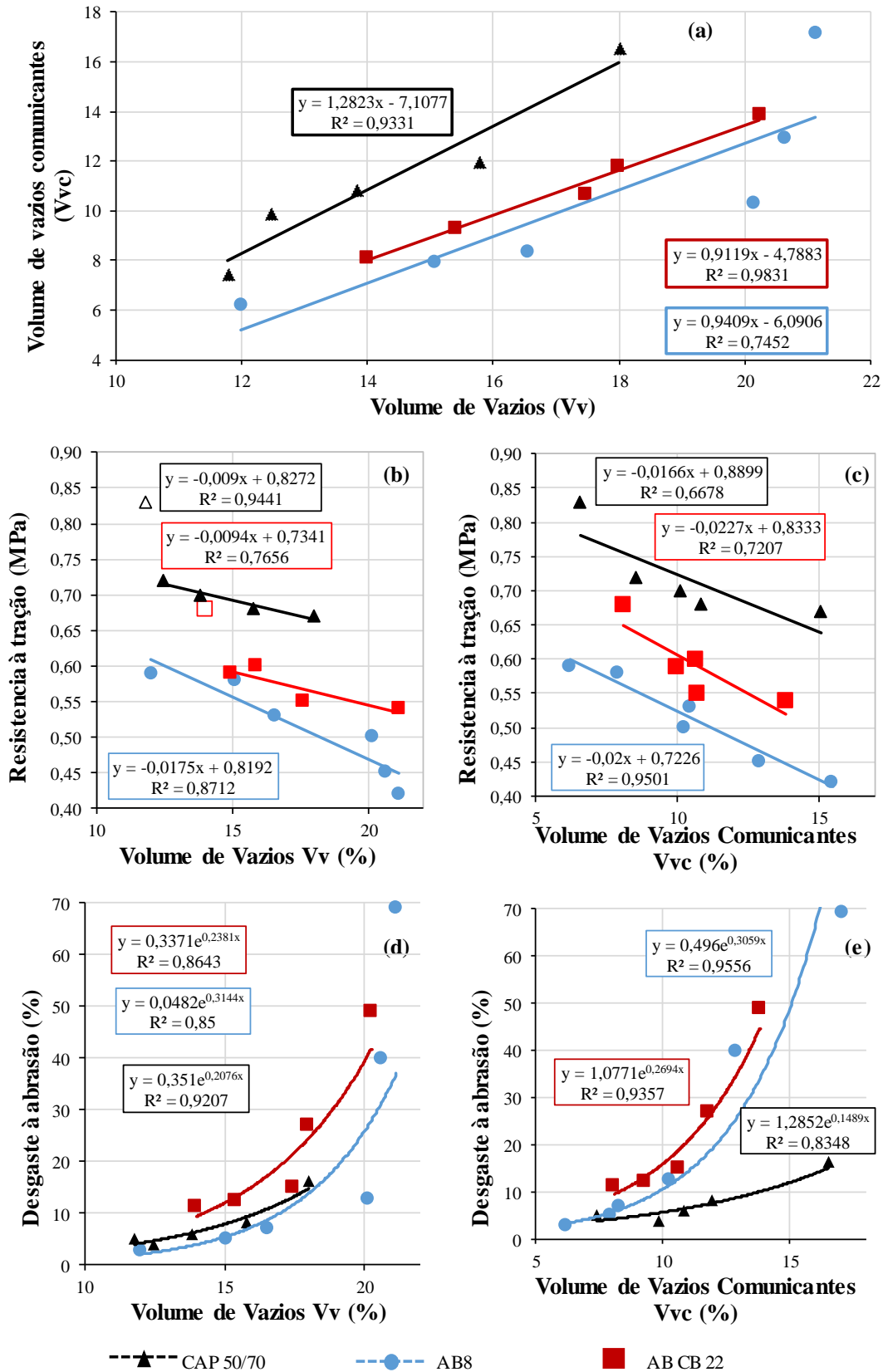


Figura 5.8 Parâmetros de dosagem: (a) Volume de vazios comunicantes (Vvc); (b-c) Resistência à tração; (d-e) Desgaste à abrasão *versus* volume de vazios.

O desgaste à abrasão apresentou diminuição com o aumento do teor de asfalto. Considerando-se tão somente o teor de asfalto a mistura que apresentou maior desgaste à abrasão foi a confeccionada com ligante asfáltico AB CB 22, seguida da mistura com AB-8 e finalmente a mistura de referência com CAP 50/70. No entanto, se avaliado o comportamento em função de Vv (Figura 5.8 d) verifica-se que para um mesmo volume de vazios a abrasão é menor para a mistura com AB 8 e maior para a mistura com AB CB 22 assumindo o CAP 50/70 valor intermediário. Já em relação ao VVc (Figura 5.8 e) as misturas com elastômero se aproximam e tendem a apresentarem maior abrasão que as misturas com CAP 50/70. A Figura 5.8 (e) mostra-se particularmente importante por apontar para um valor de VVc crítico, VVc entre 10 e 11%, a partir do qual a abrasão aumenta de modo significativo para as três misturas estudadas.

A Figura 5.8 (f) mostra que a abrasão nas misturas estudadas é função da resistência à tração. Ela mostra ainda que nessa relação as misturas com CAP 50/70 e AB CB 22 seguem a mesma tendência realçando assim o papel do fíler cal na mistura destacando-se que para uma mesma resistência à tração a abrasão será menor para a mistura contendo apenas elastômero.

A Figura 5.9 e Tabela 5.3 apresentam os parâmetros volumétricos no teor ótimo de ligante asfáltico para as misturas drenantes CPA elaboradas com asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha.

Tabela 5.3 Parâmetros dosagem de misturas CPA com asfaltos modificados com elastômeros.

Parâmetro	Especificação (DNIT 1999)	CAP 50/70	AB 8	AB CB 22
Teor de Asfalto (%)	----	3,5	5,0	5,0
Volume de vazios Vv (%)	18 a 25	15,8	15,1	17,5
Resistência à tração por compressão diametral a 25 °C (MPa)	min.0,55	0,68	0,58	0,60
Desgaste Cântabro (%)	máx.25	8,8	6,3	12,3

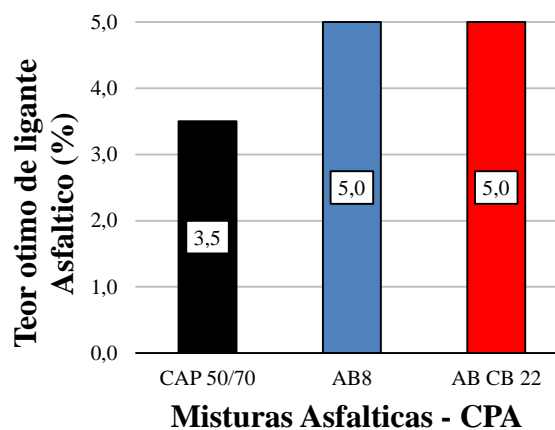


Figura 5.9 Teor ótimo de asfalto para misturas CPA com asfaltos modificados com elastômeros.

A partir dos critérios preconizados na especificação de serviço DNIT 383 (DNIT, 1999) para misturas CPA e descritos na Tabela 4.9, pode-se observar que as misturas estudadas atingem os valores mínimos de resistência à tração e de percentual máximo do desgaste à abrasão Cântabro. Entretanto, para as três misturas estudadas, pode-se observar que o volume de vazios se encontra inferior ao valor mínimo (18%) preconizado na especificação de serviço, fato atribuído à escolha da viscosidade do ligante asfáltico durante o processo de fabricação dos corpos de prova.

A Figura 5.10 apresenta os parâmetros volumétricos de dosagem, da resposta à solicitação de carga monotônica e desgaste à abrasão *versus* o teor de ligante asfáltico para as misturas CPA realizadas com asfaltos modificados com fileres, assim como também para a amostra de referência.

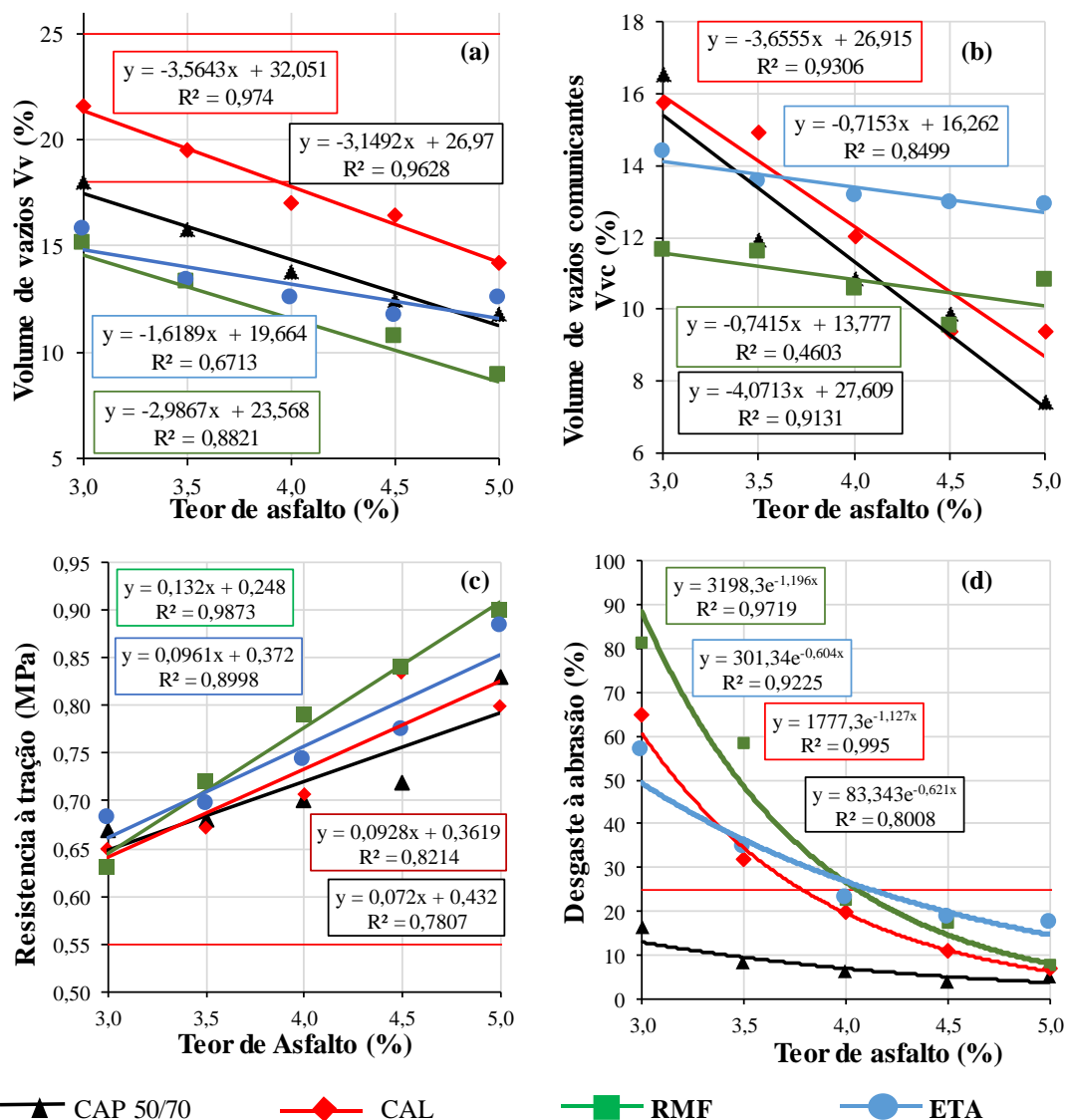


Figura 5.10 Parâmetros de dosagem: (a) Volume de vazios (Vv); (b) Volume de vazios comunicantes (Vvc); (c) Resistência à tração; (d) Desgaste à abrasão *versus* teor de asfalto.

A partir da Figura 5.10 observa-se diminuição dos valores do volume de vazios para as misturas com fíleres alternativos (RMF e lodo de ETA) em relação à mistura com CAP 50/70, fato que pode ser atribuído ao aumento da viscosidade e conseqüentemente a lâmina de ligante asfáltico sobre os agregados. Entretanto, as misturas de estudo não atingiram a faixa de volume de vazios (18% a 25%) preconizada pelo DNIT 383 (DNIT, 1999) para dosagem de misturas CPA, fato atribuído às faixas de temperatura de usinagem e compactação.

Os ensaios de desgaste à abrasão variam em função da quantidade de ligante asfáltico, neste sentido, as misturas asfálticas com presença dos materiais fíleres poderiam eventualmente apresentarem maior abrasão devido ao menor teor efetivo de CAP 50/70 puro, no entanto, a Figura 5.11 (a) mostra, considerando-se apenas o teor efetivo de CAP, que esse não é o fator preponderante devendo-se analisar fatores como o volume de vazios, o volume de vazios comunicantes e a própria resistência à tração também função desses fatores.

A Figura 5.11 (b) mostra que a abrasão depende do  $V_v$  e apenas as misturas com ligante asfáltico modificado com fíler cal tendem a apresentar comportamento similar ao CAP 50/70 puro. Eles indicam que as misturas contendo os ligantes asfálticos modificados com fíleres de lodo de ETA e RMF apresentam nessa sequência maiores abrasões que o CAP 50/70 puro considerando-se o mesmo volume de vazios. Para esses dois fíleres só se trabalharia dentro do limite de abrasão admitido trabalhando-se com teores de ligantes superiores a 4% de modo a reduzir o  $V_v$ .

A Figura 5.11 (d) mostra que o  $V_{Vc}$  é outro fator limitante para que se limite a abrasão aos valores admitidos e que esse limite, ao contrário das misturas com elastômero que apresentaram conjuntamente com o CAP 50/70 puro um mesmo limite, vai variar com o tipo de ligante asfáltico modificado com fíler. A abrasão está ligada a resistência à tração das misturas asfálticas e a Figura 5.11 (c) mostra que para as misturas com ligantes asfálticos modificados com fíleres RMF e lodo de ETA a abrasão apresenta-se mais sensível às variações desse parâmetro.

Para atingir o máximo percentual de desgaste à abrasão admitido (25%), precisa-se de no mínimo 4% de teor ótimo de asfalto nas misturas CPA com ligantes modificados com fíleres conforme indica a Figura 5.10 (d).

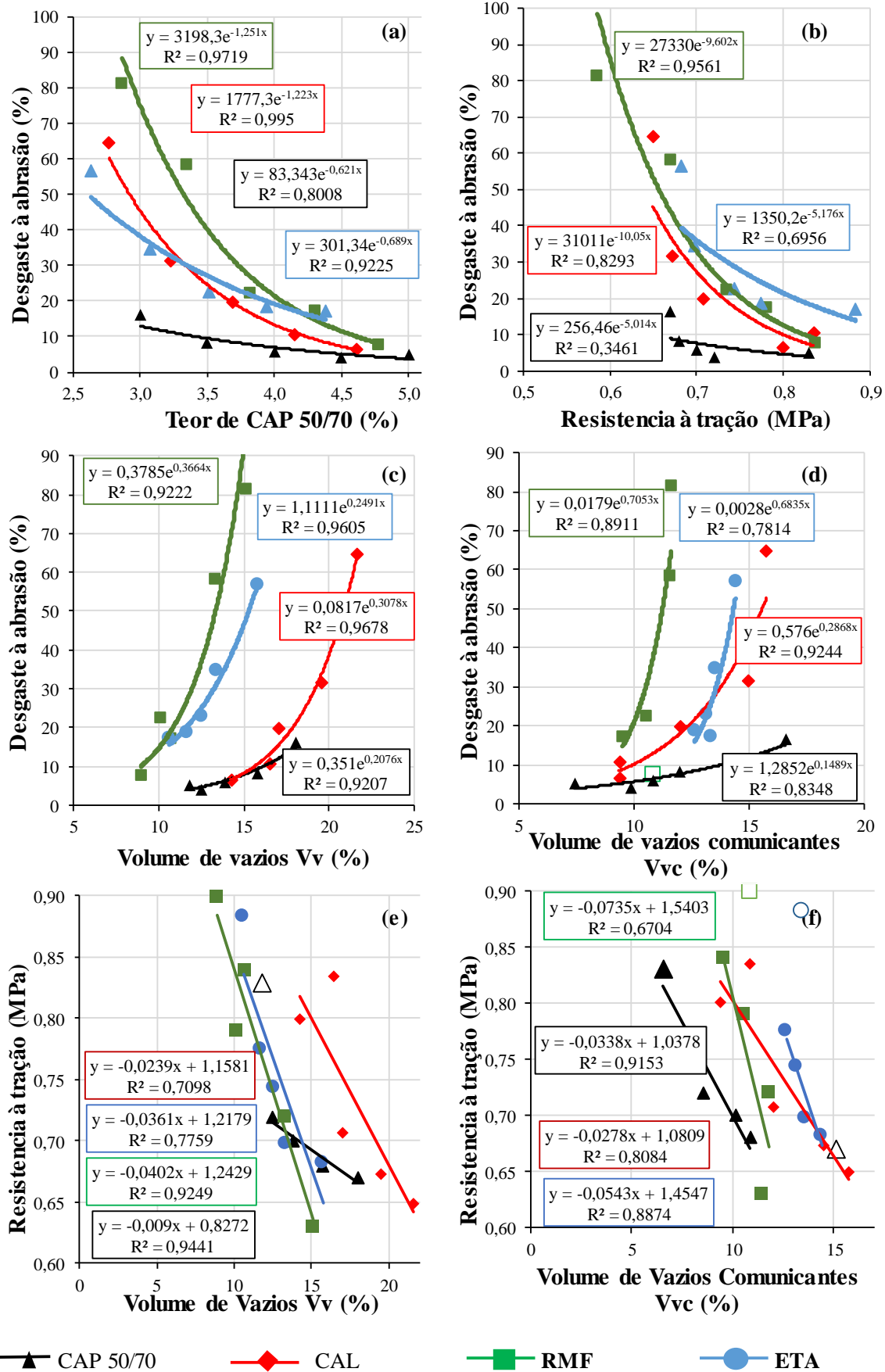


Figura 5.11 Desgaste à abrasão versus (a) Teor de CAP 50/70; (b) Resistência à tração; (c) Vv; (d) Vvc - Resistência à tração versus (e) Vv; (f) Vvc.

Os ensaios da resistência à tração por sua vez apresentaram aumentos de resistência em função do aumento do teor de ligante e diminuição do volume de vazios para as misturas estudadas. De forma geral, a incorporação dos fíleres no ligante asfáltico produz aumento da resistência à tração em relação à amostra com CAP 50/70 puro, sendo que os maiores aumentos foram obtidos para os ligantes modificados com os fíleres alternativos, principalmente com o RMF. Os resultados obtidos apresentaram-se superiores ao valor mínimo estabelecido pelo DNIT 383 (DNIT, 1999), 0,55 MPa (Figura 5.10 c), porém, faz-se oportuno analisar as relações existentes entre a resistência à tração e o Vv (Figura 5.11 e) e entre a resistência à tração e VVc (Figura 5.11 f).

A Figura 5.11 (e) mostra que a mistura com ligante asfáltico modificado com fíler cal permite a obtenção de maiores valores de resistência à tração para valores semelhantes de Vv em relação às demais misturas. As misturas com ligantes modificados com materiais alternativos (lodo de ETA e RMF) apresentaram resultados similares. Já as misturas de referência com CAP 50/70 tendem a requerer volumes de vazios menores para que se atinja resultados de resistência à tração similares às das demais misturas. A Figura 5.11 (f) mostra que em termos do VVc as misturas com os fíleres RMF e cal tendem a apresentarem resultados de resistência a tração similares e menores que os fornecidos pelas misturas com lodo de ETA e maiores que os obtidos para o CAP 50/70 puro, ou seja, as misturas com lodo de ETA são as que permitem para uma mesma resistência à tração trabalhar com maiores VVc o que é para as misturas CPA um ponto positivo. A Figura 5.12 mostra ainda que para um mesmo VV a mistura com lodo de ETA é a que tende a oferecer maior VVc no intervalo de VV analisado confirmando essa sua característica positiva de propiciar maior VVc para uso em misturas CPA.

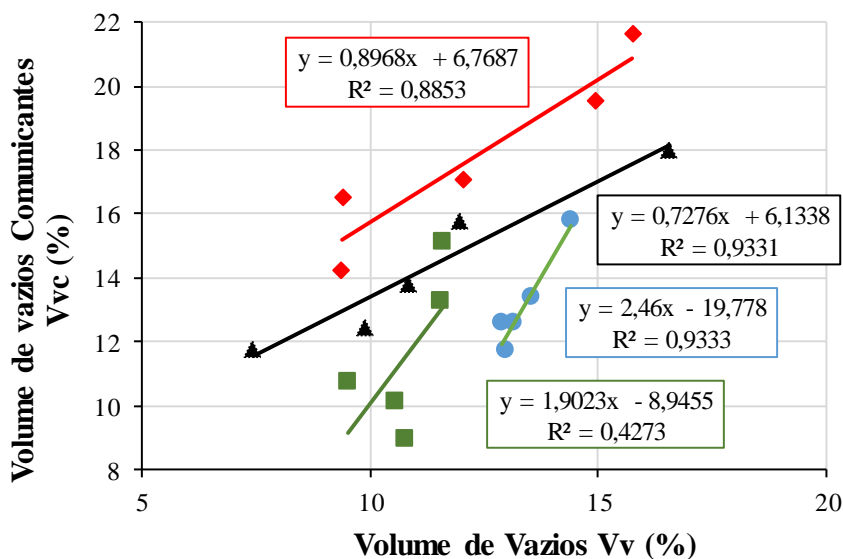


Figura 5.12 Volume de vazios comunicantes (Vvc) versus Volume de vazios (Vv) de misturas CPA com ligantes asfálticos modificados com fíleres.

A Tabela 5.4 e Figura 5.13 apresenta os resultados dos parâmetros de dosagem e o teor ótimo de ligante asfáltico para cada mistura com os fíleres estudados.

Tabela 5.4 Parâmetros dosagem de misturas CPA com asfaltos modificados com fíleres.

Parâmetro	Especificação (DNIT 1999)	CAP 50/70	CAL 20	RMF 20	ETA 20
Teor de Asfalto (%)	----	3,5	4,0	4,0	4,0
V <sub>v</sub> (%)	18 a 25	15,8	17,1	10,1	12,5
Resistência à tração por compressão diametral a 25 °C (MPa)	min 0,55	0,68	0,71	0,73	0,74
Desgaste Cântabro (%)	máx.25	8,8	19,8	17,8	21,7

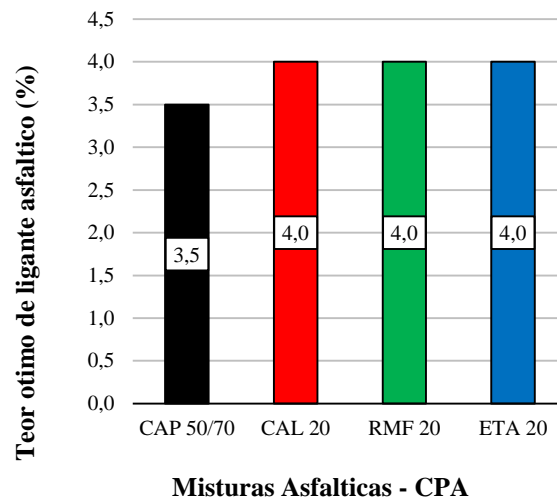


Figura 5.13 Teor ótimo de asfalto em misturas CPA com asfaltos modificados com fíleres.

## 5.2 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

Neste item foram determinadas as características mecânicas (resistência à tração, estabilidade Marshall, módulo de resiliência, creep estático e vida de fadiga) das misturas asfálticas CBUQ e CPA no teor ótimo de ligante asfáltico. Utilizaram-se os dois grupos de ligantes asfálticos de estudo: os modificados com elastômeros (AB8 LAB e AB CB 22) e os modificados com fíleres (cal, RMF e lodo de ETA). Os resultados apresentados correspondem ao resultado de três réplicas após tratamento estatístico. Os valores apresentados correspondem à média de três corpos de prova avaliados, considerando estatisticamente um coeficiente de variação inferior ao 5%.



## 5.2.1 Resistência à tração por compressão diametral

### 5.2.1.1 Misturas asfálticas com ligantes modificados com elastômeros

A Figura 5.14 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração para as misturas CBUQ e CPA com CAP 50/70 e com asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha. Os resultados apresentados correspondem à média e desvio padrão de três corpos de prova. Conforme esperado, misturas asfálticas CBUQ com menores volumes de vazios e maiores teores de ligante, apresentaram maiores valores de resistências à tração em relação às misturas asfálticas CPA com maior volume de vazios e menores teores de ligante, mesmo considerando-se os desvios padrões.

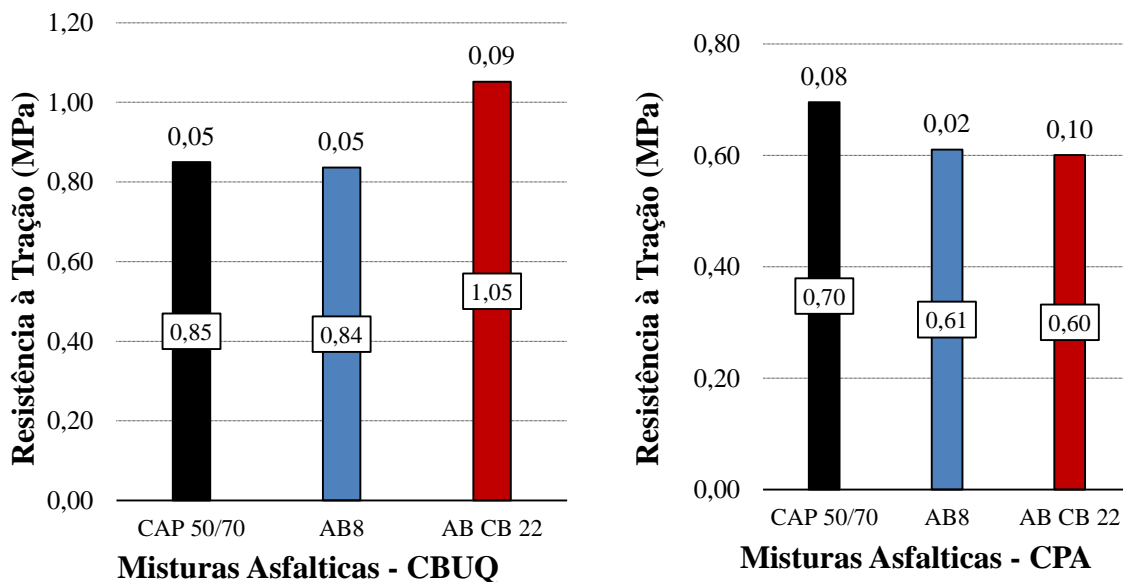


Figura 5.14 Resistência à tração de misturas asfálticas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha.

Os resultados apresentados na Figura 5.14 mostram tendências distintas dos valores da resistência à tração das misturas (CBUQ e CPA) com asfaltos modificados com elastômeros em relação à mistura com CAP 50/70, fato que pode ser atribuído à energia de compactação (CPA - 50 golpes, CBUQ - 75 golpes). Neste sentido, a mistura CBUQ confeccionada com AB8 apresentou semelhança na resistência em relação ao CAP 50/70, e diminuição da resistência à tração na forma CPA. Na literatura técnica, encontra-se que misturas asfálticas com asfalto borracha apresentam resultados de resistência à tração inferiores ou iguais às misturas com CAP 50/70 puro, fato atribuído à presença de borracha na lamina de asfalto que diminui a capacidade da coesão e adesividade (Sinisterra, 2014). No caso da mistura asfáltica com AB CB 22 verifica-se o aumento

da resistência à tração na forma de CBUQ e diminuição na forma de CPA, fato que pode ser atribuído à presença da cal no composto de borracha, mesmo com aumento do volume de vazios. Neste sentido, os grãos de cal agem, aumentando a aderência entre os grãos para o maior nível de compactação. De forma geral as misturas asfálticas atingem os valores mínimos de 0,65 MPa e 0,55 MPa estipulados pelas especificações DNIT 031 (DNIT, 2009) e DNIT 383 (DNIT, 1999) para o CBUQ e CPA respectivamente.

### 5.2.1.2 Misturas asfálticas com ligantes modificados com fíleres

A Figura 5.15 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração para as misturas CBUQ e CPA com CAP 50/70 e com asfaltos modificados com 20% em peso dos fíleres cal, RMF e lodo de ETA.

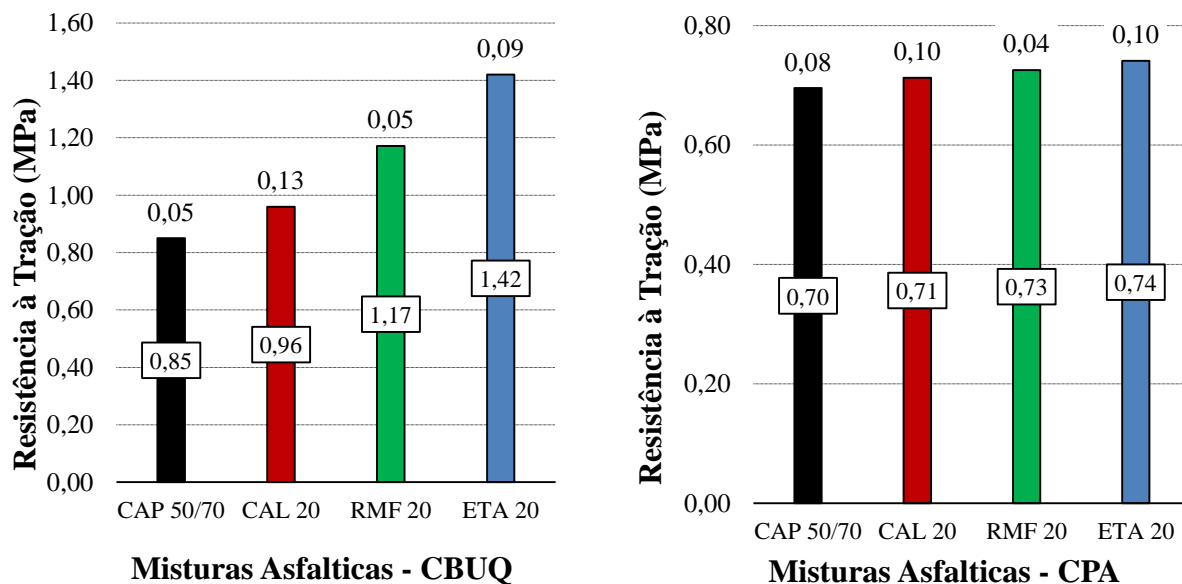


Figura 5.15 Resistência à tração e trabalho para misturas asfálticas CBUQ com asfaltos modificados com fíleres.

A Figura 5.15 mostra que as misturas asfálticas CBUQ apresentam maiores valores de resistência à tração em relação às misturas asfálticas CPA, devido provavelmente ao seu menor volume de vazios. Observa-se um mesmo padrão de comportamento nas misturas asfálticas tipo CBUQ e CPA elaboradas com ligantes asfálticos modificados com fíleres, em relação à mistura com CAP 50/70, sendo possível observar que os maiores ganhos de resistência se deram para o quando da incorporação do fíler lodo de ETA e os menores para o fíler cal assumindo o fíler RMF ganho intermediário entre os outros dois fíleres incorporados. Embora os resultados da resistência à tração mostrem que houve influência da incorporação dos fíleres como modificadores do ligante

asfáltico em ambas as misturas, percebe-se que para as misturas CPA as diferenças encontram na faixa dos desvios padrão. Destaca-se, que as misturas asfálticas analisadas atingem os valores mínimos de 0,65 MPa (CBUQ) e 0,55 MPa (CPA) preconizados nas especificações DNIT 031 (DNIT, 2006) e DNIT 383 (DNIT, 1999) respectivamente.

### 5.2.1.3 Análises das causas de alteração da resistência à tração

Para as misturas asfálticas estudadas com ligantes asfálticos modificados com elastômeros, como foi utilizado o mesmo CAP e mesmo agregado em todas elas, os principais fatores intervenientes na resistência a tração considerando-se as mesmas condições de ensaio, seriam o volume de vazios e o teor de ligante. A Figura 5.16 confirma para as misturas com uso de elastômeros esse entendimento, embora o conjunto de resultados não sigam as mesmas tendências apontando assim para a influência não só dos elastômeros como do tipo de elastômero no comportamento. No entanto, considerando-se que a resistência à tração, conforme indicado na Figura 5.16 é diretamente proporcional ao teor de ligante (b) e inversamente proporcional ao índice de vazios (a), plotando-se a resistência à tração em função do teor de ligante dividido pelo volume de vazios (a) e em função do teor de CAP 50/70 dividido pelo volume de vazios (b) (Figura 5.17), verifica-se que as misturas com elastômero seguem uma mesma tendência não havendo, no entanto, diferença significativa nas correlações ao se trabalhar com o teor de ligante e com o teor de CAP 50/70. Também ao se comparar as misturas AB8 com as misturas AB CB 22 não se verifica influência marcante da cal presente na mistura AB CB 22.

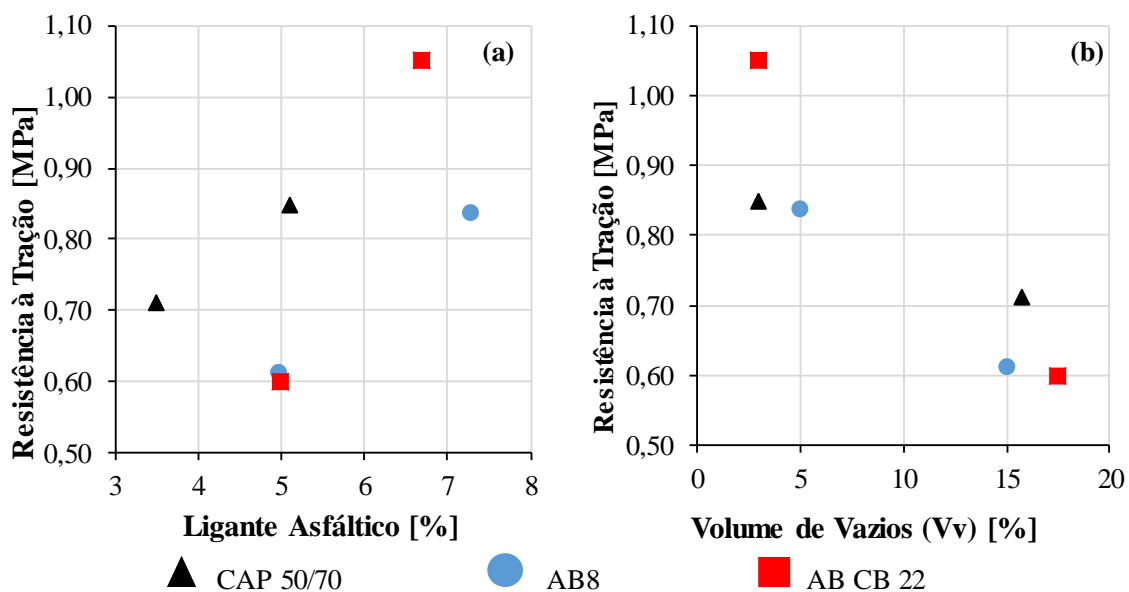


Figura 5.16 Resistencia à tração *versus* (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios.

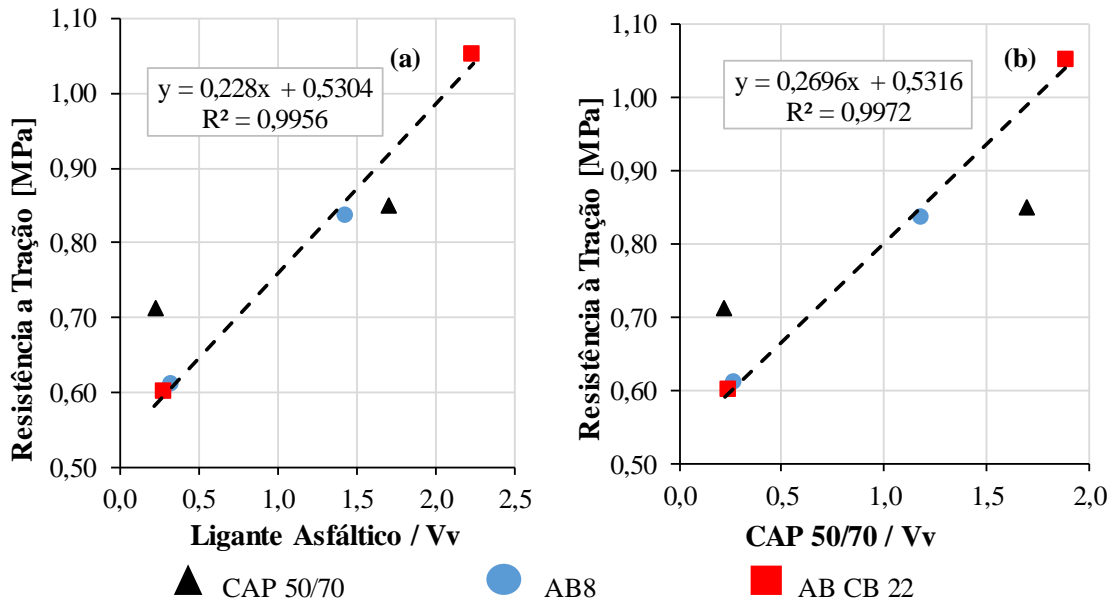


Figura 5.17 Resistência à tração *versus* (a) ligante asfáltico/Vv; (b) CAP 50-70/Vv.

De modo semelhante às misturas asfálticas estudadas com ligantes asfáltico modificados com elastômeros, nas misturas com ligantes modificados com fíleres, como foi utilizado o mesmo CAP 50/70 e mesmo agregado em todas elas, os principais fatores intervenientes na resistência a tração considerando-se as mesmas condições de ensaio, seriam o volume de vazios, o teor de ligante e eventualmente o tipo de fíler. A Figura 5.18 confirma para as misturas com uso de fíler esse entendimento. Nessa figura percebe-se, no entanto, tendência de comportamento com melhor ajuste nas misturas contendo fíler ao se considerar o teor de ligante (b), deslocando-se a mistura com CAP 50/70 puro dessa tendência. Considerando-se de modo similar ao tratamento dado às misturas com elastômero que a resistência à tração, conforme indicado na Figura 5.18 é diretamente proporcional ao teor de ligante (a) e inversamente proporcional ao índice de vazios (b), plotando-se a resistência à tração em função do teor de ligante dividido pelo volume de vazios (a) e em função do teor de CAP 50/70 dividido pelo volume de vazios (b) (Figura 5.19), verifica-se que as misturas com fíler tendem a seguir uma mesma tendência não havendo, no entanto, diferença significativa nas correlações ao se trabalhar com o teor de ligante e com o teor de CAP 50/70.

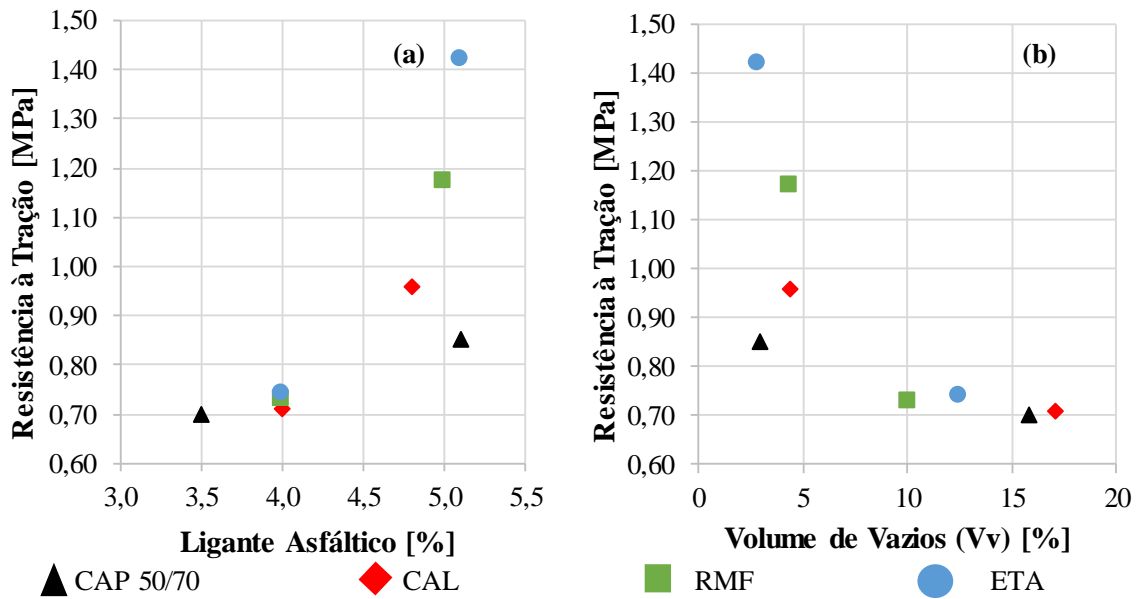


Figura 5.18 Resistencia à tração *versus* (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios.

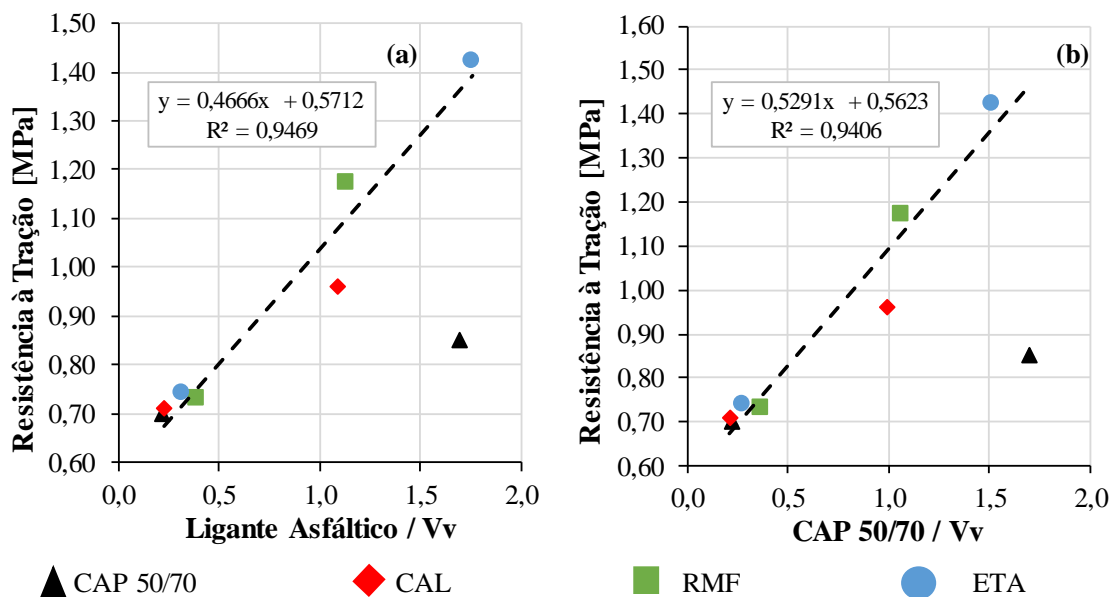


Figura 5.19 Resistencia à tração *versus* (a) ligante asfáltico/Vv; (b) CAP 50-70/Vv.

Tendo em vista que os fileres utilizados apresentam grandes diferenças de densidade, ao se trabalhar com os mesmos teores em peso na verdade se está a trabalhar com diferentes teores em termos volumétricos, decidiu-se por analisar considerando-se o teor volumétrico a influência do filer na resistência à tração (Figura 5.20). Não foram incluídos na correlação os pontos CAP 50/70 puro e RMF que se deslocaram da tendência. Excluídos esses pontos verifica-se que o comportamento de resistência à tração está mais relacionado ao teor volumétrico de filer do que ao próprio filer. Se analisado o conjunto de resultados considerando-se os dois pontos obtidos para

o CAP 50/70 puro, pode-se concluir que os fileres atuam substituindo o CAP e melhorando o comportamento sendo essa melhoria de comportamento mais acentuada para o filer RMF.

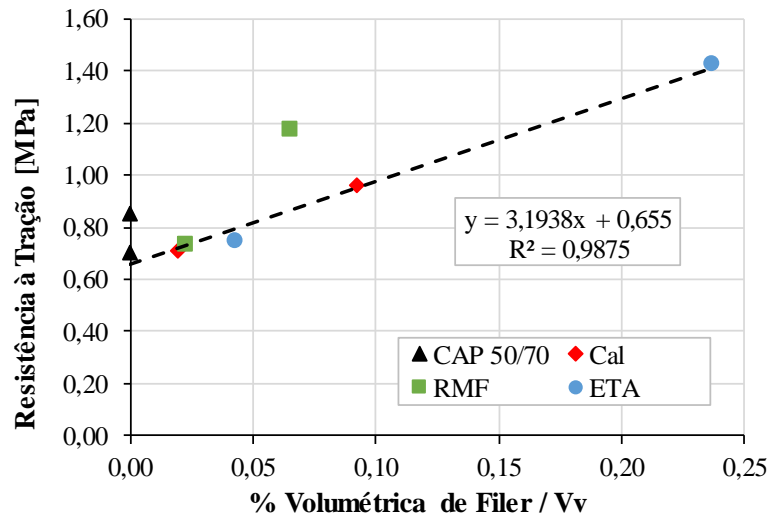


Figura 5.20 Resistência à tração *versus* (a) ligante asfáltico/Vv; (b) CAP 50-70/Vv.

## 5.2.2 Estabilidade Marshall

### 5.2.2.1 Misturas asfálticas com ligantes modificados com elastômeros

A Figura 5.21 apresenta a média e o desvio padrão dos resultados dos ensaios de Estabilidade Marshall para as misturas CBUQ e CPA com CAP 50/70 e com asfaltos modificados com elastômeros (AB8 e AB CB 22).

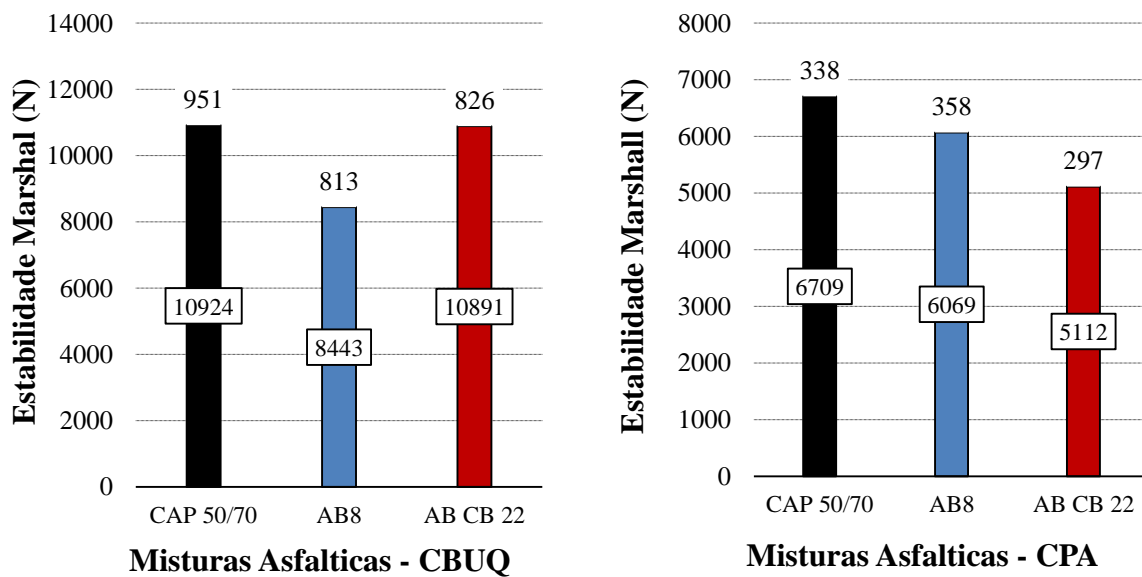


Figura 5.21 Estabilidade Marshall e desvio padrão para misturas asfálticas CBUQ com asfaltos puro e modificados com elastômeros do tipo borracha.

Observa-se na Figura 5.21 que os resultados obtidos não permitem por si sós definirem a influência do tipo de aditivo na Estabilidade Marshall mesmo porque as tendências observadas nas misturas CBUQ e CPA são distintas. Cabe ainda destacar que em alguns casos se considerados os desvios padrões o entendimento da influência do elastômero e de sua composição se modificaria. Para um melhor entendimento faz-se necessário recorrer a análise dos fatores que interferem na estabilidade Marshall como é o caso, dentre outros, do volume de vazios e do teor de CAP 50/70. Essa análise será apresentada no item 5.2.2.3. Destaca-se, no entanto, que de forma geral, os valores de Estabilidade Marshall em misturas CBUQ atingem o mínimo de 500 kgf (4903 N) especificado na norma para dosagem DNIT 031 (DNIT, 2006).

### 5.2.2.2 Misturas asfálticas com ligantes modificados com fíleres

A Figura 5.22 apresenta a média e o desvio padrão dos resultados dos ensaios de Estabilidade Marshall para as misturas CBUQ e CPA com CAP 50/70 puro e com asfaltos modificados com 20% em peso dos fíleres cal, RMF e lodo de ETA.

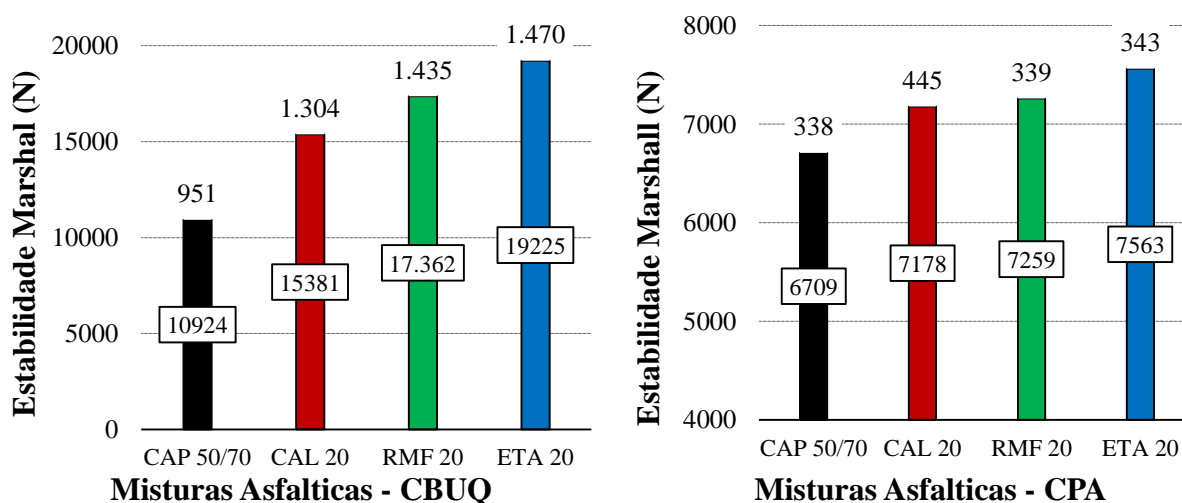


Figura 5.22 Estabilidade Marshall e desvio padrão para misturas asfálticas CBUQ com asfaltos puro e modificados com fíleres.

Os resultados apresentados para a Estabilidade Marshall das misturas CBUQ e CPA confeccionadas com ligantes asfálticos com e sem fíler estão coerentes com os resultados dos ensaios de resistência à tração apresentados na Figura 5.15, sendo os maiores valores de estabilidade Marshall obtidos para as misturas com adição de lodo de ETA, seguidos das misturas com RMF e os menores valores obtidos para o CAP 50/70 puro. Destaca-se que para as misturas

CBUQ estudadas, os resultados atingiram o mínimo de 500 kgf (4903 N) preconizado na norma DNIT 031 (DNIT, 2006).

### 5.2.2.3 Análises das causas de alteração da estabilidade Marshall

Para o entendimento das variações da Estabilidade Marshall nas misturas elaboradas com ligantes asfálticos modificados com elastômeros, foram plotadas as curvas de estabilidade Marshall *versus* o teor de ligante asfáltico (Figura 5.23 a) e *versus* o volume de vazios (Figura 5.23 b). De forma geral, pode-se observar que a Estabilidade Marshall é diretamente proporcional ao teor de ligante asfáltico e inversamente proporcional ao volume de vazios, tornando-se interessante fazer a avaliação da influência conjunta dos dois parâmetros sobre a estabilidade Marshall (Figura 5.24). Como foi apresentado para o ensaio de resistência à tração, neste caso também não pôde ser colocada em clara evidência a influência da cal na estabilidade Marshall para as misturas com ligante asfáltico AB CB 22.

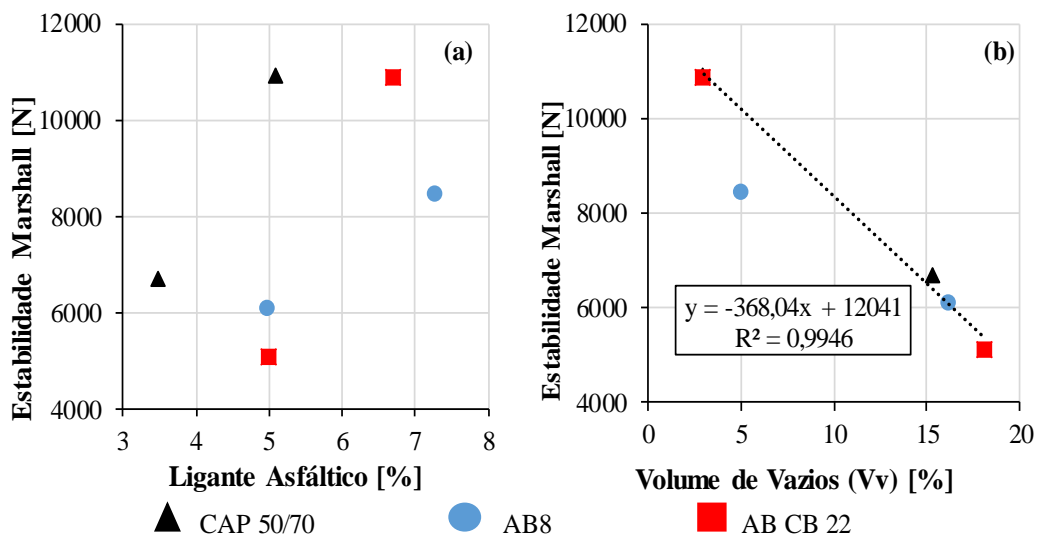


Figura 5.23 Estabilidade Marshall *versus* (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios.

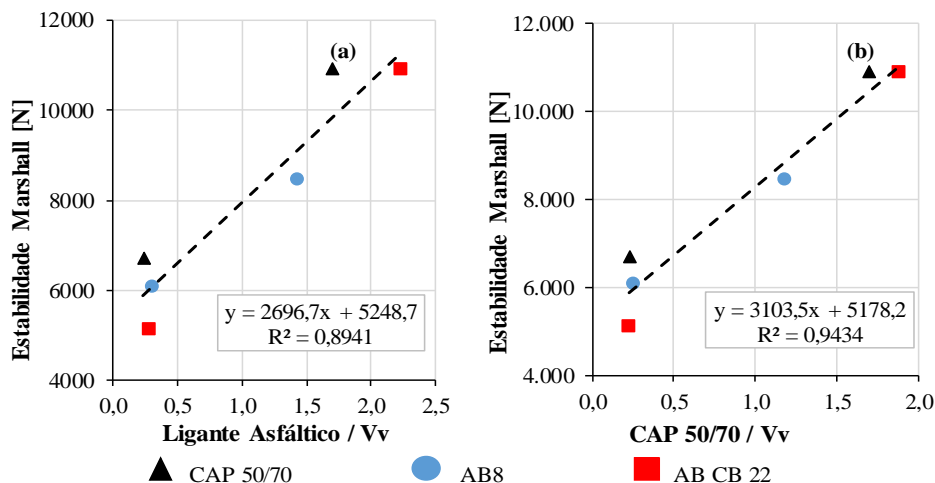


Figura 5.24 Estabilidade Marshall *versus* (a) ligante asfáltico/Vv; (b) CAP 50-70/Vv.



Verifica-se na Figura 5.23a que a adição do elastômero reduz a estabilidade Marshall ao se considerar o mesmo teor de ligante sem que seja possível, no entanto, colocar em evidência a influência da cal. Já a Figura 5.23b mostra, com exceção apenas de um dos pontos obtidos para a mistura contendo o elastômero AB8, que a estabilidade Marshall é inversamente proporcional ao índice de vazios.

Considerando-se a estabilidade Marshall em função do teor de ligante/Vv (Figura 5.24a) e do teor de CAP 50/70/Vv (Figura 5.24b) verifica-se mais uma vez a indefinição da influência da cal e que em ambos os casos, elastômero e elastômero mais cal, os resultados obtidos para essas misturas foram, em termos de tendência, inferiores aos obtidos para as misturas com CAP 50/70 puro.

Para misturas asfálticas com ligantes asfálticos modificados com fíleres, pode-se observar proporcionalidade direta entre a estabilidade Marshall e o percentual de ligante asfáltico (Figura 5.25 a) e inversa entre a estabilidade Marshall e o volume de vazios (Figura 5.25 b). Analisando o grupo de misturas asfálticas (CPA e CBUQ) elaboradas com ligantes asfálticos modificados com fíleres, pode-se estabelecer uma correlação entre a estabilidade Marshall e os teores de ligante asfáltico e entre a estabilidade Marshall e o Vv. Em ambos os casos as misturas com o CAP 50/70 puro se situaram abaixo da linha de tendência para as misturas CBUQ e ligeiramente acima para as misturas CPA indicando assim que nas misturas CPA devido ao menor número de contatos os fíleres terminam sendo prejudiciais a adesividade piorando o comportamento da mistura. Já para as misturas densas (CBUQ) os fíleres não prejudicam tal ação do CAP e terminam por melhorar o comportamento das misturas. Fazendo-se, porém, uma análise conjunta da influência teor de ligante (Figura 5.26a) e de CAP (Figura 5.26b) dividido pelo volume de vazios se verifica que nas misturas densas (CBUQ) os fíleres usados na pesquisa contínuam, sem exceção, melhorando o comportamento das misturas e nas misturas CPA praticamente eles não afetam a estabilidade Marshall.

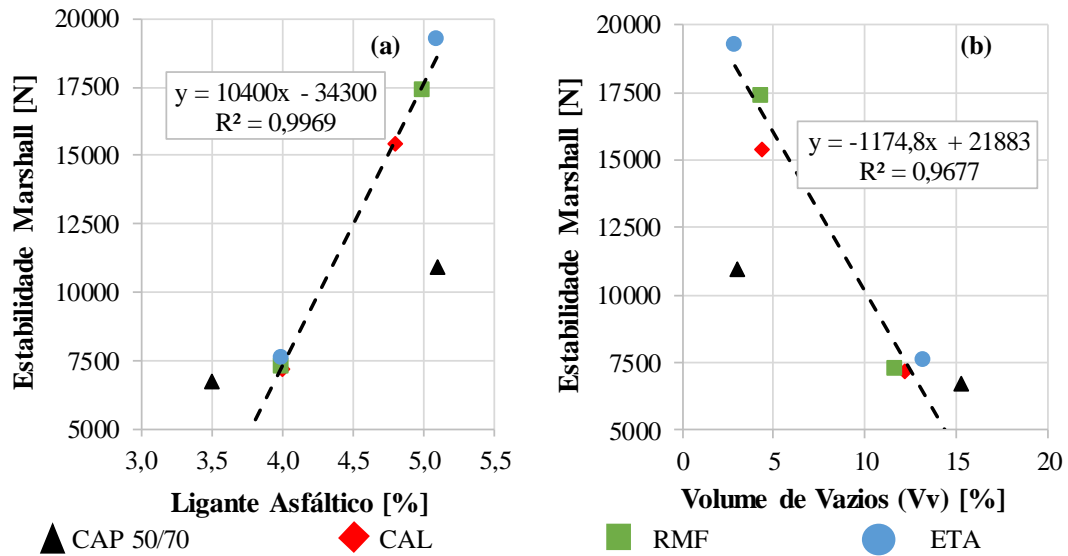


Figura 5.25 Estabilidade Marshall *versus* (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios.

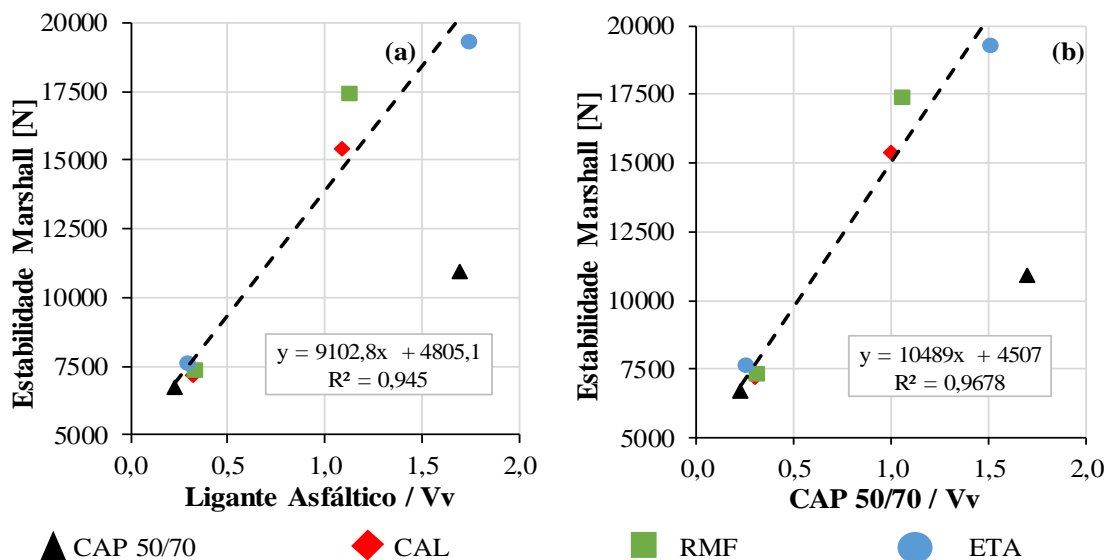


Figura 5.26 Estabilidade Marshall *versus* (a) ligante asfáltico/Vv; (b) CAP 50-70/Vv.

As misturas asfálticas com ligantes modificados com fileres apresentam diferentes teores volumétricos de percentual de fíler devido às diferenças na densidade dos grãos. A Figura 5.27 apresenta a relação entre a estabilidade Marshall das misturas CPA e CBUQ *versus* o percentual volumétrico de fíler dividido pelo volume de vazios das misturas a fim de observar a influência do tipo de fíler modificador no ligante asfáltico considerando-se a questão volumétrica. A Figura mostra que o volume de fíler é um aspecto a ser considerado nas análises das misturas, pois os fileres menos densos (lodo de ETA), ocupando para o mesmo percentual em peso maior espaço nas misturas foram os que contribuíram para um menor desempenho das misturas ao se considerar uma mesma relação porcentagem volumétrica de fíler / volume de vazios, o que reflete a redução

do teor de CAP por superfície de fíler. Portanto, ao se estudar misturas asfálticas com fíler faz-se necessário considerar a densidade dos mesmos, ou seja, a questão volumétrica, deixando de lado o uso unicamente das relações em peso ou massa.

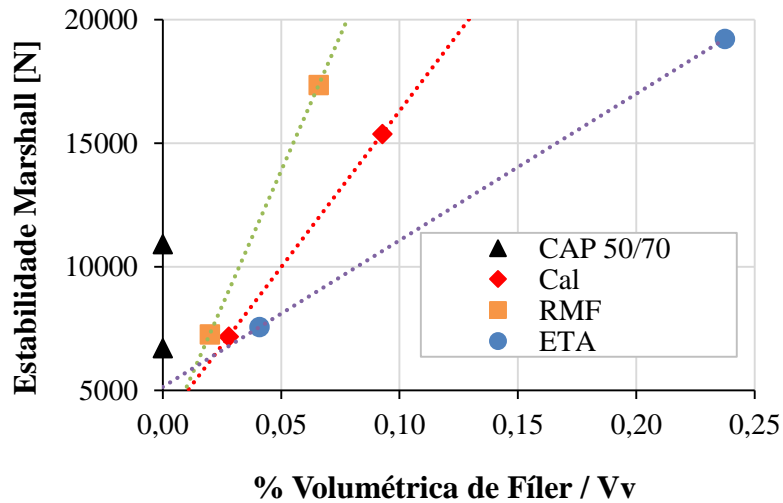


Figura 5.27 Estabilidade Marshall *versus* % volumétrica de fíler/Vv.

## 5.2.3 Módulo de resiliência

### 5.2.3.1 Misturas asfálticas com ligantes modificados com elastômeros

Diversos fatores da mistura asfáltica tais como: granulometria, ligante asfáltico, temperatura do ensaio, carregamento aplicado influenciam nos valores do módulo de resiliência. A Figura 5.28 apresenta os resultados dos ensaios de módulo de resiliência das misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com elastômeros, aplicando estágios de carga menores que 30% do valor da resistência à tração. Os valores são a média de três ensaio com o desvio padrão entre eles.

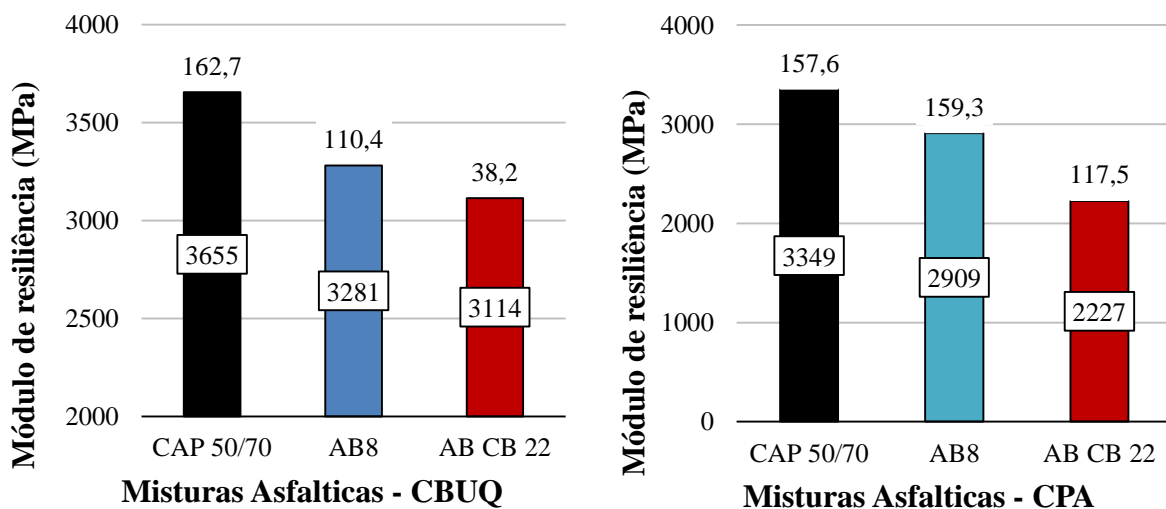


Figura 5.28 Módulo de resiliência e desvio padrão para misturas asfálticas CBUQ com asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha.

Na Figura 5.28 pode-se observar a mesma tendência de comportamento nas misturas CBUQ e CPA. Maiores módulos de resiliência foram encontrados nas misturas CBUQ devido ao menor volume de vazios e conseqüentemente maior rigidez em relação às misturas CPA. As misturas com asfaltos contendo elastômeros (AB8 e AB CB 22) apresentaram menor módulo de resiliência em relação à mistura com CAP 50/70 puro sendo que os menores valores do MR se fizeram presentes nas misturas com AB CB 22 que são aquelas contendo o fíler cal.

A Figura 5.29 apresenta os valores do módulo de resiliência em função do teor de ligante asfáltico (a) e do volume de vazios (b), assim como também em função da relação percentual de ligante entre volume de vazios (Figura 5.30 a) e da relação percentual de CAP 50/70 entre volume de vazios (Figura 5.30 b).

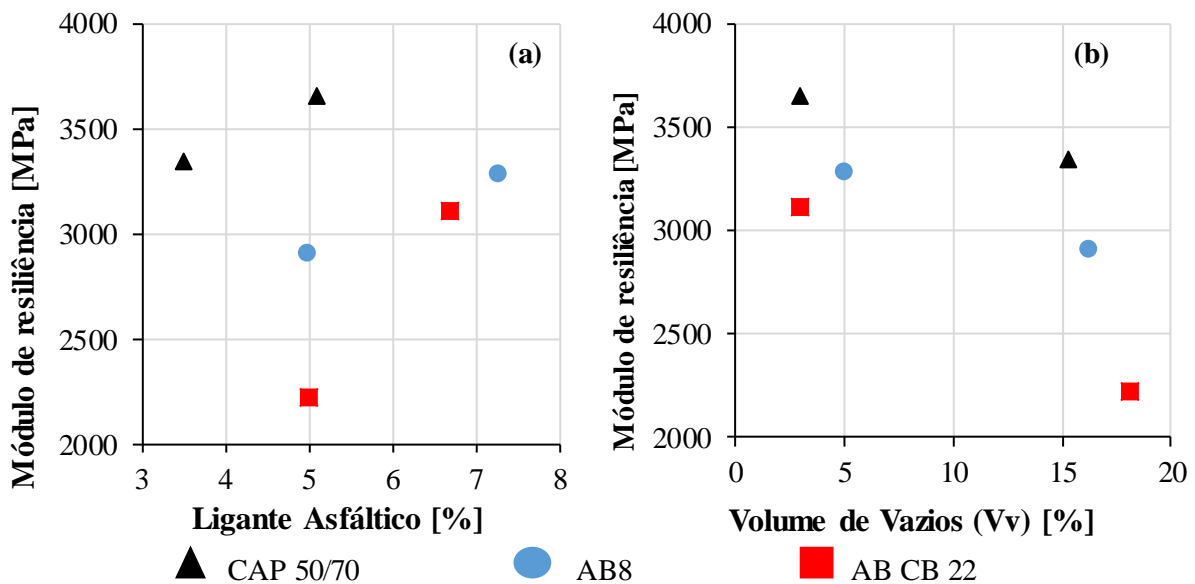


Figura 5.29 Módulo de resiliência *versus* (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios.

Avaliando o grupo de misturas asfálticas elaboradas com ligantes asfálticos com elastômeros, pode-se observar como verificado para a resistência a tração e para a estabilidade Marshall que o módulo de resiliência é diretamente proporcional ao teor de ligante asfáltico e inversamente proporcional ao volume de vazios. Considerando-se apenas os tipos de elastômero percebe-se que a introdução da cal na mistura AB CB 22 piora o comportamento em relação a mistura AB8 contendo apenas elastômero (Figura 5.30).

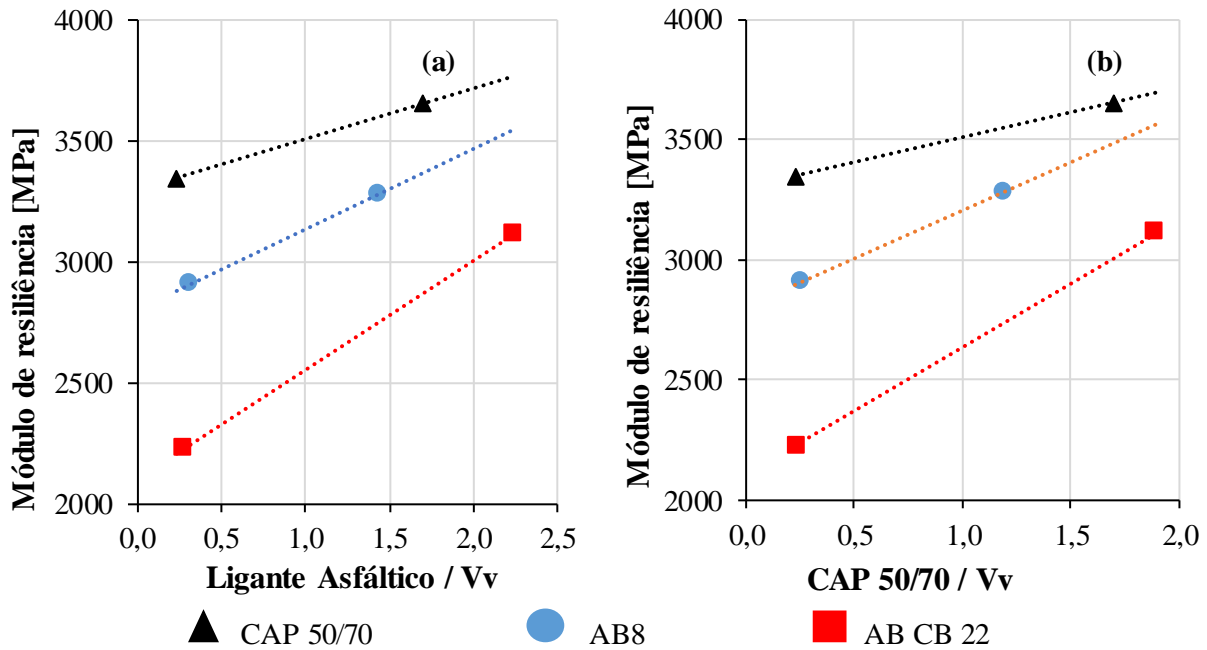


Figura 5.30 Modulo de resiliência *versus* (a) ligante asfáltico/Vv; (b) CAP 50-70/Vv.

### 5.2.3.2 Misturas asfálticas com ligantes modificados com fileres

A Figura 5.31 apresenta os resultados do ensaio de módulo de resiliência das misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com fileres, aplicando estágios de carga menores que 30% do valor da resistência à tração. Os resultados correspondem à média de três corpos de prova sendo apresentado também o desvio padrão entre eles.

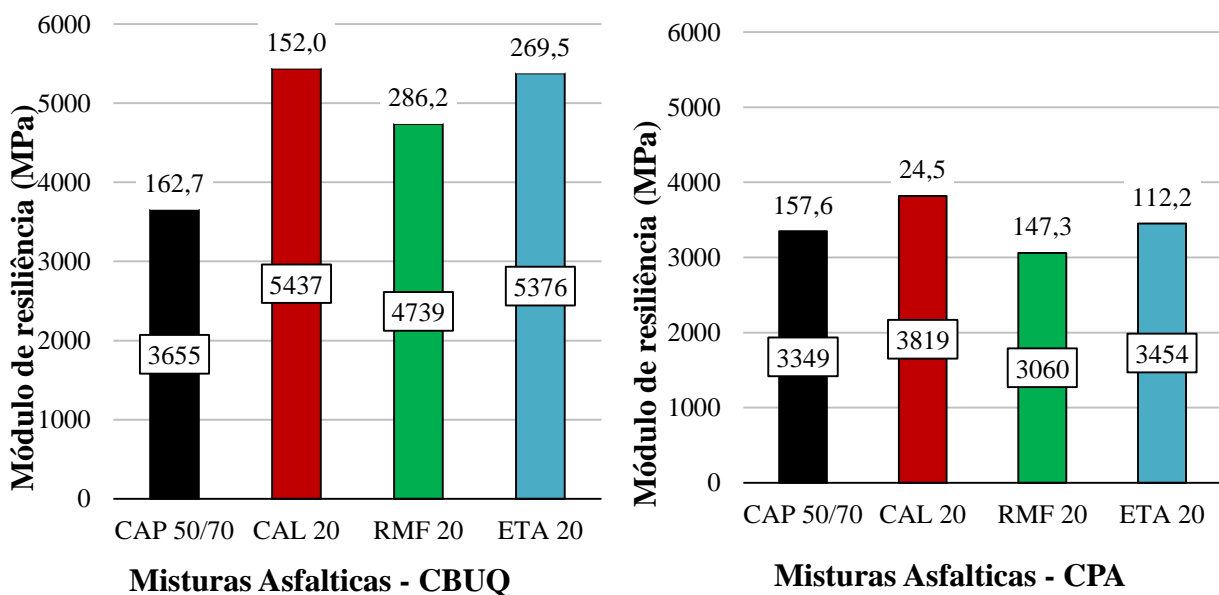


Figura 5.31 Módulo de resiliência de misturas CBUQ com asfaltos modificados com fileres.

Segundo a Figura 5.31 pode-se observar que nas misturas CBUQ as misturas contendo fíler apresentaram maior módulo de resiliência que o CAP 50/70 puro e que as melhorias com fíler seguiram a seguinte ordem crescente: cal, lodo de ETA e RMF. Já nas misturas CPA as misturas com o fíler cal e lodo de ETA apresentaram melhoria em relação ao CAP 50/70 puro sendo o pior comportamento registrado para a mistura contendo o fíler RMF. As análises em função do teor de asfalto e do volume de vazios ajudarão a entender esses resultados.

As Figuras 5.32 e 5.33 apresentam para as misturas asfálticas CBUQ e CPA os valores do módulo de resiliência respectivamente em função do teor de asfalto (Figura 5.32 a) e do volume de vazios (Figura 5.32 b) e da relação entre esses fatores e o volume de vazios (Figura 5.33).

Observa-se nas Figuras 3.32 a e b que tanto para o módulo de resiliência em função do teor de ligante como em função do volume de vazios o melhor comportamento foi para o fíler cal e o pior para o fíler RMF. Plotando-se, no entanto, os resultados em função da relação entre esses parâmetros e os volumes de vazios (Figura 5.33) é confirmada a supremacia do fíler cal ocorrendo, porém, certa sobreposição de resultados entre os fíleres RMF e lodo de ETA.

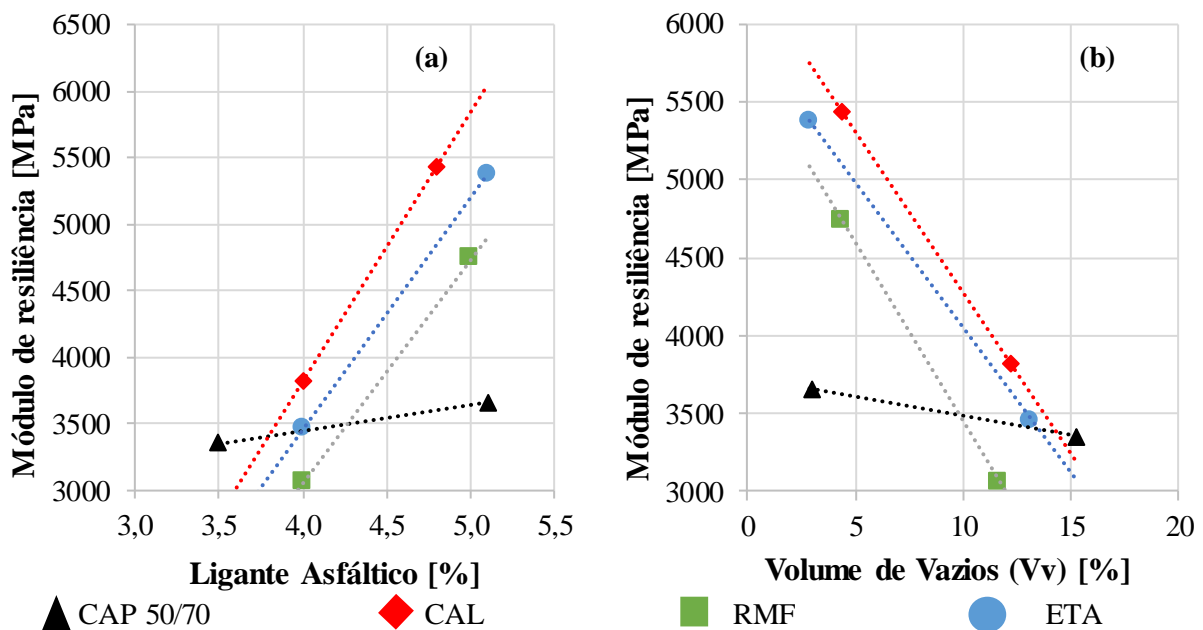


Figura 5.32 Modulo de resiliência *versus* (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios.

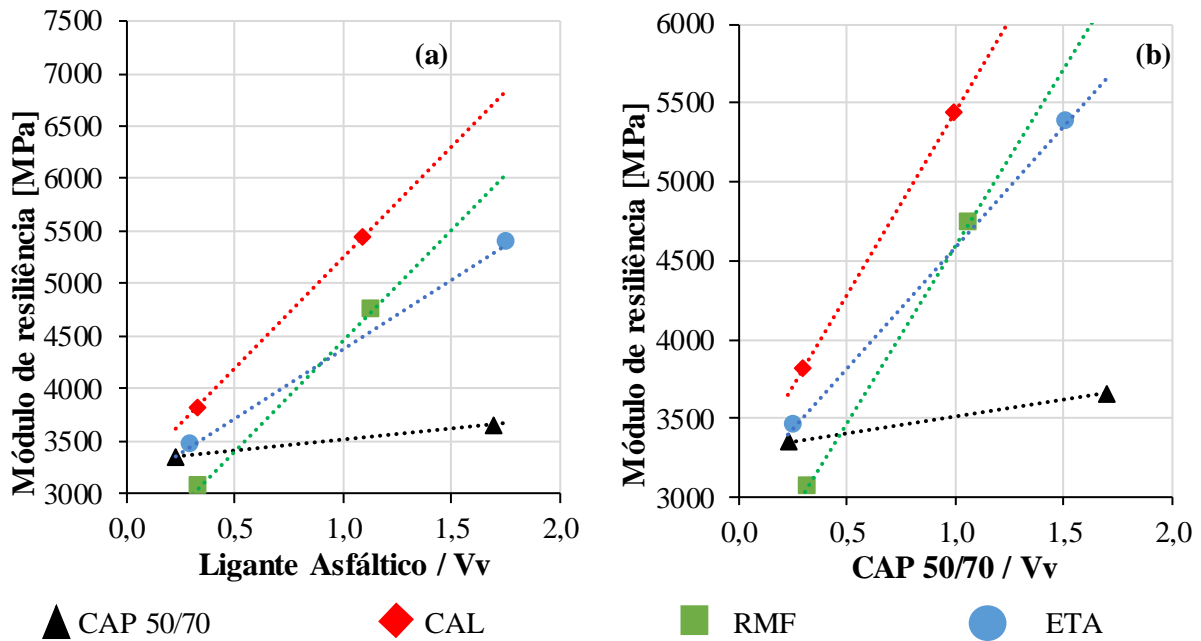


Figura 5.33 Módulo de resiliência *versus* (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios.

A fim de observar a influência do tipo de fíler no ligante asfáltico e seu desempenho nas misturas asfálticas, determinou-se a correlação entre o módulo de resiliência e a relação do percentual volumétrico com o volume de vazios (Figura 5.34). Essa figura mais uma vez aponta para a importância de se tratar a incorporação de fíler às misturas asfálticas em termos volumétricos.

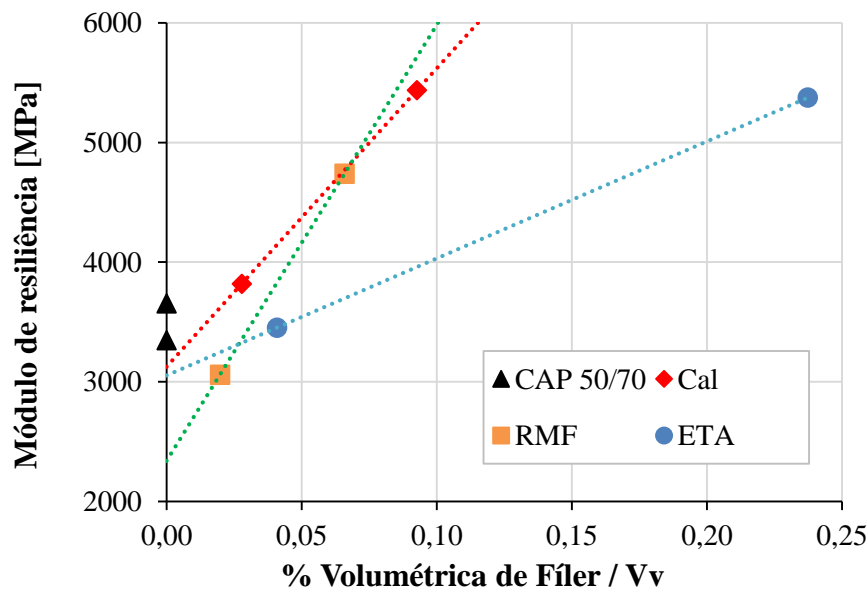


Figura 5.34 Módulo de resiliência *versus* % volumétrica de fíler/Vv.

## 5.2.4 Creep estático

Neste subitem são apresentados os resultados obtidos nos ensaios do creep estático para as misturas asfálticas CBUQ e CPA preparadas com asfaltos modificados com elastômero de tipo borracha e com fíleres. Inicialmente, apresenta-se a resposta do material em termos das deformações axiais no tempo total do ensaio e a relação compliance no tempo de carregamento. Em seguida são apresentadas as magnitudes dos deslocamentos totais (permanentes e recuperáveis).

### 5.2.4.1 Misturas asfálticas com ligantes modificados com elastômeros

A Figura 5.35 apresenta os resultados do ensaio *creep* estático no tempo, para as misturas asfálticas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha.

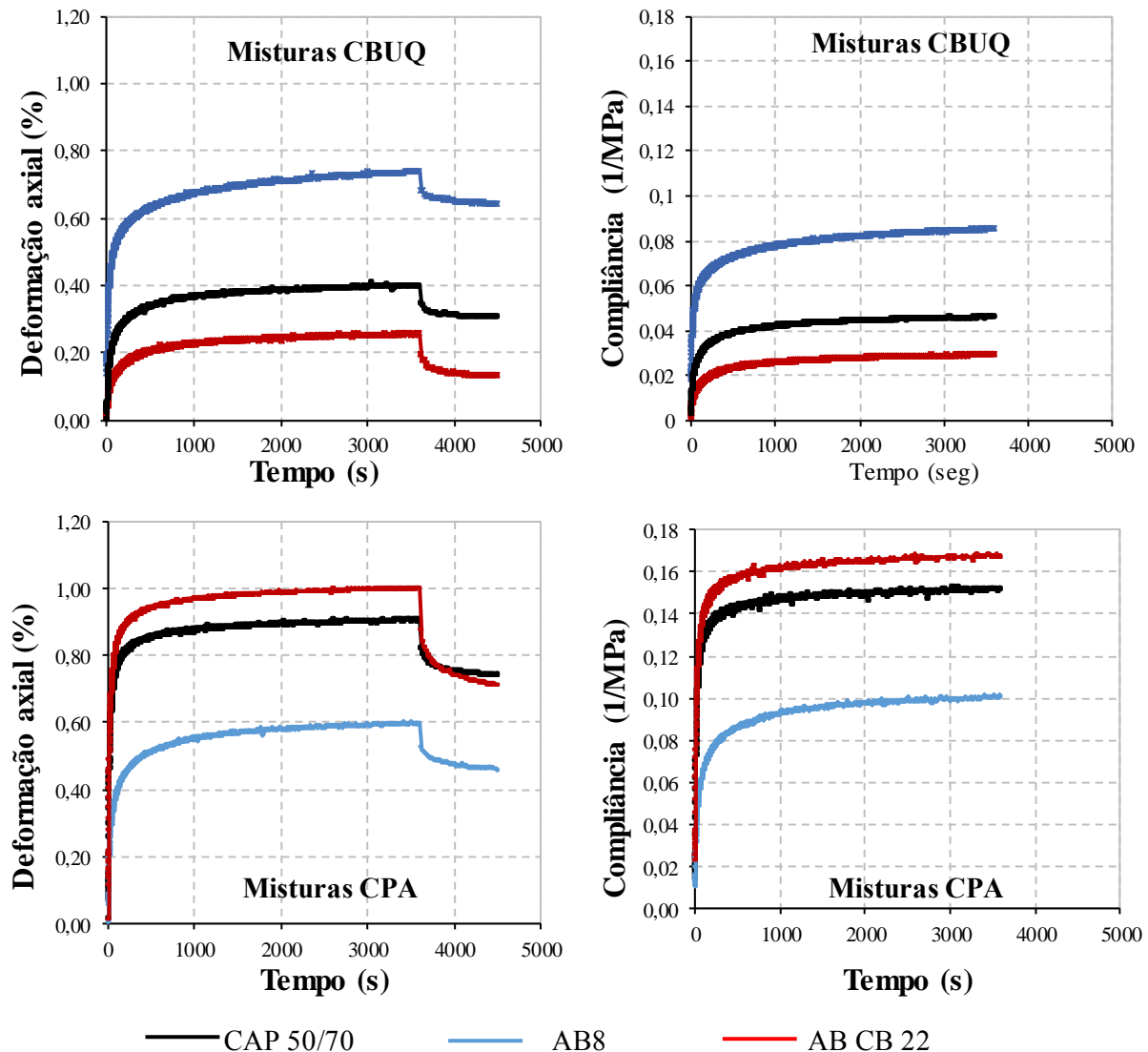


Figura 5.35 Ensaio *creep* estático de misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com elastômeros.



A partir dos ensaios de *creep* estático determina-se o comportamento dos corpos de prova a serem submetidos à ação de um carregamento constante de 100 kPa para o CBUQ e de 70 kPa para CPA ao longo do tempo. A função de fluência *compliance* pode ser obtida da relação entre as deformações uniaxiais obtidas sob a tensão constante aplicada. Maiores aumentos da curva *compliance* indicam maiores níveis de deformabilidade para uma mesma tensão. A Figura 5.35 evidencia diferentes desempenhos dos ligantes asfálticos modificados com elastômeros nas misturas CBUQ e CPA, devido à magnitude do carregamento e da energia de compactação das misturas.

No caso da mistura CBUQ, a curva de resposta de deformação axial vertical e a curva da relação *compliance* para o asfalto borracha AB8 apresentaram maiores valores que a mistura de CAP 50/70, fato atribuído à elasticidade da borracha existente no ligante asfáltico e ao teor elevado de asfalto na mistura (7.3 %). No caso da mistura com AB CB 22 ela apresentou uma curva de comportamento de deformação axial vertical e da relação *compliance* inferiores à mistura com CAP 50/70, provavelmente, embora outros fatores possam intervir, consequência da presença da cal no composto granulado de borracha que contribui para diminuição das deformações na forma de mistura densa.

Para as misturas CPA, a curva de resposta da deformação axial vertical e *compliance* para o asfalto AB8 apresentaram-se inferiores à mistura com CAP 50/70, enquanto que as curvas de comportamento da mistura com AB CB 22 apresentam-se superiores à mistura de referência com CAP 50/70. Portanto, a mistura asfáltica com AB8 apresentou maior deformabilidade na forma CBUQ e menor deformabilidade na forma de CPA em referência à mistura com CAP 50/70. Se no primeiro caso, o referente a mistura densa CBUQ, a maior quantidade de borracha, conforme já dito, contribui para a maior deformabilidade e maior *compliance* das misturas, nas misturas abertas CPA a maior presença de borracha diminui os contatos CAP 50/70-agregado tornando as misturas AB8 menos deformáveis e com menor *compliance*. Desta forma, comparando-se os dois tipos de mistura, verifica-se que as misturas asfálticas CBUQ com teores elevados de ligante asfáltico AB8 apresentaram maior deformabilidade que as misturas CPA, no entanto, quanto à *compliance* essa tendência se inverteu.

A incorporação de cal no composto de borracha no ligante asfáltico AB CB 22 indica um aumento significativo na rigidez do material e conseqüentemente menor deformabilidade na mistura CBUQ ao ser comparada às misturas de referência (CAP 50/70 e AB8). Comportamento semelhante é observado nas misturas CBUQ quanto a *compliance*. O comportamento do ligante

AB CB 22 na mistura CPA se inverte em relação aos demais ligantes, CAP 50/70 e AB8, apresentando maior deformabilidade e aumento da curva compliance o que aponta para a necessidade de análises complementares.

Os resultados do retorno elástico para as misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com elastômeros são apresentados na Figura 5.36, onde com o intuito de observar a recuperação elástica do material após o carregamento, foram determinados os percentuais de recuperação considerando a deformação máxima durante a aplicação do carregamento e a deformação residual no descarregamento.

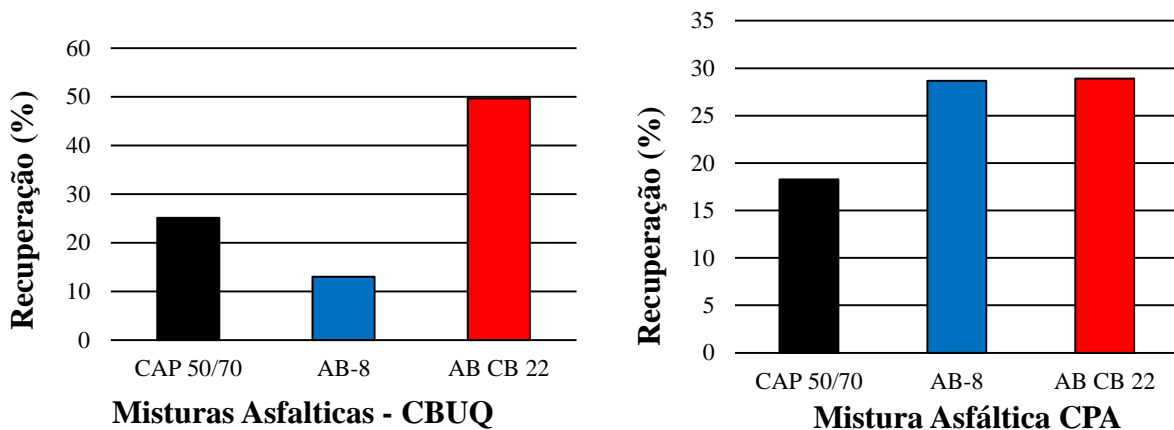


Figura 5.36 Recuperação elástica para misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha.

A partir da Figura 5.36 constata-se o aumento do retorno elástico ou elasticidade das misturas CPA e CBUQ com AB CB 22 em relação às amostras com ligante CAP 50/70 e AB8. Neste sentido, a presença de cal aparentemente contribui para o maior retorno elástico das misturas asfálticas CBUQ e CPA. Cabe destacar que os resultados apresentados pelas misturas asfálticas aqui analisadas mostram o mesmo padrão de comportamento dos ensaios de recuperação sob tensão múltipla realizados na avaliação reológica dos ligantes asfálticos modificados com elastômeros.

Faz-se necessário para um melhor entendimento desses resultados avalia-los considerando-se os dois parâmetros que mais interferem no comportamento das misturas asfálticas, o teor de ligante e o volume de vazios. Como os ligantes foram usados com três composições distintas analisou-se ainda o comportamento considerando-se apenas o teor de CAP 50/70 usado nas misturas. A Figura 5.37 a e b apresentam respectivamente os resultados obtidos para a deformação máxima em função do Vv/teor de ligante e do Vv/teor de CAP. As Figuras 5.38 a e b apresentam respectivamente os resultados obtidos para a compliance em função do Vv/teor de ligante (a) e do Vv/teor de CAP

50/70. Finalmente as Figuras 5.39 a e b apresentam os resultados obtidos para a recuperação elástica em função do teor de ligante/Vv (a) e do teor de CAP 50/70/Vv. Em todas essas figuras fica clara a grande influência do volume de vazios e do teor de ligante e teor de CAP no comportamento da misturas densas CBUQ relegando a um segundo plano a importância da borracha ou borracha mais cal. Nas misturas CPA apesar de não se detectar de modo claro a influência do elastômero e elastômero mais cal na deformação máxima e na compliance, observa-se que esses aditivos contribuem de modo significativo para a recuperação elástica das misturas, mas cabe destacar que essa maior recuperação pode estar atrelada ao maior teor de ligante ou simplesmente ao maior teor de CAP das misturas contendo elastômero, pois enquanto a mistura com CAP puro possui apenas 3,5 % de ligante as misturas com elastômero e elastômero mais cal possuem ambas 5% de ligante dos quais 4,2% é constituído do CAP 50/70.

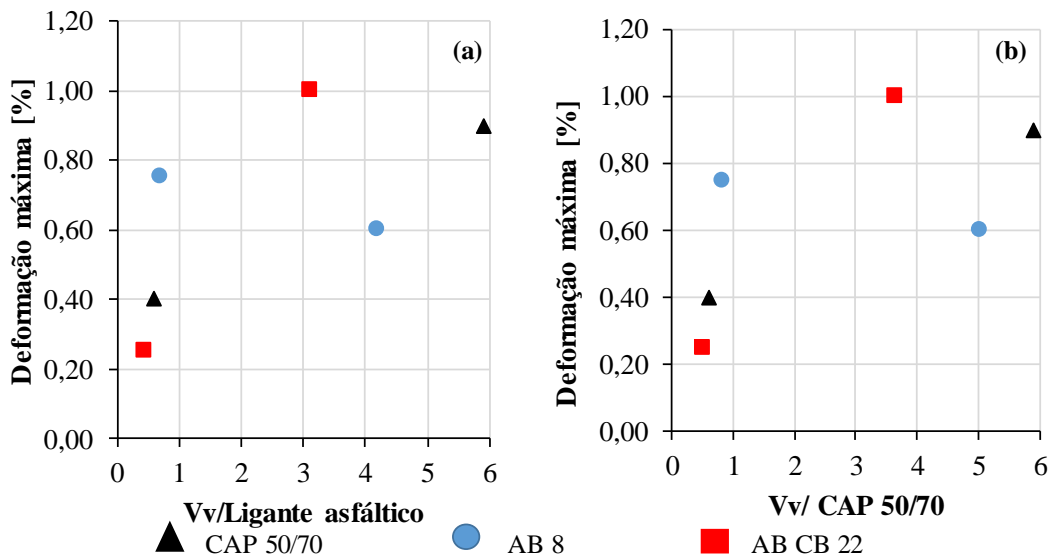


Figura 5.37 Deformação máxima *versus* (a) Vv/ligante asfáltico; (b) Vv/CAP 50/70.

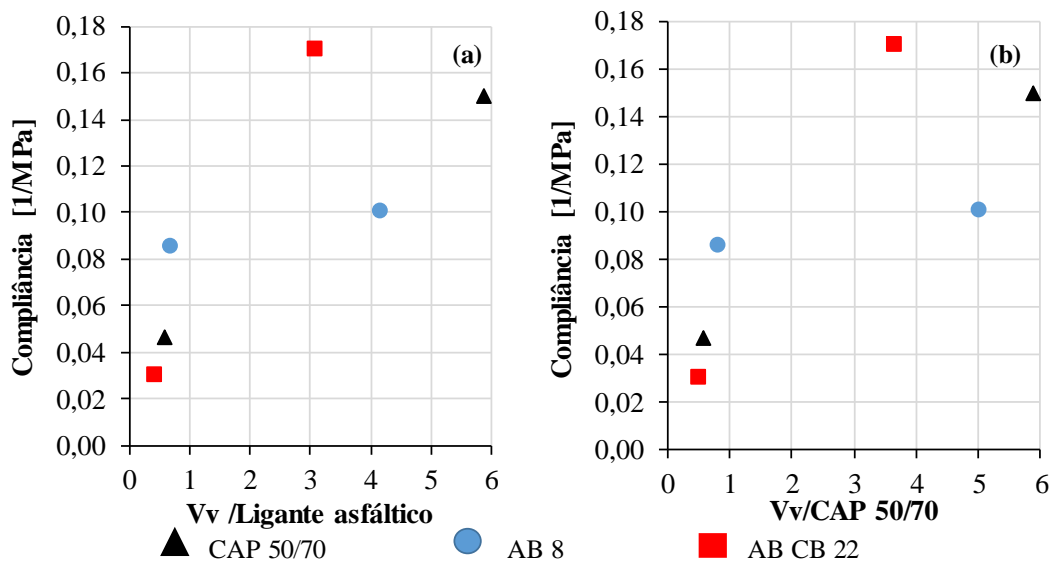


Figura 5.38 Compliance *versus* (a) Vv/ligante asfáltico; (b) Vv/CAP 50/70.

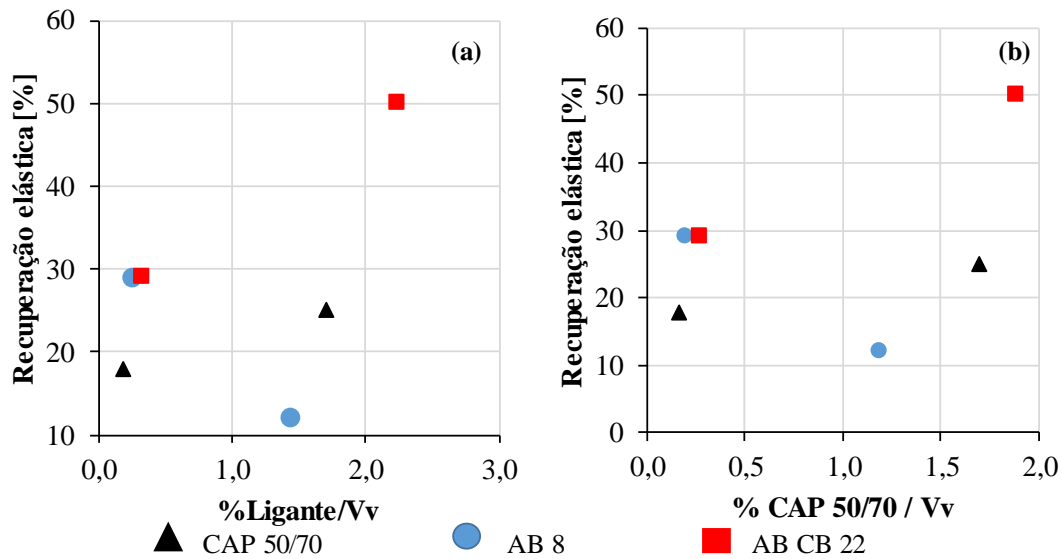


Figura 5.39 Recuperação elástica *versus* (a) ligante asfáltico/Vv; (b) CAP 50/70/Vv.

#### 5.2.4.2 Misturas asfálticas com ligantes modificados com fileres

A Figura 5.40 apresenta os resultados do ensaio *creep* estático no tempo, para as misturas asfálticas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com 20% em peso de material fíler (cal, RMF e lodo de ETA).

A presença dos materiais fíleres no ligantes asfáltico contribui para à diminuição da fluência nas misturas asfálticas CBUQ e CPA em relação à amostra de referência. Observa-se que a mistura com cal apresenta menores valores da curva de fluência ao longo do tempo, seguida das misturas com RMF e lodo de ETA respetivamente.

A mistura com ligante asfáltico com cal diminuiu em aproximadamente quatro vezes as magnitudes das deformações no tempo em relação à mistura com CAP 50/70 puro tanto nas misturas CBUQ como nas misturas CPA. Para o caso dos asfaltos modificados com RMF e ETA, observa-se também, mas em menor grau a diminuição das deformações axiais verticais no tempo em relação à mistura com CAP 50/70 puro para as misturas CBUQ. Já nas misturas CPA as reduções foram mais significativas as misturas contendo RMF chegou a apresentar compliance ligeiramente inferior à mistura cal.

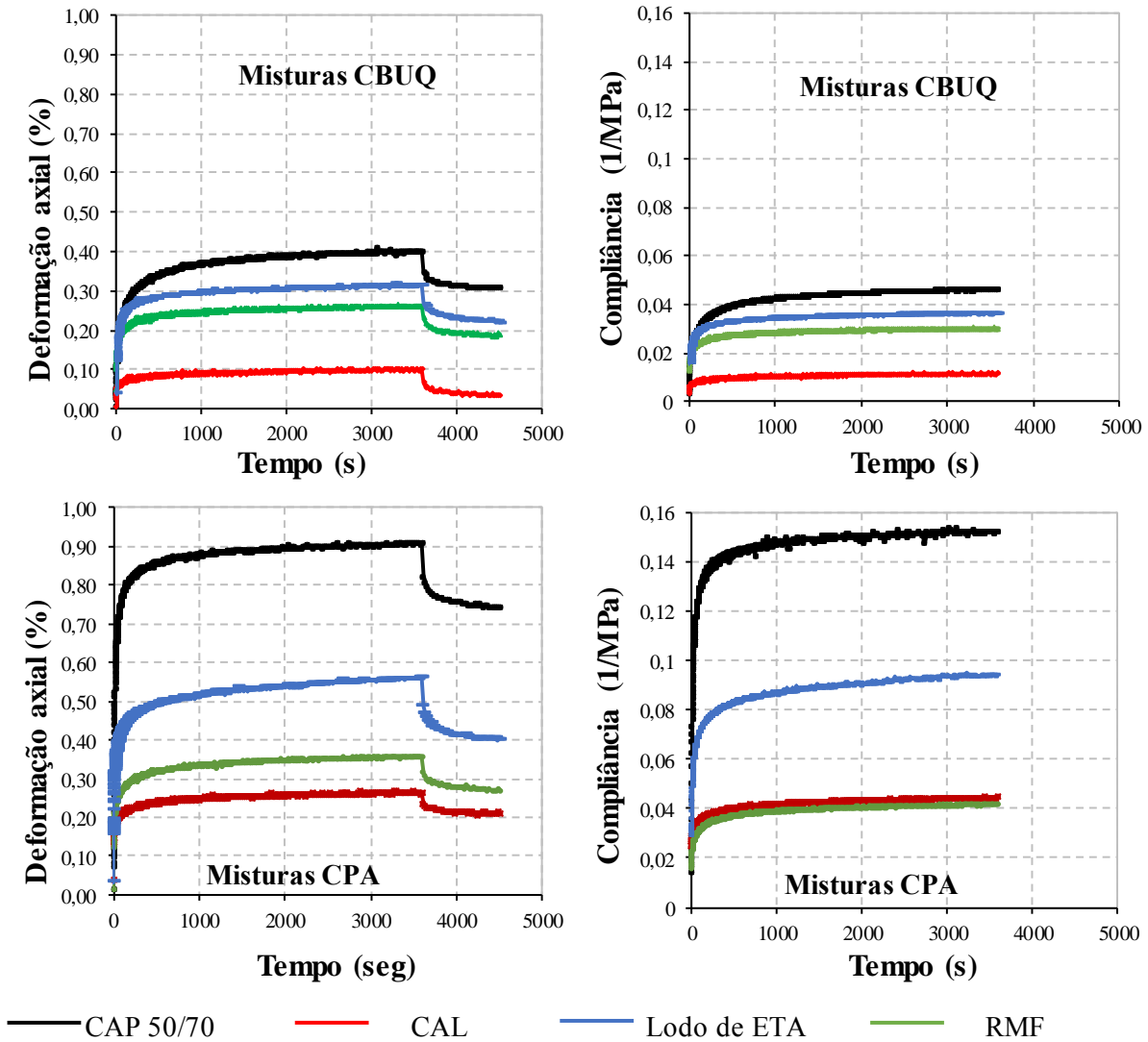


Figura 5.40 Comportamento das misturas CBUQ com asfaltos modificados com fileres frente à deformação axial antes e após o descarregamento.

Os resultados do retorno elástico para as misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com fileres são apresentados na Figura 5.41.

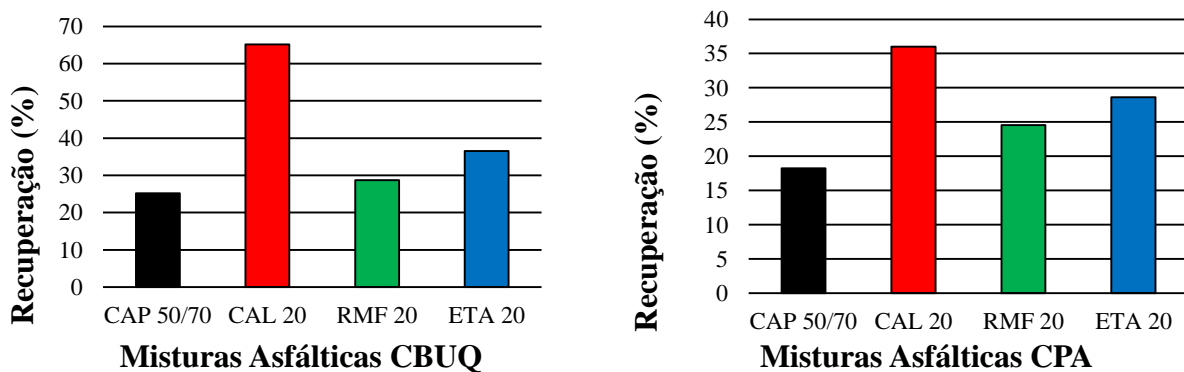


Figura 5.41 Deformações recuperáveis e permanentes no ensaio do módulo de creep estático para misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com fileres.

Analisando-se os resultados apresentados na Figura 5.38 pode-se concluir que a cal contribui de modo mais significativo para a recuperação elástica do material, tanto na mistura CBUQ como na CPA. As recuperações elásticas das misturas contendo os fíleres lodo de ETA 20 e RMF 20 também foram superiores às obtidas para as misturas contendo CAP 50/70 puro. De forma geral a incorporação dos materiais fíleres na matriz do ligante asfáltico contribui para o aumento da rigidez e recuperação elástica das misturas CBUQ e CPA.

Avaliando-se o comportamento das misturas com fíleres em função do teor de ligante ou de CAP dividido pelo volume de vazios, as Figuras 5.42, 5.43 e 5.44 mostram respectivamente que a deformação máxima, a compliance e a recuperação elástica sofrem efetivamente influência do filer e do tipo de filer adicionado às misturas. A maior influência nos comportamentos relativos à deformação máxima e à compliance se deu com a incorporação do filer cal, seguido do filer RMF e mais próximo ao comportamento do CAP 50/70 puro encontra-se o lodo de ETA. No entanto, em termos de recuperação elástica as posições dos fíleres RMF e lodo de ETA se invertem em relação ao CAP 50/70 puro (Figura 5.44). Cabe destacar que embora nas misturas CPA tanto em termos de ligante (CAP mais filer) como em termos de CAP o teor referente ao CAP 50/70 puro seja inferior ou igual aos teores das misturas contendo filer o que justificaria o pior comportamento, nas misturas CBUQ o teor de CAP 50/70 puro é maior ou igual aos teores das misturas com filer, o que aponta para a efetiva contribuição dos fíleres para a melhoria do comportamento das misturas.

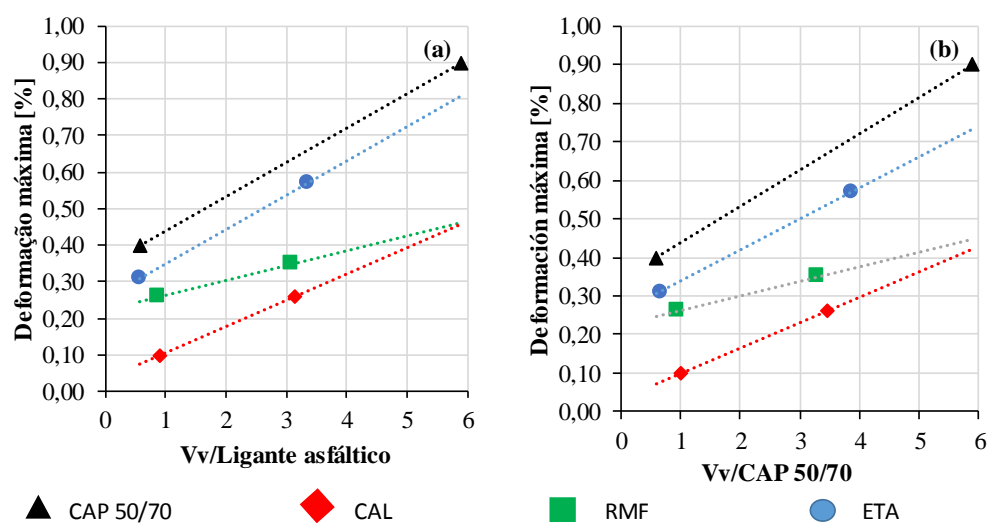


Figura 5.42 Deformação máxima *versus* (a) Vv/ligante asfáltico; (b) Vv/CAP 50/70.

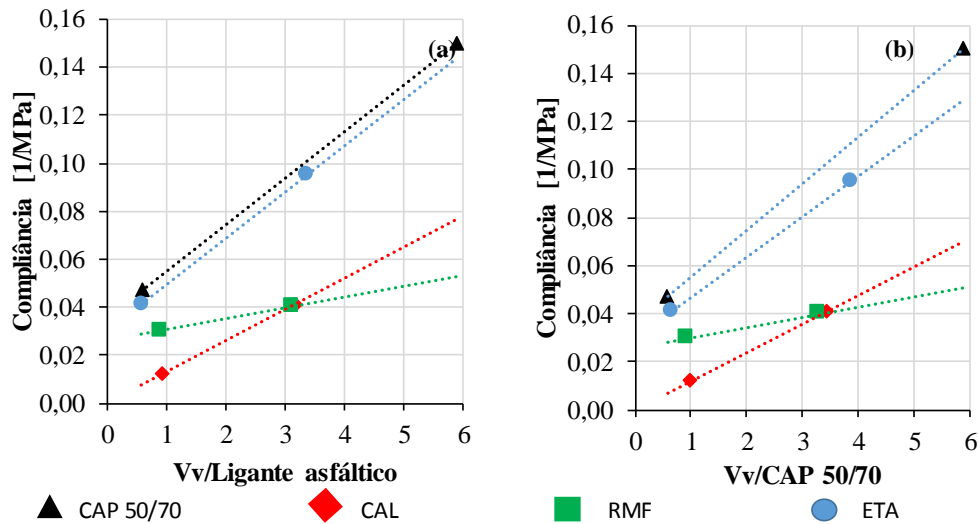


Figura 5.43 Compliance versus (a) Vv/ligante asfáltico; (b) Vv/CAP 50/70.

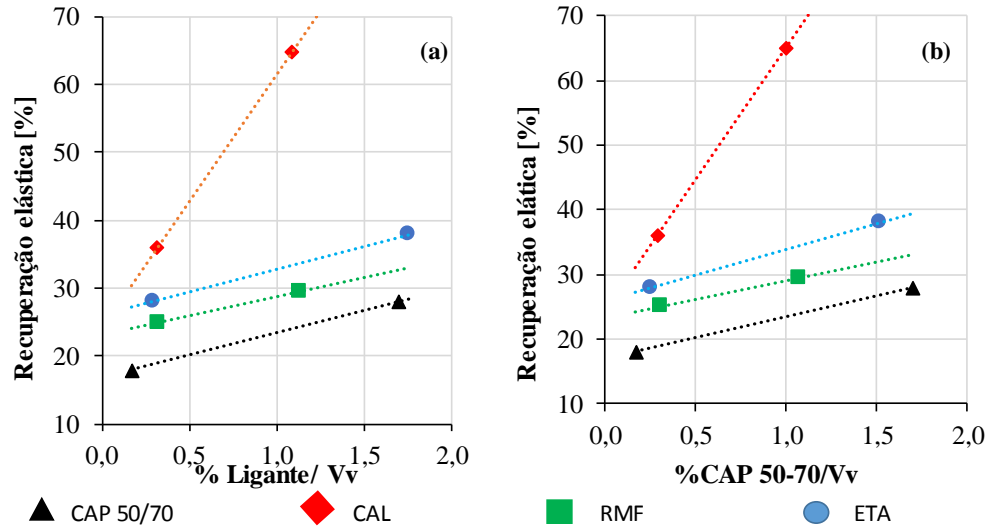


Figura 5.44 Recuperação elástica versus (a) ligante asfáltico/Vv; (b) CAP 50/70/Vv.

## 5.2.5 Ensaio de vida de fadiga por compressão diametral

### 5.2.5.1 Misturas asfálticas com ligantes modificados com elastômeros

Neste subitem serão apresentadas as curvas de vida de fadiga para as misturas asfálticas CBUQ e CPA elaboradas com asfaltos modificados com elastômero de tipo borracha e com fíleres. As curvas de vida de fadiga permitem determinar os parâmetros para o dimensionamento mecânico, permitindo prever o número de ciclos ou solicitações que a estrutura do pavimento pode suportar a se comparar com o tráfego previsto. Neste sentido, foram determinados o esforço do material ( $\sigma_6$ ) para  $10^6$  ciclos. Os ensaios foram feitos na condição de tensão controlada, utilizando níveis de 10%, 20%, 30% e 40% da resistência à tração para cada mistura asfáltica à temperatura de 25 °C.

Foram feitos três corpos de prova para cada nível de tensão, em alguns casos devido à dispersão dos dados foram descartados os resultados. A Figura 5.45 e Tabela 5.7 apresentam os resultados das curvas de vida de fadiga e parâmetros dos modelos das misturas CBUQ e CPA para os ligantes modificados com elastômeros. Os pontos com os símbolos vazios foram excluídos das correlações.

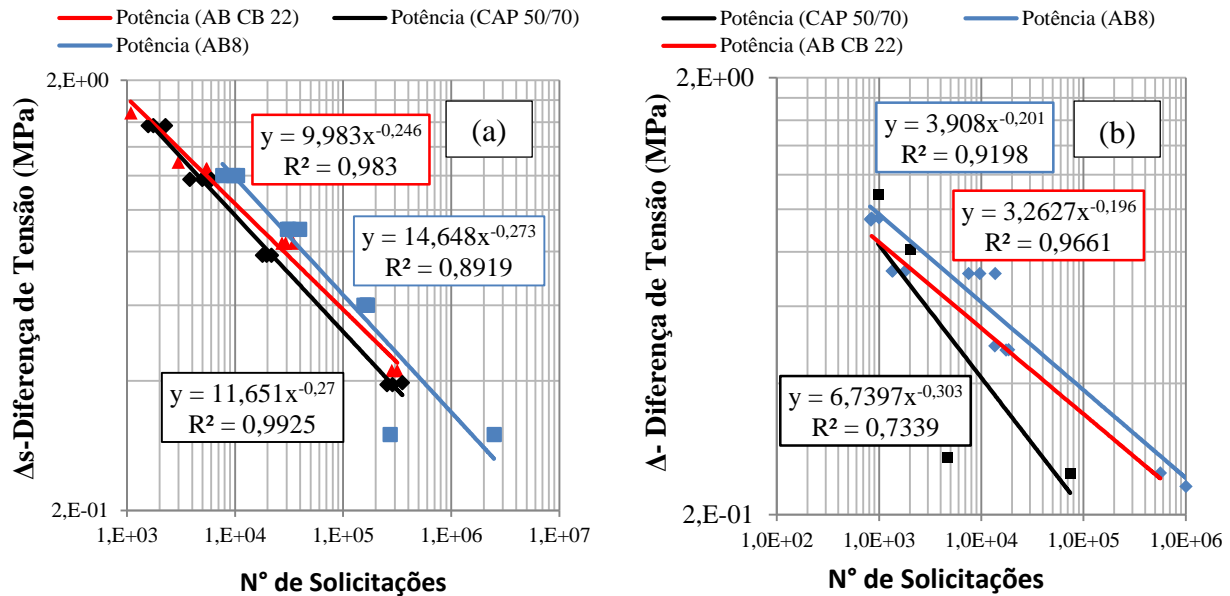


Figura 5.45 Vida de fadiga misturas com asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha: (a) misturas CBUQ; (b) misturas CPA.

Tabela 5.5 Parâmetros da lei de fadiga das misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com elastômeros – Tensão controlada.

Ligante Asfáltico	Mistura CBUQ				Mistura CPA			
	k2	n2	r <sup>2</sup>	$\sigma_6$	k2	n2	r <sup>2</sup>	$\sigma_6$
CAP 50/70	11,651	-0,270	0,993	0,279	6,740	-0,303	0,734	0,102
AB8	14,648	-0,273	0,892	0,337	3,908	-0,201	0,920	0,243
AB CB 22	9,983	-0,246	0,983	0,334	3,263	-0,196	0,966	0,218

A partir da Figura 5.45 e Tabela 5.7 pode-se observar que as misturas asfálticas do tipo CBUQ e CPA com os ligantes asfálticos modificados com elastômeros apresentaram maior vida de fadiga que o CAP 50/70 traduzidos pela diminuição do parâmetro n2 e aumento do  $\sigma_6$ . Neste sentido, os aumentos provêm das características físicas e reológicas dos ligantes modificados, sendo que os mesmos apresentaram maiores percentuais de recuperação elástica segundo os ensaios apresentados no item 4.3.3. Os grãos de borracha presentes nas misturas atuam como amortecedores durante a aplicação da carga, contribuindo para a capacidade de recuperação elástica da mistura (Sinisterra, 2014). O aumento da rigidez no ligante AB CB 22 pode ser devido



à presença da cal ou simplesmente ao menor teor de borracha compondo a mistura (13,6 %) em relação à mistura AB 8 (17 %).

### 5.2.5.2 Misturas asfálticas com ligantes modificados com fileres

A Figura 5.46 apresenta os resultados das curvas de vida de fadiga a tensão controlada, das misturas CBUQ e CPA confeccionadas com ligantes asfálticos modificados com 20% em peso de materiais fileres (cal, RMF e lodo de ETA). Os pontos sem preenchimento foram excluídos das correlações, por fugirem significativamente das tendências observadas.

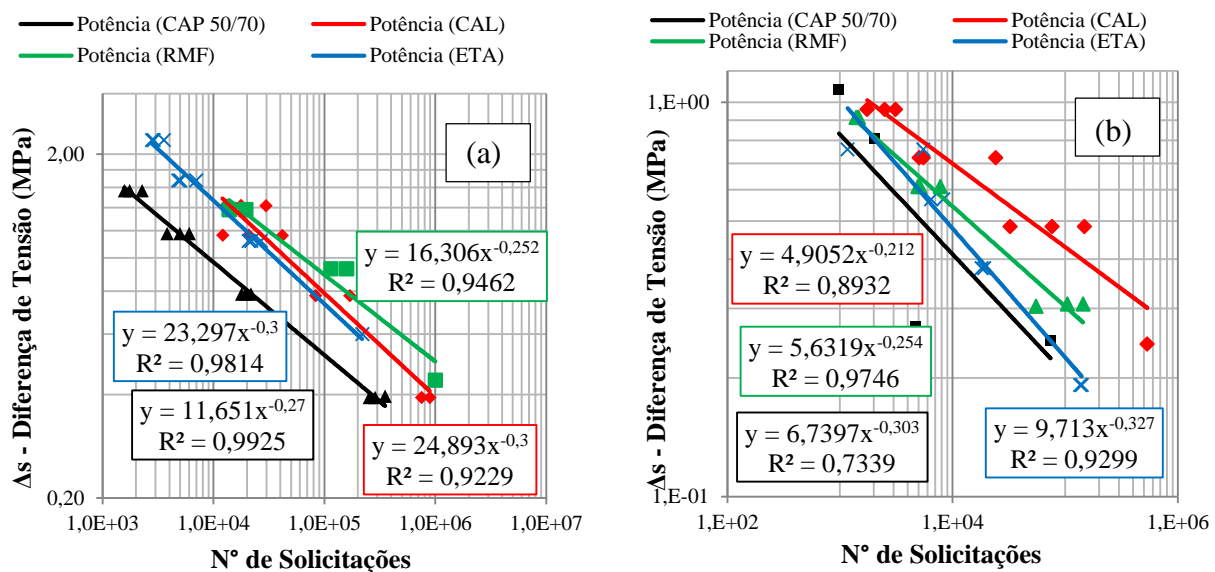


Figura 5.46 Vida de fadiga misturas com asfaltos modificados com fileres: (a) misturas CBUQ; (b) misturas CPA.

Tabela 5.6 Parâmetros da lei de fadiga das misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com fileres – Tensão controlada.

Ligante Asfáltico	Mistura CBUQ				Mistura CPA			
	k2	n2	r <sup>2</sup>	$\sigma_6$	k2	n2	r <sup>2</sup>	$\sigma_6$
CAP 50/70	11,651	-0,270	0,993	0,279	6,740	-0,303	0,734	0,102
CAL	24,893	-0,300	0,923	0,395	4,905	-0,212	0,893	0,262
RMF	16,306	-0,252	0,946	0,502	5,632	-0,254	0,975	0,169
ETA	23,297	-0,300	0,981	0,369	9,713	-0,327	0,930	0,106

A partir dos resultados de vida de fadiga apresentados na Figura 5.46 e Tabela 5.8 pode-se observar que as misturas asfálticas do tipo CBUQ e CPA com os ligantes asfálticos modificados com fileres apresentaram maior vida a fadiga que o CAP 50/70. Esses aumentos foram atribuídos ao aumento das características físicas dos ligantes asfálticos, assim como também ao aumento da resposta a cargas monotônicas. Os aumentos de vida de fadiga foram evidenciados pela

diminuição do parâmetro  $n_2$  e aumento do  $\sigma_6$ , neste sentido as amostras com RMF apresentaram maior vida de fadiga na forma de CBUQ ao serem comparadas com as misturas com cal.

### 5.2.6 Resistência ao dano por umidade induzida

Neste subitem serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral em amostras condicionadas e não condicionadas segundo a metodologia apresentada no Item 3.5.6, a fim de avaliar a adesividade das misturas asfálticas CBUQ e CPA elaboradas com asfaltos modificados com elastômero de tipo borracha e com fíleres. Os resultados apresentados correspondem ao valor médio de três réplicas e considerando uma dispersão dos dados experimentais com um coeficiente de variação inferior a 6%. Os corpos de prova das misturas CBUQ foram confeccionados com o volume de vazios entre 6% e 8%, segundo as recomendações de Martinez, (2014). Para os corpos de prova das misturas CPA trabalhou-se com o volume de vazios obtidos no teor ótimo de cada mistura estudada.

#### 5.2.6.1 Misturas asfálticas com ligantes modificados com elastômeros

A Figura 5.47 apresenta por meio de barras os resultados das resistências à tração por compressão diametral RT e RTc correspondentes às fases antes e após condicionamento respectivamente, assim como também a relação de resistência à tração RRT definida como o percentual entre a resistência à tração das amostras condicionadas e as não condicionadas para as amostras CBUQ e CPA com ligantes modificados com elastômeros indicadas pelo símbolo X, nas Figura 5.47. Maiores valores de RRT indicam menor susceptibilidade das características mecânicas das misturas à ação da umidade induzida.

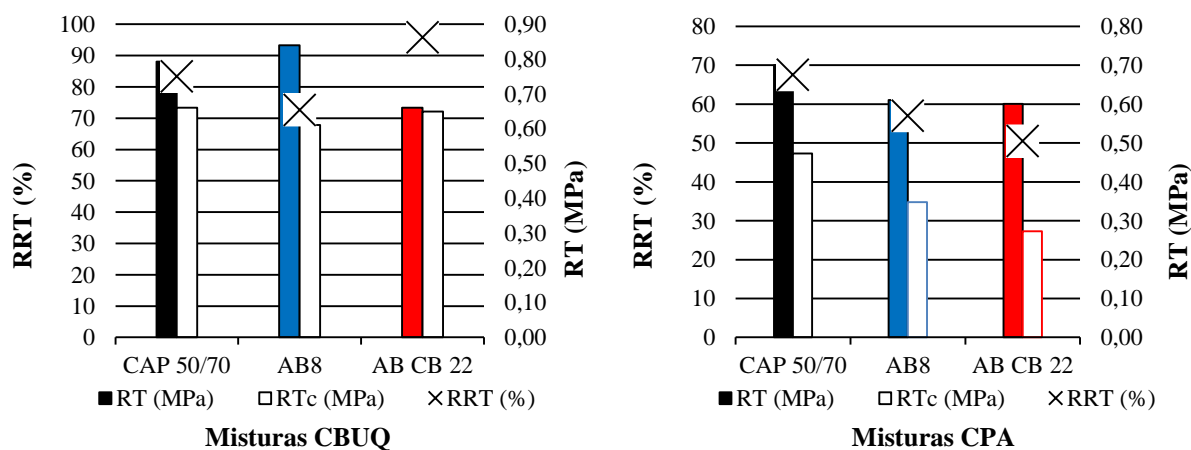


Figura 5.47 Resistência ao dano por umidade induzida de misturas com asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha.

Ao se comparar os resultados da resistência ao dano por umidade induzida das misturas CBUQ e CPA da mistura de referência CAP 50/70 com as misturas com AB8, evidenciou-se uma redução da RRT em aproximadamente 10% para as misturas CBUQ e CPA. A presença dos grãos de borracha e elevados teores de ligantes asfálticos influenciam na perda de adesividade das misturas asfálticas com asfalto borracha AB8. O ligante AB CB 22 apresentou padrão de comportamento diferentes nas misturas CBUQ e CPA. Na forma CBUQ os grãos de cal promovem maior aderência entre os grãos dos agregados, já na forma CPA a presença da cal não contribui para o aumento da aderência certamente devido ao maior volume de vazios dessas misturas.

### 5.2.6.2 Misturas asfálticas com ligantes modificados com fíleres

A Figura 5.48 apresenta os resultados da relação de resistência à tração RRT definida como o percentual entre a resistência à tração das amostras condicionadas e as não condicionadas para as misturas CBUQ e CPA confeccionadas com ligantes asfálticos modificados com 20% em peso dos materiais fíleres cal, RMF e lodo de ETA.

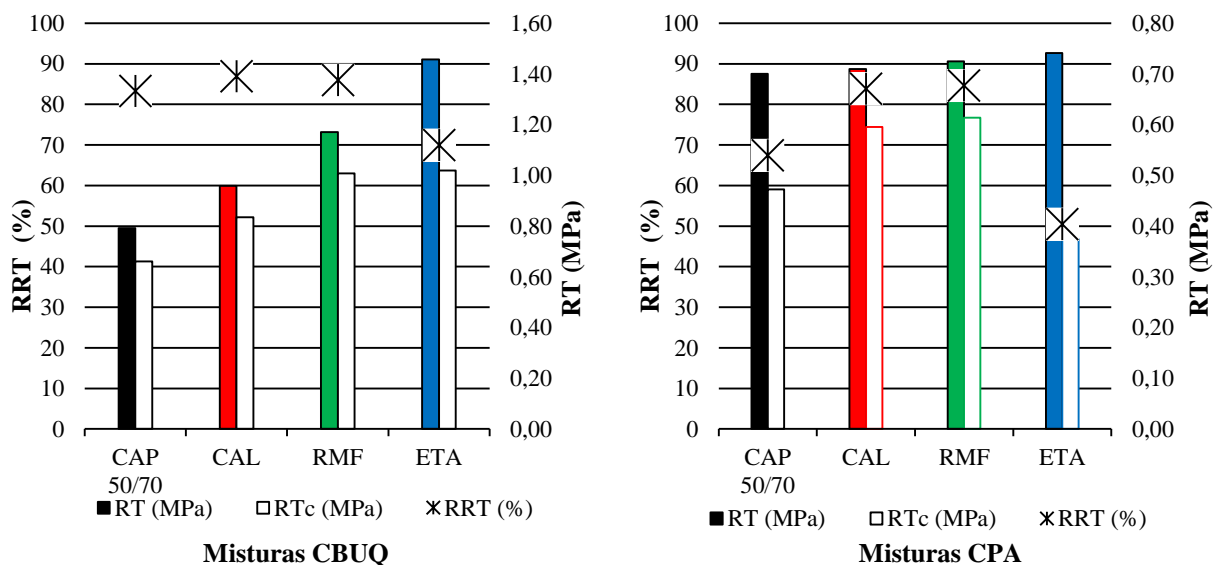


Figura 5.48 Resistência ao dano por umidade induzida de misturas com asfaltos modificados com fíleres.

A partir da Figura 5.42 pode-se observar um padrão de comportamento entre as misturas CBUQ e CPA, observando a influência na melhoria do desempenho do ligante asfáltico quando modificado com material fíler. A presença da cal e do RMF na forma de 20% em peso do ligante asfáltico, permite um aumento da relação de resistência à tração em aproximadamente 5% nas misturas asfálticas CBUQ e aproximadamente 15% nas misturas CPA, em referência às amostras de referência confeccionadas com CAP 50/70. Observa-se nessa figura que apesar dos fíleres de um modo geral contribuírem para a melhoria da resistência a tração das misturas não

condicionadas, essa contribuição é menor no caso das misturas CPA. Com o condicionamento a mistura obtida com a adição do lodo de ETA mostra-se como a mais degradável sendo que nas misturas CPA sua resistência à tração inferior ao resultado obtido para a mistura com o CAP 50/70 puro. Destaca-se que as amostras CBUQ estudadas atingiram os parâmetros de adesividade mínimo de RRT 70% especificados pela AASTHO (2007).

### 5.2.6.3 Análises das causas de alteração da relação da resistência à tração RRT

As Figuras 5.49 e 5.50 apresentam respectivamente os resultados da relação da resistência à tração RRT para misturas com asfaltos modificados com elastômeros, em função dos parâmetros volumétricos (percentual de ligante asfáltico e volume de vazios) e das relações ligante asfáltico e CAP 50/70 em relação ao volume de vazios.

Observa-se que a perda da resistência ao dano por umidade induzida definida pela relação RRT é diretamente proporcional ao teor de ligante asfáltico (Figura 5.49 a) e inversamente proporcional ao volume de vazios (Figura 5.49 b). Essa figura mostra que o comportamento das misturas se torna mais sensível as variações no teor de ligante e no volume de vazios quando se adiciona elastômero às misturas, em especial quando essa adição se faz acompanhar da adição do filer cal. Essa influência se confirma quando se faz a análise da RRT em função da relação teor de ligante e teor de CAP dividido pelo volume de vazios (Figura 5.50).

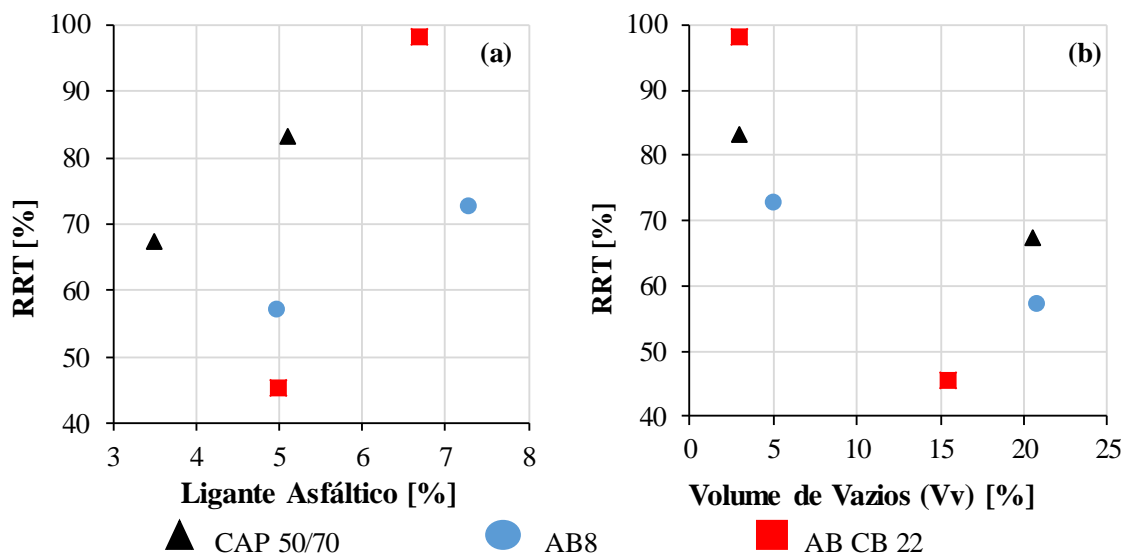


Figura 5.49 Relação da resistência à tração *versus* (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios.

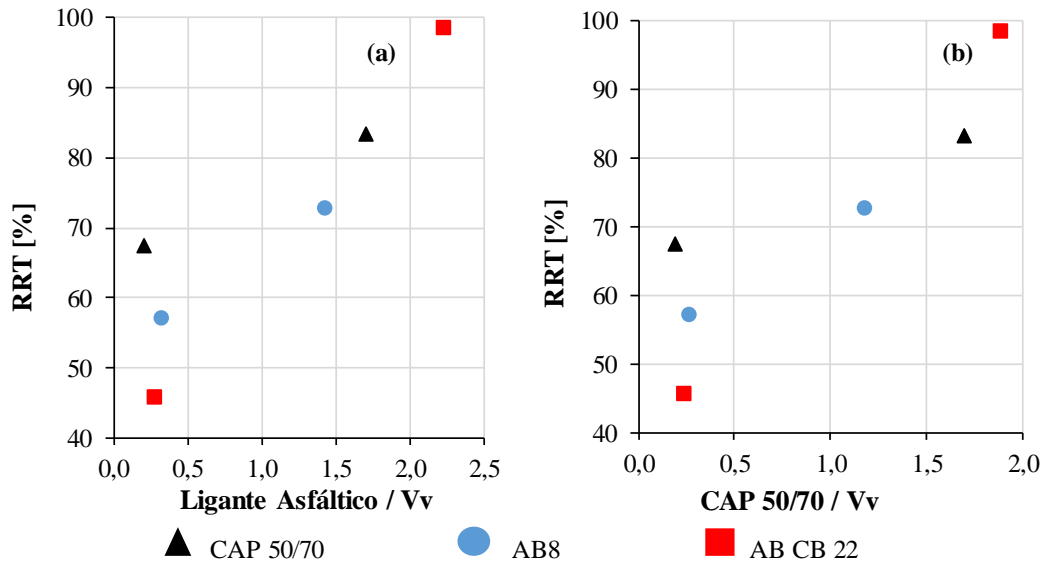


Figura 5.50 Relação da resistência à tração *versus* (a) ligante asfáltico/Vv; (b) CAP 50-70/Vv.

Analisando as alterações da RRT nas misturas asfálticas CBUQ e CPA com ligantes asfálticos modificados com fíleres, pode-se observar que a RRT é diretamente proporcional ao teor de ligante asfáltico (Figura 5.49 a) e inversamente proporcional ao volume de vazios (Figura 5.49 b). As Figuras 5.50 a e b apresentam para a relação porcentagem de ligante – volume de vazios e porcentagem de CAP – volume de vazios o mesmo padrão de comportamento verificado nas Figuras 5.49 a e b. Constata-se nessas figuras que as misturas modificadas com lodo de ETA apresentaram menores valores da RRT em relação ao CAP 50/70. No caso das misturas asfálticas modificadas com cal e RMF estas apresentaram um mesmo padrão de comportamento, apresentando maiores valores de RRT em relação às misturas de referência com CAP 50/70. Os resultados mostrados nessas figuras mostram ainda que as misturas contendo o fíler lodo de ETA são as mais sensíveis às variações nos teores de ligante e às variações nos volumes de vazios. Observa-se ainda que com a adição dos fíleres cal e RMF as misturas se tornam menos sensíveis às variações tanto no teor de ligante como no volume de vazios.

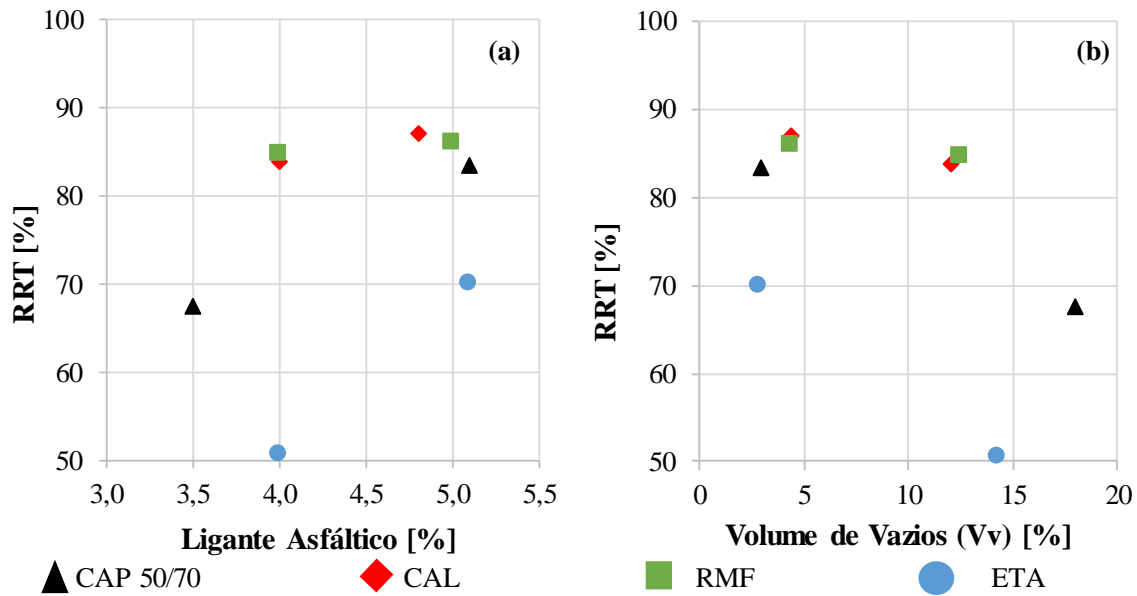


Figura 5.51 Relação da resistência à tração *versus* (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios.

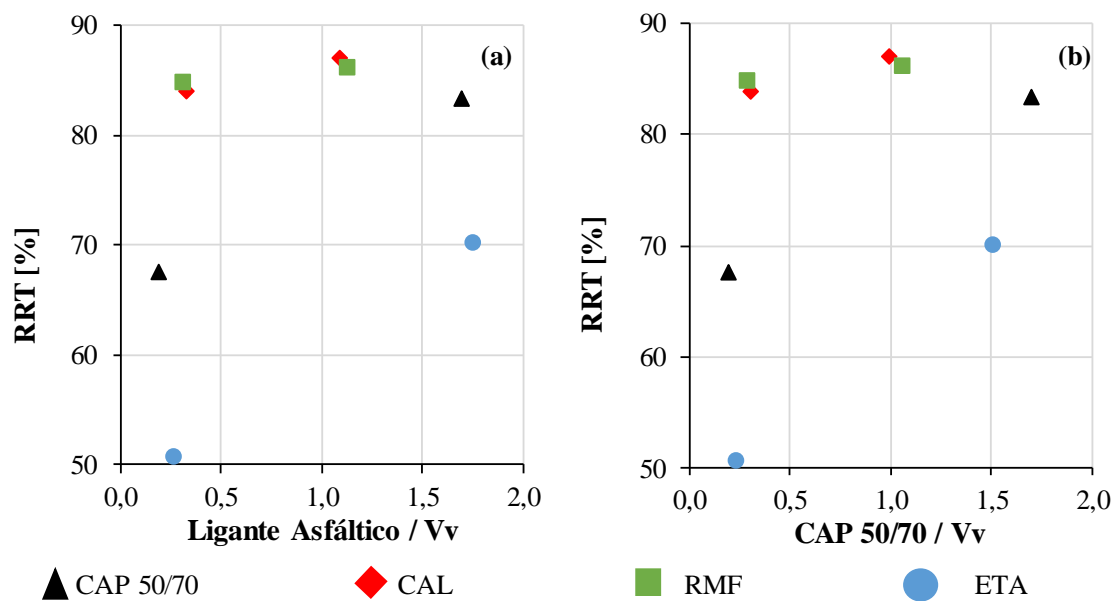


Figura 5.52 Relação da resistência à tração *versus* (a) ligante asfáltico/Vv; (b) CAP 50-70/Vv.

Devido à similaridade dos resultados da RRT em função dos parâmetros volumétricos para as misturas com ligantes asfálticos modificados com fíleres do tipo cal e RMF, determinou-se a correlação entre a RRT e a relação do teor volumétrico de fíler dividido pelo volume de vazios, desconsiderando as misturas de referência com CAP 50/70 e as misturas com lodo de ETA (Figura 5.53). Neste sentido, pode-se observar que as variações da RRT nas misturas asfálticas modificadas com cal e RMF dependem do percentual volumétrico de fíler adicionado, lembrando que a densidade do fíler RMF ( $4,085 \text{ g/cm}^3$ ) é bem superior a do fíler cal ( $2,688 \text{ g/cm}^3$ ).

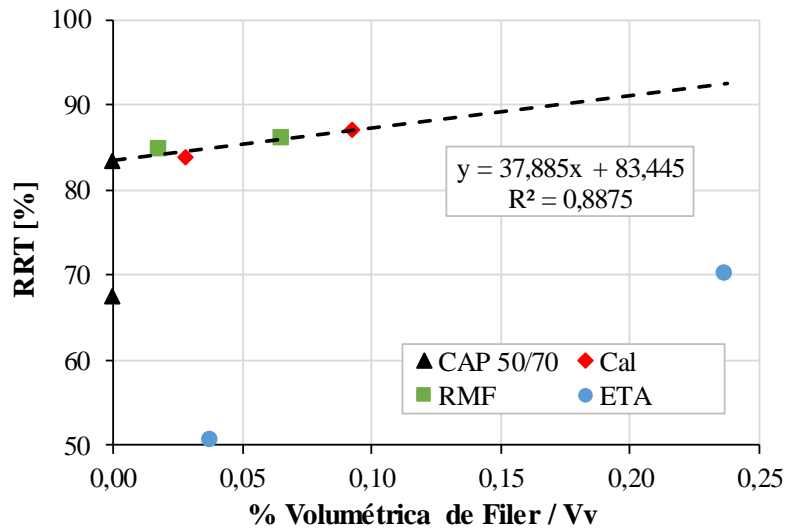


Figura 5.53 Relação da resistência à tração *versus* % volumétrica de fíler/Vv.

## 5.2.7 Desgaste por abrasão

Neste item são apresentados os resultados do desgaste à abrasão a seco obtidos no ensaio Cântabro para as misturas asfálticas CBUQ e CPA elaboradas no teor ótimo de ligante asfáltico. As misturas foram elaboradas com os dois grupos de asfaltos modificados, os com elastômeros do tipo borracha e os com os fíleres cal, RMF e lodo de ETA. Os resultados correspondem à média e desvio padrão de três corpos de prova.

### 5.2.7.1 Misturas asfálticas com ligantes modificados com elastômeros

A Figura 5.48 apresenta os resultados do desgaste à abrasão Cântabro das misturas com asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha para as misturas CBUQ e CPA.

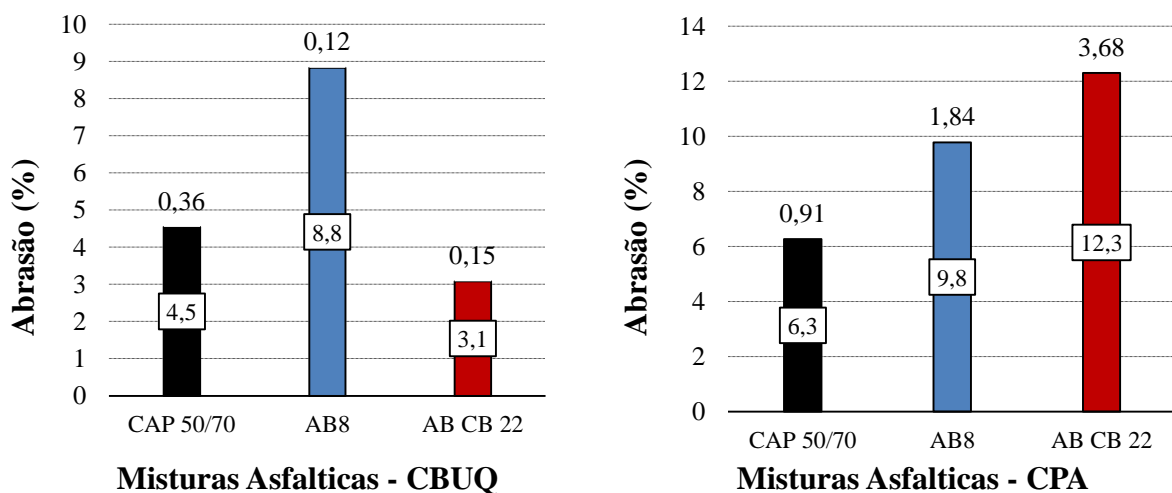


Figura 5.54 Desgaste à abrasão em misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com elastômeros do tipo borracha.

Conforme esperado, as misturas asfálticas CBUQ com menor volume de vazios e maior teor de ligante asfáltico apresentaram menor percentual de abrasão que as misturas CPA que são possuidoras de maior volume de vazios e menor teor de ligante asfáltico. Na Figura 5.48 observa-se que as misturas asfálticas CBUQ e CPA com ligante AB8 apresentaram maior abrasão em relação à mistura com CAP 50/70, fato atribuído à falta de adesividade da borracha com os agregados nos contatos ligante-agregado, apesar do maior teor de CAP 50/70 que as compõe. O ligante AB CB 22 apresentou menor abrasão na forma de CBUQ e maior abrasão na forma de CPA em relação às outras misturas estudadas, fato provavelmente devido ao processo de compactação e ativação dos grãos de cal no composto de borracha.

Os resultados obtidos para as misturas contendo borracha (AB 8), borracha mais cal (AB CB 22) e apenas CAP 50/70 puro, se por um lado indicam que a presença da borracha contribui para reduzir os contatos CAP - agregado por outro mostram que nas misturas CBUQ dotadas de menor volume de vazios a cal participa do processo interativo fortalecendo a adesão do CAP aos agregados. Nas misturas abertas CPA não aparece essa contribuição da cal haja vista a maior abrasão sofrida pelas misturas AB CB 22. No entanto, atentando-se para os desvios padrões percebe-se que nas misturas CBUQ eles são menores nas misturas com elastômero enquanto nas misturas CPA essa relação se inverte chegando na mistura AB8 a ser o dobro e na AB CB 22 o quádruplo das misturas com CAP 50/70 puro, ou seja, a mistura AB CB 22 apresenta o dobro do desvio padrão da mistura AB8. Essas observações permitem concluir que o pior desempenho registrado para a mistura AB CB 22 nas misturas CPA em relação às misturas CBUQ se deve provavelmente a mais falhas e dispersões nos contatos ligante – agregados.

#### **5.2.7.2 Misturas asfálticas com ligantes modificados com fíleres**

A Figura 5.49 apresenta os resultados do desgaste à abrasão Cântabro das misturas com asfaltos modificados com 20% em peso dos materiais fíleres cal, RMF e lodo de ETA, para as misturas CBUQ e CPA. Os resultados correspondem à média e desvio padrão de três corpos de prova.



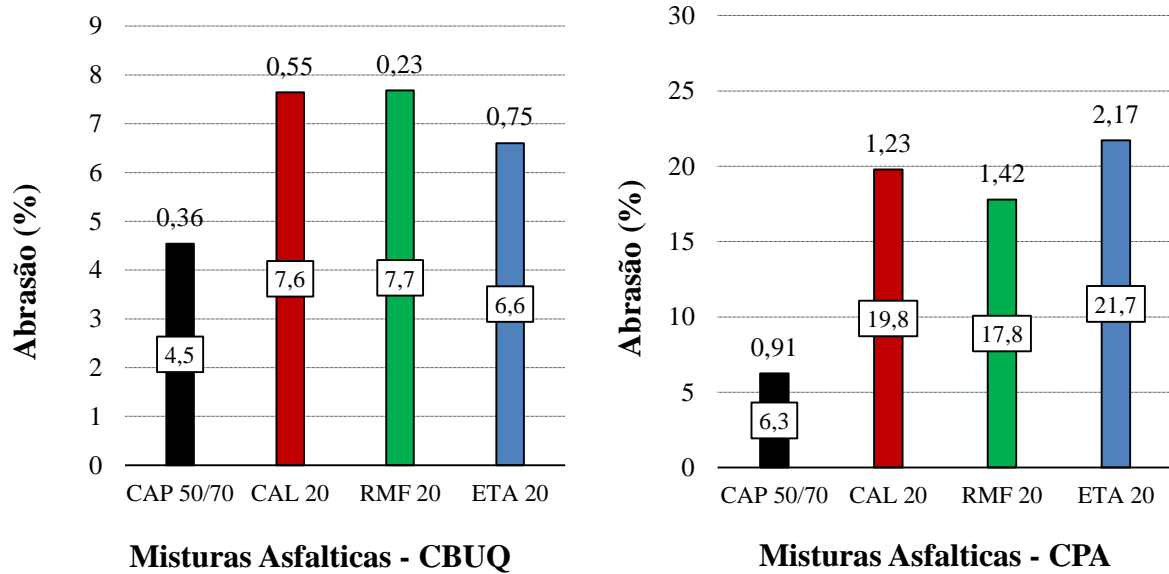


Figura 5.55 Desgaste à abrasão em misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com materiais fíleres.

Conforme o esperado, as misturas CBUQ apresentaram menores percentuais de abrasão em relação às misturas CPA devido ao baixo volume de vazios das misturas CBUQ em relação às misturas CPA. A partir da Figura 5.49 pode-se observar que as misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados com materiais fíleres apresentaram maior percentual de abrasão em relação às amostras de referência com CAP 50/70. As misturas CBUQ com asfaltos modificados com Cal, RMF e lodo de ETA apresentaram teores ótimos de ligantes asfáltico de 4,8%, 5,0% e 5,1% respectivamente, e essas variações dos teores ótimos de ligantes asfálticos contribuíram para as variações registradas nos resultados de abrasão. Nas misturas CPA as abrasões nas misturas com fíleres em relação as misturas contendo CAP 50/70 puro foram superiores que nas misturas CBUQ, atentandose para os desvios padrões. Observa-se que nas misturas CBUQ apenas as misturas com o fíler RMF foi inferior à registrada na mistura com CAP 50/70 puro. Nas misturas CPA o maior desvio padrão foi registrado para todas as misturas com fíleres. Tais resultados apontam para a maior heterogeneidade dos contatos ligante-agregado nas misturas contendo fíleres.

É possível ainda, fazendo-se necessário análises químico-mineralógicas e microestruturais complementares, que as variações dos percentuais de abrasão podem estar relacionadas também às naturezas das interações físico-químicas e estruturais dos materiais fíleres com o CAP 50/70 e destes com os agregados, podendo as cargas elétricas e as características de superfície dos fíleres assim como a energia de compactação e, por consequência, o volume de vazios, ser um elemento fundamental na qualidade dessas interações.

### 5.2.7.3 Análises das causas de alteração do desgaste à abrasão

Para o entendimento das alterações da adesividade na mistura asfáltica, são apresentados os resultados de desgaste à abrasão das misturas elaboradas com ligantes modificados com elastômeros, em função do teor de ligante asfáltico (Figura 5.56 a) e do volume de vazios (Figura 5.56 b). Para cada tipo de ligante asfáltico estudado, pode-se evidenciar que o percentual de desgaste à abrasão é inversamente proporcional ao teor de ligante asfáltico e diretamente proporcional ao volume de vazios. A Figura 5.57 apresenta uma análise incorporando esses dois parâmetros por meio das relações entre o teor de ligante e o volume de vazios (Figura 5.57 a) e entre o teor de CAP e o volume de vazios (Figura 5.57 b).

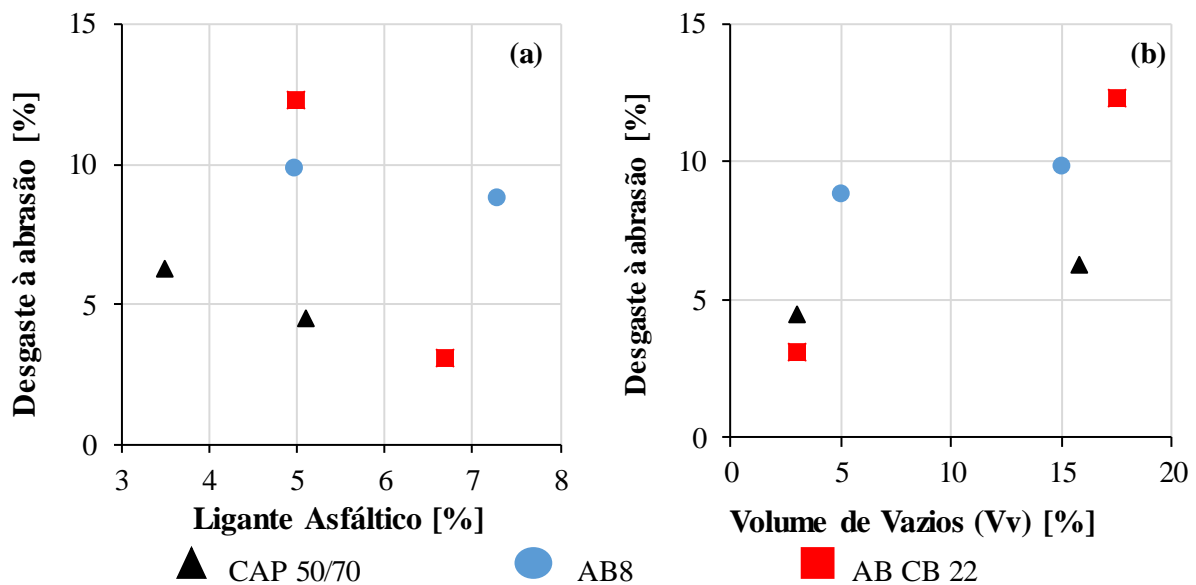


Figura 5.56 Desgaste à abrasão *versus* (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios.

Tanto os resultados mostrados na Figura 5.56 como os mostrados na Figura 5.57 indicam que as misturas com o elastômero AB8 apresentam-se menos sensíveis às alterações do teor de ligante, do volume de vazios assim como da relação entre esses dois parâmetros do que as misturas contendo o CAP 50/70 puro. Comportamento contrário, ou seja, maior sensibilidade a essas variações paramétricas, é observado para as misturas com elastômero AB CB 22. Destaca-se ainda, que quando da análise em função da relação seja da porcentagem de ligante / volume de vazios, seja da porcentagem de CAP / volume de vazios, ocorre a aproximação dos resultados com elastômero para uma tendência única.

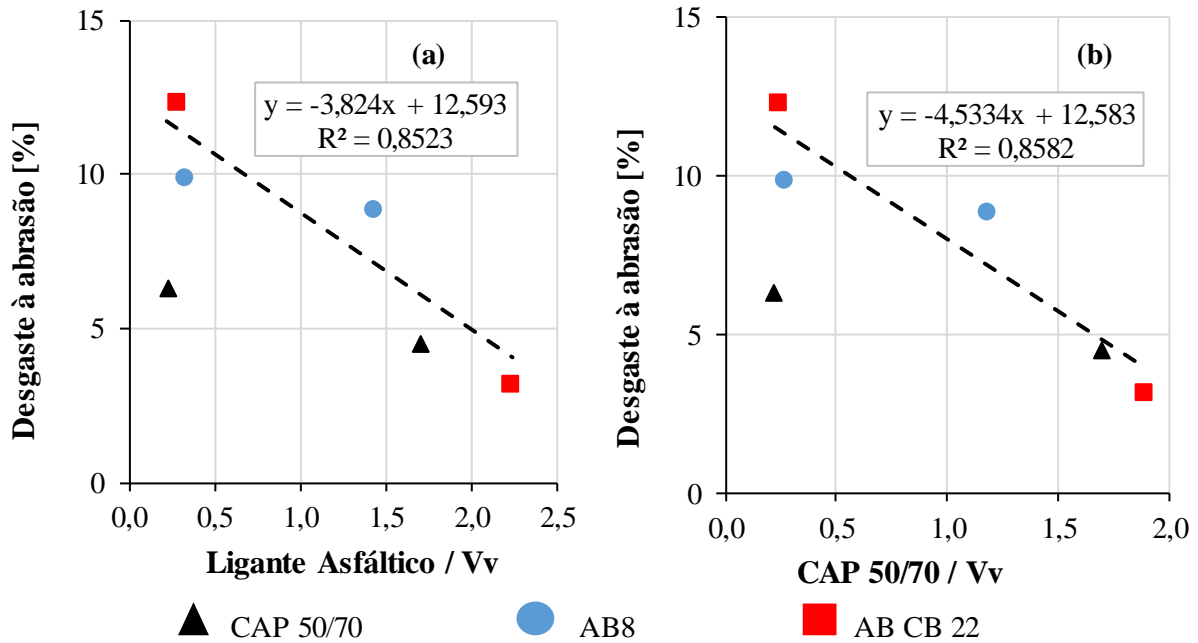


Figura 5.57 Desgaste à abrasão *versus* (a) ligante asfáltico/Vv; (b) CAP 50-70/Vv.

As misturas com ligantes asfálticos modificados com fíleres indicam que o desgaste à abrasão é inversamente proporcional ao teor de ligante asfáltico (Figura 5.58 a) e diretamente proporcional ao volume de vazios (Figura 5.58 b). Observa-se nessas figuras maior sensibilidade ao desgaste das misturas com fíleres que das misturas contendo CAP 50/70 puro. Entre os fíleres não fica clara a influência do tipo desse componente na abrasão.

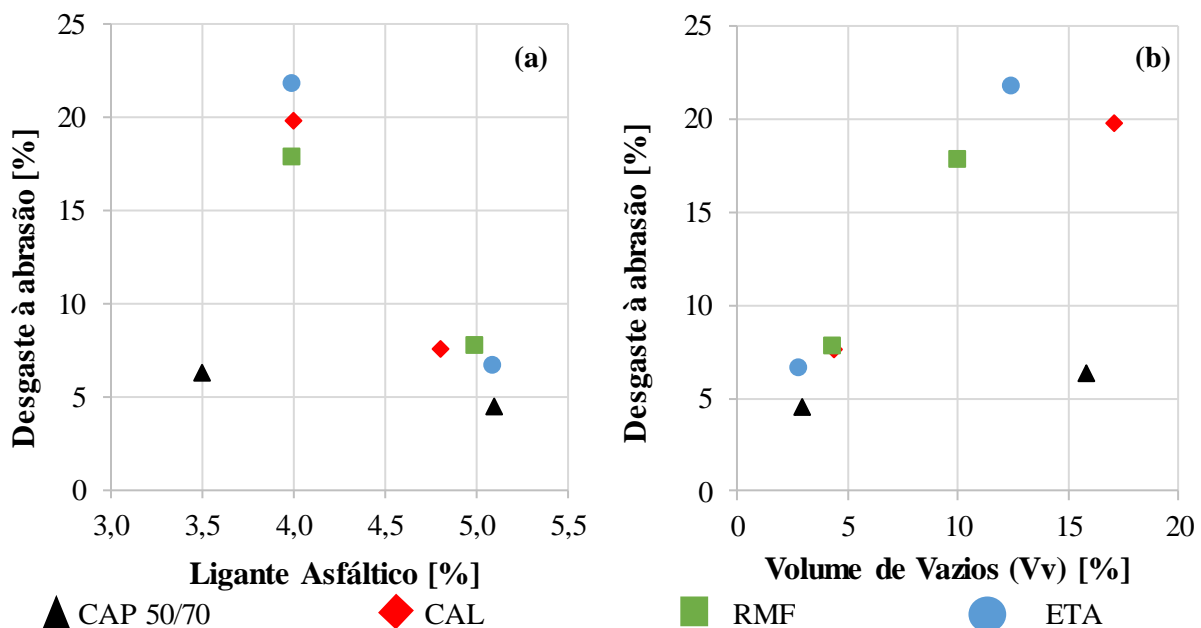


Figura 5.58 Desgaste à abrasão *versus* (a) ligante asfáltico; (b) volume de vazios.

Excluindo as misturas asfálticas de referência com CAP 50/70 observa-se certo paralelismo entre a distribuição dos pontos para os diferentes fíleres e uma tendência do desgaste à abrasão em função da relação porcentagem de ligante asfáltico/volume de vazios (Figura 5.59 a) e porcentagem de CAP 50/70/volume de vazios (Figura 5.59 b). Contudo, as misturas com ligante asfáltico modificado com lodo de ETA apresentam maior desgaste à abrasão para as mesmas relações paramétricas. É importante ressaltar a similaridade de comportamento quanto à abrasão entre os fíleres cal e RMF.

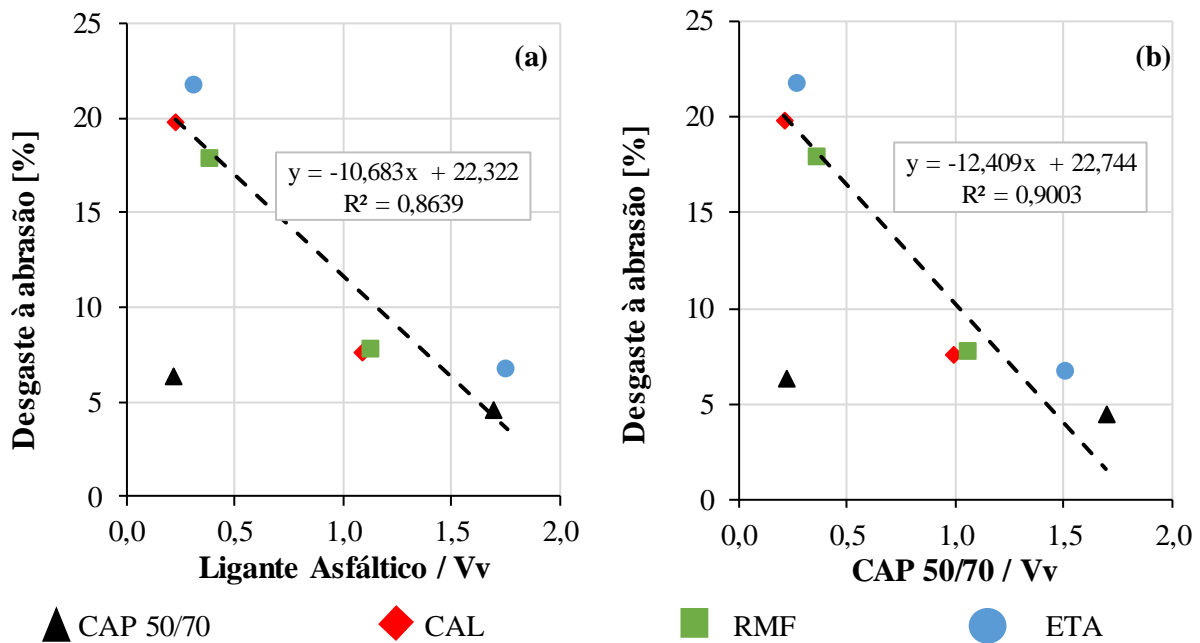


Figura 5.59 Desgaste à abrasão versus (a) ligante asfáltico/Vv; (b) CAP 50-70/Vv.

Atentando-se para os teores volumétricos em lugar de considerar os teores em peso, tendo em consideração que os três fíleres estudados apresentam densidades de grãos distintas, faz-se necessário análises complementares considerando-se esse aspecto. Nesse sentido, plotou-se o percentual de desgaste por abrasão em função dos parâmetros volumétricos para as misturas com ligantes asfálticos modificados com os fíleres do tipo cal, RMF e lodo de ETA (Figura 5.60 a). Pode-se observar nessa figura que as variações do percentual de desgaste à abrasão nas misturas considerando-se um volume de vazios constante são mais acentuadas para as misturas contendo o fíler RMF, seguida da mistura contendo cal e finalmente se tem a mistura contendo lodo de ETA que requer maior teor volumétrico de fíler na diminuição da abrasão considerando-se um mesmo volume de vazios. Observa-se ainda que para um mesmo teor volumétrico e um mesmo volume de vazios, ou seja, para uma mesma relação porcentagem volumétrica de fíler / volume de vazios, o desgaste por abrasão é maior para o lodo de ETA e menor para o fíler RMF assumindo a cal

valor intermediário o que aponta para a influência da natureza do fíler e não apenas para o seu teor volumétrico.

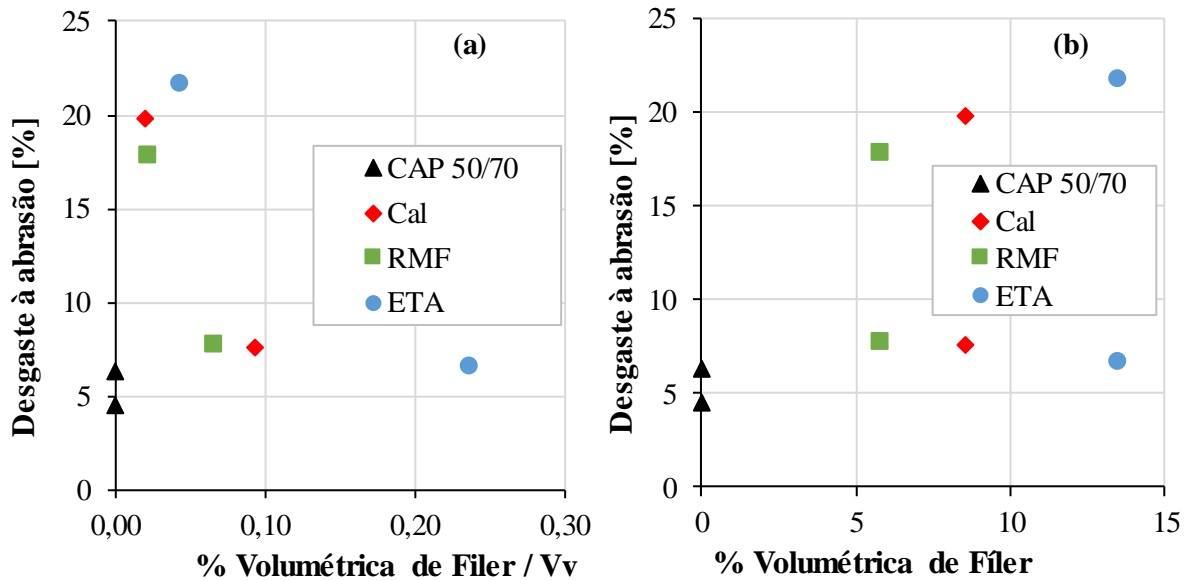


Figura 5.60 Desgaste à abrasão *versus*: (a) % volumétrica de fíler/Vv; (b) % Volumétrica de fíler.

Buscando analisar de modo separado a influência da porcentagem volumétrica de fíler compondo o ligante plotou-se o gráfico relacionando o desgaste por abrasão com a porcentagem volumétrica de fíler compondo o ligante (Figura 5.60 b). Observa-se nessa figura que nas misturas CBUQ o teor volumétrico de fíler não é tão relevante para o desgaste por abrasão embora a presença do fíler tenda a ampliá-la, no entanto, nas misturas CPA onde a presença do CAP é fundamental para reduzir o desgaste por abrasão, esta aumenta com o teor volumétrico de fíler.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

### 6.1 CONCLUSÕES

Avaliando-se o conjunto de resultados de caracterização física e química, o comportamento reológico dos ligantes asfálticos com elastômeros e fíleres e o desempenho mecânico das misturas CBUQ e CPA com asfaltos modificados, de forma geral pode-se concluir o seguinte:

#### Caraterização física e química dos materiais adicionados aos ligante asfáltico

- A partir dos ensaios de caracterização física e química, pode-se concluir que o fíler alternativo de rejeito de minério de ferro apresentou estabilidade de massa ao se submeter a variações de temperatura, enquanto que o fíler de lodo de ETA apresentou uma perda de massa significativa que pode ser atribuída à evaporação da água e à combustão da matéria orgânica. Quanto à cal também se observou estabilidade de massa às temperaturas usuais de fabricação de misturas asfálticas. As cargas elétricas dos fíleres convencionais e alternativos apresentam compatibilidade com a carga elétrica do asfalto CAP 50/70, verificadas por meio de ensaios de aderência asfalto-agregado. Com base nas análises realizadas, evidenciou-se que em estudos comparativos entre diferentes tipos de fíleres, devido às diferenças nas densidades dos materiais, é importante que se trabalhe com incorporações calculadas em termos volumétricos e não se considerando percentuais em peso ou massa como geralmente se faz.

#### Caraterização física e reológica dos ligantes asfálticos com adição de fíleres e elastômeros

- Ao se avaliar a trabalhabilidade do ligante asfáltico modificado com fíleres alternativos, embora se tenha concluído que o ideal é se trabalhar com o percentual em volume, determinou-se como ideal, por satisfazer a todos os fíleres estudados, que o percentual de adição em peso deveria ser no máximo igual a 20% em relação ao peso do CAP usado. Percentuais de adição de fíler inferiores ou iguais a 20% em peso garantiram a homogeneidade da mistura evitando a separação de fases ou sedimentação das partículas de fíleres, em especial a do fíler RMF devido à sua elevada densidade real. Além disso, as temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas devem ser e foram inferiores à temperatura de oxidação excessiva e envelhecimento do CAP 50/70 usado no estudo.

- De forma geral, os ligantes modificados com fíleres convencionais e alternativos apresentaram melhoria das propriedades físicas antes e após o envelhecimento RTFOT em relação ao CAP 50/70. Estatisticamente, os aumentos da consistência foram atribuídos ao teor de material fíler adicionado e não ao tipo ou natureza do fíler. Os aumentos da consistência podem contribuir para a diminuição da ocorrência de trilha de roda em condições de elevadas temperaturas. Entretanto, o seu aumento excessivo favorece ao trincamento por fadiga nas frequências de carregamento elevadas e a baixas temperaturas.
- O asfalto borracha constituído de composto de borracha CB apresentou o mesmo padrão de comportamento reológico em relação ao asfalto borracha AB-8, especificado pelo enrijecimento por meio do aumento do módulo de cisalhamento dinâmico, diminuição do ângulo de fase, aumento da recuperação elástica e diminuição da compliance não recuperável a baixas temperaturas, podendo contribuir assim, para a diminuição das deformações permanentes.
- O comportamento reológico dos asfaltos modificados com fíleres apresentaram variações significativas ao serem comparados com o CAP 50/70. Entretanto, observou-se pouco enrijecimento dos ligantes modificados com a elevação de teores de RMF, enquanto que os ligantes asfálticos com adição dos lodos de ETA apresentam maiores variações, e a cal que é o fíler de referência, apresentou valores intermediários com respeito às amostras de estudo. Contudo não influenciam negativamente no desempenho de vida de fadiga ao se compararem com o ligante de referência, obtendo ganhos na vida de fadiga, devido às diminuições das compliances não recuperáveis em relação ao CAP 50/70 puro.

#### Desempenho de misturas asfálticas CBUQ e CPA com adição de asfaltos modificados com adição de fíleres e elastômeros

- A presença da borracha no ligante asfáltico da forma AB8 diminui a coesão entre os agregados das misturas asfálticas do tipo CBUQ e CPA. No entanto, as diminuições da coesão entre partículas podem ser minimizadas nas misturas CBUQ ao se adicionar cal virgem sobre a superfície da borracha gerando o composto de borracha aqui intitulado AB CP e utilizando uma energia de compactação elevada de 75 golpes por fase. As misturas asfálticas CPA com a incorporação do composto de borracha AB CB, compactadas numa energia de 50 golpes por fase, apresentaram uma perda da coesão maior do que às misturas

com o ligante AB8. Tal comportamento se deve certamente ao consumo do CAP em interações com a própria cal escasseando-o nas ligações entre agregados.

- A incorporação dos materiais fíleres alternativos RMF e lodo de ETA ao CAP 50/70 e posteriormente nas misturas asfálticas CBUQ e CPA produz um aumento no desempenho mecânico em termos da resistência à tração, estabilidade Marshall, deformação permanente avaliada por meio do *creep* estático e vida de fadiga em referência às amostras com o CAP 50/70 puro, apresentando um padrão de comportamento entre os ensaios de caracterização mecânica. Entretanto, as misturas CBUQ e CPA com ligantes modificados com materiais fíleres apresentaram maior desgaste à abrasão Cântabro em relação às misturas confeccionadas com CAP 50/70 puro, fato atribuído à diminuição do teor efetivo de CAP 50/70 pela incorporação dos materiais fíleres. Comparativamente o ligante contendo o fíler de referência cal mostrou-se superior na determinação dos parâmetros nos ensaios submetidos de carga estática e dinâmica em relação ao CAP 50/70 puro e em relação aos ligantes contendo os fíleres RMF e lodo de ETA. Enquanto que as misturas com lodos de ETA, RMF apresentaram maior desempenho à ação da carga monotônica em referência às misturas com cal, maior ainda nas misturas de referência com CAP 50/70.
- Pode-se concluir que tecnicamente a utilização dos Rejeitos de Minério de Ferro e os lodos de ETA no concreto Betuminoso CBUQ e CPA na forma proposta é viável e permite a disposição segura dos resíduos. Enquanto que a técnica do asfalto borracha na forma de composto de borracha AB CB 22 permite atingir o mesmo comportamento mecânico, diminuído a temperatura de aquecimento do ligante asfáltico na ordem de 10 °C em relação a ao ligante asfáltico AB8.

## 6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A fim de dar continuidade ao estudo da disposição final dos resíduos sólidos Rejeito de Minério de Ferro (RMF), lodos das Estações de Tratamento de água ETA e borracha provenientes dos pneus usados nos ligantes asfálticos, são apresentadas a seguir algumas sugestões para futuras pesquisas:



- Aprofundar o estudo para definição do tempo e temperatura ideais de mistura entre o ligante asfáltico CAP 50/70 e os materiais alternativos;
- Estudar as características físicas e reológicas do CAP 50/70 originadas pelo efeito do aquecimento no tempo quando da incorporação dos materiais alternativos;
- Estudar as características físicas e reológicas dos asfaltos modificados com materiais alternativos após o envelhecimento a longo prazo no *Pressure Aging Vessel* PAV.
- Estabelecer uma proposta para a determinação das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas baseada na interação fíler-ligante asfáltico;
- Realizar análises microscópicas e tomográficas para a determinação da separação de fases nos ligantes modificados com materiais alternativos;
- Avaliar o uso de fíleres compostos por misturas de cal e RMF e lodo de ETA devido às similaridades das formas das partículas dos materiais alternativos RMF e lodo de ETA e agregações;
- Realizar estudos de misturas contendo lodo de estação de tratamento de esgoto (lodo de ETE) devido a sua relevância ambiental e possibilidade de melhoria do comportamento das misturas e/ou disposição segura desses resíduos.

Para a continuidade dos estudos das misturas asfálticas com ligantes modificados com materiais alternativos, seguem algumas sugestões para pesquisas futuras:

- Estudar a vida de fadiga de misturas asfálticas em corpos prismáticos conduzidos no equipamento de fadiga à flexão quatro pontos;
- Estudar a deformação permanente através de simuladores de tráfego em laboratório;
- Realizar análise mecânica e avaliação econômica de estruturas de pavimentos flexíveis considerando revestimentos asfálticos com adição dos materiais alternativos;
- Realizar e instrumentar trechos experimentais em grande e média escala de estruturas de pavimentos considerando revestimento asfálticos com adição de materiais alternativos, a fim de conhecer as características mecânicas e funcionais em condições reais.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO- American Association of State Highway and Transportation (2014) TP-101 - Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep.
- AASHTO–Americam Association of State Hignway and Transportation Officials. Society for Testing Materiais. AASHTO T 283: *Resistance of compacted Bituminous Misture to Moisture Induced Damage*.
- ABU-EISHAH, S.I., DIEB, A.S. & BEDIR, M.S. (2012). Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the arabian gulf region. *Journal construction and building materials*, 34: 249–256.
- ADORJÁNYI, K. & FULEKI, P. (2011). Performance evaluation of bitumens at high temperature with multiple stress creep recovery test. *Hungarian journal of indústrial chemistry veszprém*, 39(2): 195–199.
- ALENCAR, A.E., BRINGEL, R.M., SOARES, J.B. & SOARES, S.A. (2006). Efeito da presença de aditivos nas propriedades reológicas do ligante asfáltico modificado por EVA. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás IBP 18 Encontro do Asfalto.
- ALLEN, R.G., LITTLE, D.N. & BHASIN, A. (2012). Structural characterization of micromechanical properties in asphalt using atomic force microscopy. *Journal of materials in civil engineering. Mater*, 24(10): 1317–1327.
- ANIP - Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. Resultados dos fabricantes nacionais de pneus 3º semestre de 2016. Disponível em: <[http://www.anip.com.br/arquivos/infografico\\_anip\\_3tri\\_2016.pdf](http://www.anip.com.br/arquivos/infografico_anip_3tri_2016.pdf)>. Acesso em: 28 de janeiro de 2017.
- ANDERSON, D.A., CHRISTENSE, D.W., BAHIA, H.U., DONGRE, R., SHARMA, M.G., ANTLE, C.E. & BUTTON, J. (1994). Binder characterization and evaluation Volume 3 : Physical C haracterization SHRP-A-369.
- ANDRADRE, L.C., MARQUES, E.A. & PEIXOTO, R.A. (2016). Perspectivas para o reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro como materiais de construção 12: 32–44.
- ANGELO, J.A. (2009). The relationship of the mscr test to rutting. *Road Mater. Pavement Des.*, (September 2014): 61–80.
- ANTE, J.R. (2016). Desempenho de misturas asfálticas reforçadas com geosintéticos. Tese de doutorado, UNB, Brasília, DF, 193 p.
- ARAÚJO, J.L. (2009). Características funcionais e mecânicas de misturas asfálticas para revestimento de pavimentos aeroportuários. Dissertação de mestrado, UNB, Brasília, DF, 140 p.
- ASPHALT INSITUTE (2007). *The Asphalt Handbook. MS-4 Seventh Edition*. USA. 788p.
- ASPHALT MAGAZINE (2014). *The Magazine of the Asphalt Institute*. 29(3): 13-17.
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2007) C 127 – Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2009) C 128 – Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregates.
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2013) C 1252 – Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture and Grading).
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2011) D 2041 – Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2009) D 2419 – Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate.
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2012) D 2872 - Standard Test Method for Effect of

- Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (RollingThin-Film Oven Test).
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2015) D 4402 – Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer.
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2010) D 4791 – Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate.
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2009) D 6114 – Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder. American Society for Testing Materials.
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2010) D 7460 – Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending
- BAHIA, H.S. & DAVIES, R. (1994). Effect of crumb rubber modifiers (CRM) on performance-related properties of asphalt binders. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 63(1): 414–438.
- BAHIA, H.U., HANSON, D.I., ZENG, M., ZHAIN, H., KHATRI, M.A. & ANDERSON, M.R. (2001). NCHRP Report 459, Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design. Prepared for the National Cooperative Highway Research Program.
- BARDINI, V.S. (2013). Influência do fíler mineral em propriedades de misturas asfálticas densas. Tese de doutorado, USP, São Carlos, SP, 254 p.
- BARDINI, V.S., KLINSKY, L.M. & FERNANDES, J.L. (2013). A importância do fíler para o bom desempenho de misturas asfálticas. *Minerva pesquisa e tecnologia*, 7(1): 71–78.
- BARDINI, V.S., KLINSKY, L.M., JÚNIOR, J.L. & ROQUE, R. (2012). Influência do fíler mineral no comportamento reológico de mástiques asfálticos. *Transportes*, 20(3): 19–26.
- BEDNARIK, V., VONDRUSKA, M., SILD, M. & KOUTNY, M. (2004). Stabilization/solidification of wastewater treatment sludge. *Journal of Environmental Engineering*. ASCE 130: 1527-1533.
- BERNUCCI, L.B., AUGUSTO, J., CERATTI, P. & SOARES, J.B. (2008). Pavimentação asfáltica - Formação básica para engenheiros. ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, 3 vol., 504 p.
- BOLDEN, J., ABU-LEBDEH, T. & FINI, E. (2013). Utilization of recycled and waste materials in various construction applications. *American Journal of Environmental Science* 9(1): 14–24.
- BOCK, A.L. (2012) Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfáltico elaborados com ligante convencional e modificado. Dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RGS, 143 p.
- BRINGEL, R.M. (2007). Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos. Dissertação de mestrado, UFC, Fortaleza, CE, 174 p.
- BRINGEL, R.M., ALENCAR, A.E., COSTA, F.M., SOARES, J.B. & SOARES, S.A. (2008). Análise dos parâmetros reológicos através das curvas mestras do ligante asfáltico modificado por SBS e EVA. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP 19 Encontro Asf.
- CALLAI, S.C. (2011). Estudo do ruído causado pelo tráfego de veículos em rodovias com diferentes tipos de revestimentos de pavimentos. Dissertação de mestrado, USP, São Paulo, SP, 93 p.
- CAMARGO, F.F. (2016). Field and Laboratory Performance Evaluation of a Field-Blended Rubber Asphalt. Tese de doutorado, EPUSP, São Paulo, SP, 161 p.
- CAMARGO, F.F. & BERNUCCI, L. (2017). Case history study : field monitoring and performance prediction of a field-blended rubber asphalt mixture in brazil. *International journal of pavement engineering*, 1–11.
- CAMPANHA, A. (2011). Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação. Dissertação de mestrado, UFV, Viçosa, MG, 86 p.
- CAMPILLO, J.R.M. (2014). Properties of Activated Crumb Rubber binders. Thesis of master of science, Arizona State University, Arizona, 140 p.
- CARRASCO, E.V.M., MAGALHAES, M.D.C., SANTOS, W.J.D., ALVES, R.C. & MANTILLA, J.N.R. (2017). Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests. *Journal construction and building materials*, 131: 31–38.

- CARVALHO, M.A. (2014). Estudo numérico e analítico de modelos reológicos unidimensionais viscoelásticos, elastoplásticos e viscoplásticos. Dissertação de mestrado, UNB, Brasília, DF, 116 p.
- CASAGRANDE, M.D.T., VALE, D.C., NETO, S.A. & SOARES, J.B. (2007). Estudo da aplicabilidade de borra asfáltica como material para pavimentos de baixo volume de tráfego. XIII Congresso Chileno de Ingeniería de Transportes, Santiago de Chile, Chile, 1:1-10.
- CERATTI, J.A., BERNUCCI, L.B., SOARES, J.B. (2015). Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação. ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, 1 vol., 144 p.
- CHANDRA, S. & CHOUDHARY, R. (2013). Performance characteristics of bituminous concrete with industrial wastes as filler. *Journal of materials in civil engineering*, 25(11): 1666–1673.
- CHEN, J. & PENG, C. (1998). Analyses of tensile failure properties of asphalt-mineral filler mastics. *Journal of materials in civil engineering*, 10(11): 256–262.
- CLOPOTEL, C.S. & BAHIA, H.U. (2012). Importance of elastic recovery in the dsr for binders and mastics. *Engineering journal*, 16(4): 99–106.
- CNT. (2016). Pesquisa CNT de rodovias 2016 - Relatório gerencial. Confederação Nacional de Transportes, Brasília, DF, 396 p.
- CORBETT, L.W. (1969). Composition of asphalt based on generic fractionation, using solvent deasphalting, elution-adsorption chromatography, and densimetric characterization. *Analytical chemistry*, 41(4): 576–579.
- COSTA, A.J. (2011). Análise de viabilidade da utilização de lodo de ETA coagulado com Cloreto de Polialumínio (PAC) composto com areia como agregado miúdo em concreto para recomposição de calçadas – Estudo de caso na ETA do município de Mirassol-SP. Dissertação de mestrado, USP, São Carlos, SP, 155 p.
- COSTA, A.V. (2009). Utilização do rejeito de sinter feed como agregado na produção de peças de concreto para pavimentação. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG, 156 p.
- DANTAS, A.A. (2015). Caracterização de resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro para uso em pavimentação. Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, RN, 88 p.
- DAS, S.K., KUMAR, S. & RAMACHANDRARAO, P. (2000). Exploitation of iron ore tailing for the development of ceramic tiles. *Waste Management*, 20(8): 725–729.
- DAVIS, C. & CASTORENA, C. (2015). Implications of physico chemical interactions in asphalt mastics on asphalt microstructure. *Journal construction and building materials*, 94: 83–89.
- DELGADO, J.V. (2016). Avaliação da aplicação do lodo da ETA Guandu na pavimentação como disposição final ambientalmente adequada. Dissertação de mestrado, COPPE UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 132 p.
- DIAS, M.R. (2005). Utilização de mistura asfáltica com borracha pelo processo da via-seca - execução de um techo experimental urbano em Porto Alegre - RS. Dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS, 135 p.
- DNIT 078 (1994). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso – Método de ensaio.
- DNIT 081 (1994). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo – Método de ensaio.
- DNIT 084 (1994). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real – Método de ensaio.
- DNIT 086 (1994). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Agregado – determinação do índice de forma.
- DNIT 089 (1994). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio – Método de ensaio.
- DNIT 133 (1994). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência.

- DNIT 138 (1994). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Misturas betuminosas-determinação da resistência à tração por compressão diametral.
- DNIT 043 (1995). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall.
- DNIT 084 (1995). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Agregado miúdo-determinação da densidade real – Método de ensaio.
- DNIT 193 (1996). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Materiais betuminosos líquidos e semissólidos – determinação da densidade – Método de ensaio.
- DNIT 054 (1997). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Equivalente de areia.
- DNIT 367 (1997). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Material de enchimento para misturas betuminosas – Especificação de material.
- DNIT 035(1998). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Agregados-determinação da abrasão Los Angeles.
- DNIT 083 (1998). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Agregados-análise granulométrica.
- DNIT 383 (1999). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro. Método de ensaio.
- DNIT 031 (2006). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Pavimentos flexíveis concreto asfáltico – Especificação de Serviço.
- DNIT 095 (2006). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Cimentos asfálticos de petróleo – especificação de material.
- DNIT 111 (2009). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de material.
- DNIT 128 (2010). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Emulsões asfálticas catiônicas modificadas por polímeros elastômeros especificação de material.
- DNIT 145 (2012). Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. Pintura de ligação com ligante asfáltico – especificação de serviço.
- DOMINGOS, M.D. & FAXINA, A.L. (2012). Comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados com copolímero sbr e ácido polifosfórico. Transportes da ANPET.
- DOMINGOS, M.D. & FAXINA, A.L. (2015). Ensaio MSCR segundo as normas ASTM D 7405-10a e AASHTO T350-14 um estudo de caso envolvendo ligantes asfalto-borracha. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa e ensino em Transportes da ANPET, (1): 13–24.
- DOMINGOS, M.D., YAN, A.K. & FAXINA, A.L. (2014). Comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos com polietileno de baixa densidade e ácido polifosfórico. XXVIII Congresso Nacional de Pesquisa e ensino em Transportes da ANPET, (1): 1–10.
- DONGRÉ, R. & ANGELO, J. (2003). Refinement of superpave high-temperature binder specification based on pavement performance in the accelerated loading facility. Transportation Research Record, 1829(3): 39–46.
- FARIA, J.S. (2015). Incorporação de resíduo pó de borracha de pneus inservíveis em cerâmica vermelha. Dissertação de mestrado, UENF, Fluminense, RJ, 137 p.
- FERNANDES, G. (2005). Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com a Utilização de Solos Finos e/ou Resíduo de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos. Tese de doutorado, UNB, Brasília, DF, 213 p.
- FERNANDES, P.R. (2011). Avaliação do desempenho de ligante asfáltico modificado por poli (ácido fosfórico) (PPA) e efeitos da adição do líquido da casca da castanha de caju (LCC). Dissertação de mestrado, UFC, Fortaleza, CE, 146 p.
- FONTES, C.M. (2003). Potencialidades da cinza de lodos de estações de tratamento de esgotos como

- material suplementar para a produção de concretos com cimento portland. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 120 p.
- FONTES, C.M. (2008). Utilização de cinzas de lodo de esgoto e de resíduo sólido urbano em concretos de alto desempenho. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 273 p.
- FYTILI, D. & ZABANIOTOU, A. (2008). Utilization of sewage sludge in eu application of old and new methods — Areview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12: 116–140.
- GERALDO, R.H., FERNANDES, L.F.R. & CAMARINI, G. (2017). Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production. *Journal of clean production*. Accerted Manuscript.
- GHASEMI, M. & MARANDI, S.M. (2013). Performance improvement of a crumb rubber modified bitumen using recycled glass powder. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 14(11): 805–814.
- GOH, S.W., AKIN, M., YOU, Z. & XIANMING, S. (2011). Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro- or nano-modified asphalt mixture. *Jorunal construction and building materials*, 25(1): 195–200.
- GOLALIPOUR, A. (2011). Modification of Multiple Stress Creep and Recovery Test Procedure and Usage in Specification. Thesis of master o science, Uniwvversity of Wisconsin, Madison, 106 p.
- GONÇALVES, F., SOUSA, C.H., TAHIRA, F.S., FERNANDES, F. & TEIXEIRA, R.S. (2016). Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. *Resita DAE*: 5–14.
- GOUVEIA, F. (2013). Efeito da adição de filer gesso nas propriedades dos ligantes asfálticos e concretos asfálticos. Tese de doutorado, UNB, Brasília, DF, 159 p.
- GUERRA, A.N. (2014). Caraterização e utilização de rejeito de minério de ferro pellet feed em pavimentos de blocos intertravados de concreto. Dissertação de mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG, 103 p.
- GUIMARÃES, J.M. (2012). Concreto asfáltico drenante em asfaltos modificados por polímeros SBS e Borracha moída de pneus. Dissertação de mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, 132 p.
- HENRIQUE, J. & PINHEIRO, M. (2005). Caracterização de misturas asfálticas com borracha produzidas pelos processos úmido e seco.
- HIDALGO, A.M., MURCIA, M.D., GÓMES, E., GARCÍA, C. & SOLANO, C. (2016). Possible uses for sludge from drinking water treatment plants. *Journal of Environmental Engineering*, 143(3): 1–7.
- HOMEM, T.R. (2002). Comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras. UFRGS, Porto Alegre, RS, 100 p.
- INSTITUTE, A. (2010). Implementation of the multiple stress creep recovery test.
- JOHNSON, C.M. (2010). Estimating asphalt binder fatigue resistance using an accelerated test method. Dissertation of Doctor or Philosophy. University of Wisconsin, Madison, 145 p.
- JONES, D.R. & KENNEDY, T.W. (1991). The asphalt model: results of the SHPR asphalt research program.
- KATAYAMA, V.T. (2012). Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica. Dissertação de mestrado, ESUSP, São Paulo, SP, 144 p.
- KHATTAB, M.J., KHATTAB, A., RIZVI, H.R. & ZHANG, P. (2012). The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology. *Journal construction and building materials*, 30: 257–264.
- KURANCHIE, F.A. (2015). Characterisation and Applications of Iron Ore Tailings in Building and Construction Projects. Tehsis of Doctor of Philosophy, University of Cowam, Australia, 200 p.
- LAGO, R.M., GOMES, J.P., SANTOS, E.J., COSTA, L.C. & CHAVES, L.E. (2017). Pirólise de resíduos de borrachas do setor de mineração para a produção de combustíveis: estudos em escala piloto. *Polímeros*, 27: 42–47.
- LEITE, L.F.M. (1999). Estudo de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero. Tese de doutorado, IMA/UFRG, Rio de Janeiro, RJ. 266 p.
- LESUEUR, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in colloid and interface science*, 145: 42–82.

- LESUEUR, D., PETIT, J., RITTER, H-J. (2013). The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: a state of the arte review. *Road Materials and Pavement Design*, 14(1):1-16.
- LESUEUR, D., DENAYER, C., RITTER, H-J., KUNESCH, C., GASIOROWSKI, S. & ALTO, A. (2016). The used hydrated lime in the formulation of asphalt mixtures: European case studies. mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: a state of the arte review. 6<sup>th</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress, 1:1-10.
- LI, R., XIAO, F., AMIRKHANIAN, S., YOU, Z. & HUANG, J. (2017). Developments of nano materials and technologies on asphalt materials – a review. *Jornal construction and building materials*, 143: 633–648.
- LIMA, C.S. (2008). Caracterização de ligante asfálticos modificados com borracha de pneu e aditivo. Dissertação de mestrado, UFC, Fortaleza, CE, 159 p.
- LIN, C.-F., WU, C.H. & HO, H.M. (2006). Recovery of municipal waste incineration bottom ash and water treatment sludge to water permeable pavement materials. *Waste Management*, 26: 970–978.
- LIU, L., XIAO, F., ZHANG, H. & AMIRKHANIAN, S. (2017). Rheological characteristics of alternative modified binders. *Journal construction and building materials*, 144: 442–450.
- LUCENA. (2012). Estudo da aplicação da mistura solo-lodo em base e subbase de pavimentos. Tese de doutorado, UFPE, Recife, PE, 263 p.
- LUCENA, M.C.C. (2005). Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros. Tese de doutorado, UFC, Fortaleza, CE, 163 p.
- MALKIN, A.Y. & ISAYEV, A.I. (2017). Rheology concept, methods, and applications. Published, Chemtec Publishing, CP, Toronto, Canada, 3<sup>rd</sup> Edition, 501 p.
- MALLICK, K., KANDHAL, P.S., COOLEY, L. & WATSON, D. (2000). Design , construction , and performance of new- generation open-graded. National Center for Asphalt Technology NCAT, Report 00-01, Nevada, 26 p.
- MALLICK, R.B. & EL-KORCHI, T. (2013). Pavement engineering: principles and practice. Taylor & Francis Group, Second Edition, 659 p.
- MARTINEZ, J.G. (2014). Avaliação de desempenho de misturas betuminosas com adição de lodos de ETA e de ETE. Dissertação de mestrado, UNB, Brasília, DF, 91 p.
- MASOUDI, S., ABTAHI, S. & GOLI, A. (2017). Evaluation of electric arc furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging. *Journal construction and building materials*, 135: 260–266.
- MEDINA, J. & MOTTA, L.M. (2015). Mecânica dos pavimentos. INTERCIÊNCIA, Rio de Janeiro, RJ, 3 vol., 638 p.
- MELLO, L.G. (2008). A teoria do dano em meio contínuo no estudo da fadiga em misturas asfálticas. Tese de doutorado, UNB, Brasília, DF, 263 p.
- MELO, J.V. (2014). Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos. Tese de doutorado, UFSC, Florianópolis, SC, 414 p.
- MOIZINHO, J.C. (2007) Caracterização e uso de agregados lateríticos do distrito federal e do estado de Roraima em CBUQ. Tese de doutorado, UNB, Brasília, DF, 288 p.
- MODARRES, A. & RAHMANZADEH, M. (2014). Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt. *Journal construction and building materials*, 66: 476–483.
- MORENO, A.F. (2015). Caracterização reológica de mastiques betuminosos. Dissertação de mestrado, UNL, Lisboa, Portugal, 147 p.
- MUNIANDY, R., ABURKABA, E. & TAHA, R. (2013). Effect of mineral filler type and particle size on the engineering properties of stone mastic asphalt pavements. *TJER*, 10(2): 13–32.
- NASCIMENTO, T.C.B. (2015). Efeito dos envelhecimentos termo-oxidativo e foto-oxidativo sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados. Dissertação de mestrado, USP, São Carlos,

- SP, 274 p.
- NASSAR, A.I., KHASHAA, M., THOM, N. & PARRY, T. (2016). Mechanical , durability and microstructure properties of Cold Asphalt Emulsion Mixtures with different types of filler. *Journal construction and building materials*, 114: 352-363.
- NERY, J., SILVA, S.N., SILVA, G.C. MENDES, J.C., PEIXOTO, R.A. (2017). Technical and environmental feasibility of interlocking concrete pavers with iron ore tailings from tailings dams. *Journal of materials in civil engineering*, 29(9): 1–6.
- NETO, S.A. (2004) Avaliação das propriedades dos ligantes e das misturas asfálticas modificados com borracha granulada de pneus usados. Tese de doutorado, UNB, Brasília, DF, 265 p.
- NGUYEN, V.H. (2009). Methods and RAP materials on performance of hot recycled asphalt mixtures . Thesis of Doctor of Philosophy, University of Nottingham, United Kingdom, China, Malaysia, 227 p.
- NUNES, L.C. (2017). Geração, Fadiga de misturas asfálticas descontínuas com asfalto-borracha de 4 geração. Dissertação de mestrado, UNB, Brasília, DF, 161 p.
- NUÑEZ, J.Y. (2013). Caracterização à fadiga de ligantes asfálticos modificados envelhecidos a curto e longo prazo. Dissertação de mestrado, USP, São Carlos, SP, 139 p.
- NÚÑEZ, W.P., CERATTI, J.A.R., PERACA, V., TSUKUDA, R.S. (2007). Produzindo misturas asfálticas de elevado desempenho com emprego de cal hidratada. ABPv - 38ª Reunião Anual de Pavimentação - Manaus, 15p.
- OLIVEIRA, A.G. (2014). Estudo das propriedades mecânicas do lodo têxtil para fins de utilização em pavimentos rodoviários. Dissertação de mestrado, UFCG, Campina Grande, PB, 113 p.
- OLIVEIRA, A.H. (2015). Avaliação do potencial anti oxidante do Líquido da Castanha de Caju (LCC) para materiais asfálticos através de diferentes métodos de envelhecimento. Dissertação de mestrado, UFC, Fortaleza, CE, 145 p.
- OLIVEIRA, C.A. (2003). Estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto asfáltico drenante. Dissertação de mestrado, UNB, Brasília, DF, 104 p.
- OLIVEIRA, I.Y. & RONDON, O.C. (2016). Diagnóstico da gestão de lodo de estação de tratamento de água em Mato Grosso do Sul. *Interações*, Campo Grande, MS, 17(4): 687–698.
- PEREIRA, A.I. (2014). Caracterização reológica e avaliação da resistência à fadiga de betumes com o reómetro de corte dinâmico. Dissertação de mestrado, UNL, Lisboa, Portugal, 141 p.
- QIAN, G., BAI, S., JU, S. & HUANG, T. (2013). Laboratory evaluation on recycling waste phosphorus slag as the mineral filler in hot-mix asphalt. *Journal of materials in civil engineering*, 25(7): 846–850.
- RADZISZEWSKI, P., PILAT, J., SARNOWSKI, M., KOWALSKI, K.J., KRÓL, J. & KRUPA, Z. (2012). Asphalt rubber as an alternative of polymer modified bitumen. *AR2012*, 1: 1–13.
- RIBEIRO, E.A. (2011). O efeito da modificação de ligante asfáltico com o Líquido da Castanha de Caju (LCC) na resistência ao dano por umidade em misturas asfálticas. Dissertação de mestrado, UFC, Fortaleza, CE, 158 p.
- RODRIGUES, F.O. (2010). Efeito do Líquido da Castanha do Caju (LCC) nas propriedades reológicas do ligante asfáltico modificado por SBS. Dissertação de mestrado, UFC, Fortaleza, CE, 114 p.
- RONDÓN, H., MORENO, L., RODRÍGUEZ, D. & LEE, J. (2008). Experiencias sobre el estudio de materiales alternativos para modificar asfaltos. *Revista Ingenieria*, Colombia, 14(2): 19–33.
- RONDÓN, H.. & REYES, F.A. (2012). Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con asfaltita. *Revista Ingeniería Universidad de los Andres*, 36: 12–19.
- RONDÓN, H.A.Q. & REYES, F.A.L. (2015). Pavimentos, materiales, construcción y diseño. *ECOEDICIONES*, Bogota, Colombia, 1 vol., 608 p.
- RONDÓN, H.A.Q., HERNÁNDEZ, J.A. & URAZÁN, C.F.B. (2015-a). Behavior of gilsonite-modified hot mix asphalt by wet and dry processes. *Journal of materials in civil engineering*, : 1–8.
- ROSENO, J.L. (2005). Avaliação de uma mistura asfáltica porosa com agregados calcários e asfalto-borracha. Dissertação de mestrado, UNB, Brasília, DF, 149 p.



- SARAIVA, S.L. (2006). Metodologia e análise experimental do comportamento geotécnico da estrutura de pavimentos rodoviários. Dissertação de mestrado, UFOP, Ouro Preto, MG, 143 p.
- SILVA, J.F. (2008). Comportamento de concreto asfáltico tendo como lodo de ETA da cidade de Manaus como filer. Dissertação de mestrado, UFAM, Manaus, 180 p.
- SILVA, R. (2010). Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro. Dissertação de mestrado, UFOP, Ouro Preto, MG, 132 p.
- SINISTERRA, F.Q. (2014). Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas. Tese de doutorado, UnB, Brasília, DF, 183 p.
- SOBREIRO, F.P. (2014). Efeito da adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímero SBS. Tese de doutorado, USP, São Carlos, SP, 252 p.
- SOSA, E. (2016). Caracterização e aproveitamento dos rejeitos oriundos de processos hidrometalúrgicos do níquel e cobalto com um enfoque geoambiental. Tese de doutorado, UNB, Brasília, DF, 193 p.
- SOUSA, J.B., VOROBIEV, E.A., ISHAI, I. & SVECCHINSKY, G. (2012). Elastomeric Asphalt Extender – A New Frontier on Asphalt Rubber Mixes. Asphalt Rubber 2012 – Proceedings, Munich, Germany, 2012, p. 161-181.
- SOUZA, L.J. (2012). Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com cimento asfáltico de petróleo modificado com óleo de mamona. Dissertação de mestrado, UFCG, Campina Grande, PB, 110p.
- SOUZA, M.V. (2010). Efeito de fibras sintéticas nas propriedades de ligantes e concretos asfálticos. Dissertação de mestrado, UNB, Brasília, DF, 150 p.
- SUKSIRIPATTANAPONG, C., HORPIBULSUK, S., CHANPRASERT, P. & SUKMAK, P. (2015). Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge. Journal construction and building materials, 82: 20–30.
- TAFAREL, N.F., MACIOSKI, G., CARVALHO, K., NAGALLI, A., FREITAS, D.C. & PASSIG, F.H. (2016). Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água. Revista Materia, 21(4): 974–986.
- TAHA, R., AL-RAWAS, A., AL-HARTHY, A. & QATAN, A. (2002). Use of cement bypass dust as filler in asphalt concrete mixtures. Journal of materials in civil engineering, 14(4): 338–343.
- VALE, A.C. (2007). Estudo laboratorial da viabilidade do uso de fibras de coco em misturas asfálticas do tipo SMA. Dissertação de mestrado, UFC, Fortaleza, CE, 125 p.
- WANG, M.C., HULL, J.Q., JAO, M., DEMPSEY, B.A. & CORNWELL, D.A. (1993). Engineering behavior of water treatment sludge. Journal of environmental engineering, 118(6): 848–864.
- WANG, S., CHENG, D. & XIAO, F. (2017). Recent developments in the application of chemical approaches to rubberized asphalt. Journal construction and building materials, 131: 101–113.
- WAY, G.B. (2012). Asphalt-rubber 45 years of progress. Asphalt Rubber 2012.
- WITCZAK, M.W. & FULTON, I.A. (2004). Development of a master curve ( $G^*$ ) database for lime modified asphaltic mixtures. Arizona State University Research Report, Tempe, Arizona, USA.
- WU, C., SOUSA, J.B., LI, A. & ZHAO, Z. (2012). Activated Minerals as Binder Stabilizers in Middle Course's Asphalt Concrete Paving Mixtures. 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.
- WU, S., ZHU, J., ZHONG, J. & WANG, D. (2011). Experimental investigation on related properties of asphalt mastic containing recycled red brick powder. Journal construction and building materials, 25(6): 2883–2887.
- YANG, J. & TIGHE, S. (2013). A review of advances of nanotechnology in asphalt mixtures. 13th COTA International Conference of Transportation Professionals CICTP 2013. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 96:1269–1276.
- Wang, S., Cheng, D. & Xiao, F. (2017). Recent developments in the application of chemical approaches to rubberized asphalt. Journal construction and building materials, 131: 101–113.

- YAO, H., YOU, Z., LI, L., LEE, C.H., WINDGARD, D., YAP, Y.K. & SHI, X. (2012). Properties and chemical bonding of asphalt and asphalt mistures modified with nanosilica. *Journal of materials in civil engineering*, Accepted manuscript.
- YI-QIU, T., LI, Z., ZHANG, X.Y. & DONG, Z.J. (2010). Research on high- and low-temperature properties of asphalt-mineral filler mastic. *Journal of materials in civil engineering*, 22(8): 811–819.
- YOU, Z., MILLS-BEALE, J., FOLEY, J.M., ROY, S., ODEGARD, G.M., DAI, Q. & GOH, S.W. (2011). Nanoclay-modified asphalt materials: preparation and characterization. *Journal construction and building materials*, 25(2): 1072–1078.
- YUSSOF, M.I., BREEM, A.A., ALATTUG, H.N.M., HAMIM, A. & AHMAD, J. (2014). The effects of moisture susceptibility and ageing conditions on nano-silica / polymer-modified asphalt mixtures. *Journal construction and building materials*, 72: 139–147.
- ZEGARA, J.R.E. (2007). Avaliação de misturas produzidas com ligantes asfálticos peruanos convencional pen 60/70 e modificados por polímero SBS I 60/60 e PG 76-22. Dissertação de mestrado, USP, São Carlos, SP, 264 p.
- ZIARI, H., FARAHANI, H., GOLI, A. & GALOORYAK, S. (2014). The investigation of the impact of carbon nano tube on bitumen and HMA performance. *Petroleum Science and Technology*, 32(17): 2102–2108.
- ZULKATI, A., DIEW, W.Y. & DELAI, D.S. (2012). Effects of fillers on properties of asphalt-concrete mixture. *Journal of transportation engineering*, 138(7): 902–910.