

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

**FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM LIGANTE E  
MISTURA ASFÁLTICA MODIFICADOS COM BORRACHA  
PRÉ-TRATADA (RAR)**

**LETÍCIA NUNES LOPES**

**ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD**  
**COORIENTADOR: LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE  
MELLO, DsC**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: 176/2022**

**BRASÍLIA / DF: AGOSTO / 2022**

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

**FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM LIGANTE E  
MISTURA ASFÁLTICA MODIFICADOS COM BORRACHA PRÉ-  
TRATADA (RAR)**

**LETÍCIA NUNES LOPES**

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA**

**APROVADA POR:**

---

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD (UnB)  
ORIENTADOR**

---

**LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELLO, DsC (UnB)  
(COORIENTADOR)**

---

**MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, DsC (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**WASHINGTON PERES NÚÑEZ, DsC (UFRGS)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

---

**LUCIANO PIVOTO SPECHT, DsC (UFMS)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 2022.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

LOPES, LETÍCIA NUNES	
Fadiga e Deformação Permanente em Ligante e Mistura Asfáltica Modificados Com Borracha Pré-Tratada (RAR), Distrito Federal, 176/2022.	
xxv, 222 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutora, Geotecnia, 2022)	
Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.	
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental	
1. Asfalto-Borracha	2. Mistura Descontínua ( <i>Gap Graded</i> )
3. Fadiga Uniaxial Cíclica	4. Módulo Complexo
5. Modelo S-VECD	6. Deformação Permanente
I. ENC/FT/UnB	II. Doutora

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LOPES, L. N. (2022). Fadiga e Deformação Permanente em Ligante e Mistura Asfáltica Modificados Com Borracha Pré-Tratada (RAR). Tese de Doutorado, Publicação 176/2022 Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 222 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Letícia Nunes Lopes

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Fadiga e Deformação Permanente em Ligante e Mistura Asfáltica Modificados Com Borracha Pré-Tratada (RAR).

GRAU / ANO: Doutora / 2022

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. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito da autora.

---

Letícia Nunes Lopes  
Brasília/DF - Brasil

*"Sonhos são coisas perigosas. A gente não decide tê-los, nem define como serão. Eles nascem por eles próprios, crescem em silêncio e espalham raízes nas nossas escolhas todas. Sem a gente perceber, os sonhos já nos são"*

***Tamara Klink***

## AGRADECIMENTOS

A Deus, ao Universo e a vida que por acasos (ou não) me levaram ao lugar certo e na hora certa, me permitindo viver esse momento de grande conquista.

Minha eterna gratidão aos meus pais, Geraldo e Nilda, por acolherem meus desassossegos. Os ensinamentos sobre os valores da simplicidade e do trabalho me fizeram confiante nesta caminhada. Ao meu irmão Fernando agradeço o apoio e as palavras de incentivo.

Ao Cleiton por ser sinônimo de positividade. O seu amor, apoio e cuidado foram essenciais nesse tempo de crescimento pessoal e profissional. Tenho muita sorte em poder caminhar e construir realidades ao seu lado.

Ao Professor Márcio Muniz por ter me aberto as portas do INFRALAB, pela confiança e por permitir que eu amadurecesse o desafio do tema de pesquisa de forma autêntica. A sua dedicação as disciplinas, sua busca permanente pela qualidade, inovação e melhoria contínua do laboratório e das nossas pesquisas são fontes de inspiração. Agradeço também a Professora Yaeko Yamashita pelo apoio, pelos conselhos e momentos de partilha.

Ao Luiz Guilherme com quem compartilhei minhas dúvidas e angústias a respeito do tema da pesquisa. Sua dedicação em aproximar o conhecimento científico acadêmico e o meio técnico motivam trabalhos como este.

A Universidade de Brasília (UnB) e ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia pelo ensino público de qualidade, e seus professores pela minha formação.

A todos que integram o INFRALAB e contribuíram direta e indiretamente para a execução da pesquisa. Aos colegas do laboratório: Isabela, Débora, Ivonne, Andrea, Luis Angel, Bia e Joaquim. De forma especial agradeço ao Marcone e ao Robinson por me apoiarem nos momentos de insucessos e dividirem as conquistas da tese. Aos técnicos: Amanda, Everton e Sanderson.

Aos professores Michéle Casagrande, Rafael Silva, Washington Núñez e Luciano Specht pelas valiosas contribuições que deram a este trabalho. De forma especial agradeço ao Professor Luciano Specht por possibilitar o meu acesso ao laboratório da UFSM. Neste sentido, estendo meus agradecimentos ao Sílvio Schuster pela disponibilidade em discutir as minhas dúvidas

quanto aos procedimentos do ensaio de fadiga tração-compressão e aplicação do modelo S-VECD.

As empresas Pedreira Contagem pela doação dos agregados e ao Grupo Betunel pela doação do ligante. Ao Dr. Jorge Sousa e a empresa portuguesa Consulpav, pela doação do material RAR.

A Professora Maria José Sales do Instituto de Química (IQ) da UnB pelos ensaios conduzidos na RAR e interpretações de resultados.

Ao Professor Richard Kim da *North Carolina State University* por ceder a licença do programa FlexPAVE 1.1.

A Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP - DF) por fomentar projetos de pesquisas no INFRALAB e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da bolsa de doutorado.

# FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM LIGANTE E MISTURA ASFÁLTICA MODIFICADOS COM BORRACHA PRÉ-TRATADA (RAR)

## RESUMO

A busca por ações ambientalmente corretas possui relação direta com o uso de materiais sustentáveis e precisa de avanços tecnológicos para que possam agregar melhorias de desempenho sem prejuízo à qualidade na pavimentação. As tecnologias de borracha granulada pré-tratada estão surgindo como um novo método para produzir misturas asfalto-borracha. Dentre estas tecnologias, a *Reacted and Activated Rubber* (RAR) foi desenvolvida com a proposta de simplificação do processo de produção (como o realizado na via seca) e obtenção de desempenho da mistura asfáltica superior (produzida pela via úmida segundo terminologia *field blend*). Esta pesquisa buscou investigar a influência da adição de RAR, na proporção de 30%, no desempenho mecânico de um ligante convencional (CAP 50/70) e de uma mistura asfáltica de granulometria descontínua usinada à quente, produzida em laboratório. Nos ligantes, a deformação permanente foi avaliada segundo o ensaio de múltipla tensão de fluência e recuperação (MSCR) e a fadiga conforme o ensaio de dano acelerado (LAS). Nas misturas, a deformação permanente foi avaliada segundo o ensaio uniaxial de carga repetida (*flow number*-FN) e para a fadiga foi implementado o ensaio uniaxial cíclico por tração/compressão. Os resultados dos ensaios de fadiga no ligante e na mistura, foram aplicados no modelo simplificado de dano contínuo viscoelástico (S-VECD) gerando as curvas característica de dano ( $CxS$ ). Nas misturas, os dados de calibração do modelo S-VECD e as propriedades viscoelásticas permitiram a simulação de uma estrutura de pavimento no programa FlexPAVE™. O ligante modificado apresentou aumento da resistência ao acúmulo de deformações permanentes e dos níveis de classificação de tráfego para todas as temperaturas, além de maior tolerância à fadiga, apresentando maior acúmulo no nível de dano na ruptura. A mistura modificada respondeu em conformidade às melhorias observadas no ligante, com maiores valores de FN e de integridade para um mesmo nível de dano acumulado. As análises no FlexPAVE™ mostraram que a adição de RAR torna o desempenho da mistura à fadiga menos dependente da espessura aplicada, apresentando baixos valores de dano médio acumulado.

# **FATIGUE AND RUTTING IN BINDER AND ASPHALT MIX WITH REACTED AND ACTIVATED RUBBER (RAR)**

## **ABSTRACT**

The search for environmentally correct actions is directly related to the use of sustainable materials and needs technological advances so that they can add performance improvements without prejudice to the quality of the pavements. The pre-treated granulated rubber technologies are emerging as a new method to produce asphalt rubber mixtures. Among these technologies, the Reacted and Activated Rubber (RAR) was developed with the proposal of simplifying the production process (as carried out in the dry process) and obtaining superior asphalt mixture's performance (produced by the wet process by field blend). This research aims to investigate the influence of the addition of RAR, in the proportion of 30%, on the mechanical performance of a conventional binder (CAP 50/70) and a gap graded hot asphalt mixture, produced in the laboratory. In the binders, the permanent deformation was evaluated according to the Multiple Stress Creep and Recovery test (MSCR) and the fatigue according to the Linear Amplitude Sweep test (LAS). In the mixtures, the permanent deformation was evaluated according to the uniaxial repeated load test (flow number-FN) and for fatigue the cyclic uniaxial tensio/compression test was implemented. The results of fatigue tests on the binder and mixture were applied to the Simplified Viscoelastic Continuum Damage (S-VECD) generating the damage characteristic curves (CxS). In the mixtures, the calibration data of the S-VECD model and the viscoelastic properties allowed the simulation of a pavement structure in the FlexPAVE™ program. The modified binder showed an increase in resistance to the accumulation of permanent deformations and in traffic classification levels for all temperatures, in addition to greater fatigue tolerance, showing greater accumulation in the level of damage at failure. The modified mixture responded in accordance with the improvements observed in the binder, with higher FN and integrity values for the same level of accumulated damage. The analysis on FlexPAVE™ showed that the addition of RAR makes the performance of the mixture to fatigue less dependent on the applied thickness, presenting low values of average accumulated damage.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>26</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>26</b>
1.1 Justificativa.....	28
1.2 Identificação do problema.....	30
1.3 Hipótese.....	31
1.4 Objetivo geral.....	31
1.5 Objetivos específicos.....	31
1.6 Estrutura do trabalho .....	32
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>34</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>34</b>
2.1 Asfalto Modificado Por Polímero (AMP).....	34
2.2 Borracha Moída de Pneu (BMP) na pavimentação.....	37
2.2.1 Composição física e química dos pneus automotivos.....	40
2.2.2 Processos de obtenção de BMP .....	42
2.2.3 Granulometrias utilizadas em misturas asfalto-borracha.....	45
2.2.4 Processos de incorporação de BMP a misturas asfálticas.....	48
2.2.4.1 Processo seco ou via seca.....	49
2.2.4.2 Processo úmido ou via úmida e suas terminologias .....	51
<b>McDonald</b> .....	<b>54</b>
<b><i>Continuous blend</i></b> .....	<b>54</b>
<b><i>Field blend</i></b> .....	<b>54</b>
<b><i>Terminal blend</i></b> .....	<b>56</b>
2.3 <i>Reacted and Activated Rubber - RAR</i> .....	57
2.4 Comportamento de materiais viscoelásticos .....	61

2.4.1	Módulo dinâmico e ângulo de fase .....	64
2.4.2	Análogos mecânicos .....	68
2.5	Fadiga em misturas asfálticas.....	70
2.5.1	Ensaio de fadiga .....	71
2.5.2	Crítérios de ruptura por fadiga.....	75
2.5.3	Modelos de fadiga.....	77
2.6	Modelo Simplificado de Dano Contínuo Viscoelástico (S-VECD).....	79
2.7	Deformação Permanente .....	88
<b>CAPÍTULO 3.....</b>		<b>94</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>94</b>
3.1	Programa experimental .....	94
3.1.1	Matriz experimental .....	96
3.2	Ensaio químico.....	96
3.2.1	Fluorescência de Raio X por Energia Dispersiva (XRF/EDX) .....	97
3.2.2	Ânalyse Térmica Gravimétrica.....	97
3.2.3	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	98
3.3	Caracterização do agregado mineral .....	98
3.4	Caracterização dos ligantes asfálticos .....	101
3.4.1	Caracterização convencional .....	103
3.4.2	Caracterização reológica de ligantes asfálticos.....	103
3.4.2.1	Classificação de desempenho PG.....	104
3.4.2.2	Módulo dinâmico e ângulo de fase.....	105
3.4.2.3	<i>Multiple Stress Creep and Recovery</i> (MSCR) .....	106
3.4.2.4	<i>Linear Amplitude Sweep</i> (LAS) .....	107
3.4.3	Programa experimental e configurações utilizadas nos ensaios dos ligantes ..	110
3.5	Dosagem das misturas asfálticas por compactação giratória .....	111

3.5.1	Parâmetros de densificação das misturas utilizando o compactador giratório	114
3.5.2	Produção das amostras após o processo de dosagem das misturas asfálticas.	116
3.6	Espessura do filme de ligante.....	118
3.6.1	Análise granulométrica da RAR por meio do granulômetro a laser .....	121
3.7	Ensaio de escorrimento da mistura asfáltica ( <i>Drain Down</i> ) .....	123
3.8	Caracterização do comportamento mecânico de misturas asfálticas .....	124
3.8.1	Dano por umidade induzida .....	124
3.8.2	Ensaio Cantabro .....	125
3.8.3	Módulo dinâmico e ângulo de fase .....	126
3.8.4	Ensaio uniaxial de carga repetida – <i>flow number</i> .....	128
3.8.5	Fadiga uniaxial cíclica (Tração/Compressão).....	130
3.9	Aplicação do Modelo S-VECD.....	135
3.10	Análise de desempenho do pavimento utilizando o programa FlexPave 1.1 .....	139
<b>CAPÍTULO 4.....</b>		<b>145</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>145</b>
4.1	Ensaio químicos.....	145
4.1.1	Fluorescência de Raio X por Energia Dispersiva (XRF/EDX) .....	145
4.1.2	Análise Térmica Gravimétrica.....	146
4.1.3	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	147
4.2	Caracterização convencional e grau PG dos ligantes asfálticos.....	149
4.3	Caracterização reológica e ensaios de desempenho dos ligantes asfálticos.....	150
4.3.1	Diagrama de espaço black .....	150
4.3.2	Módulo dinâmico e ângulo de fase .....	151
4.3.3	<i>Multiple Stress Creep and Recovery</i> (MSCR).....	154
4.3.4	<i>Linear Amplitude Sweep</i> (LAS).....	159

4.4	Dosagem por compactação giratória e parâmetros volumétricos das misturas.....	161
4.5	Espessura do filme de ligante.....	165
4.6	Ensaio de escorrimento da mistura asfáltica .....	170
4.7	Ensaio nas misturas asfálticas.....	171
4.7.1	Dano por umidade induzida .....	171
4.7.2	Ensaio Cantabro .....	174
4.7.3	Módulo dinâmico e ângulo de fase .....	176
4.7.4	Ensaio uniaxial de carga repetida – <i>flow number</i> .....	180
4.7.5	Fadiga uniaxial cíclica (Tração/Compressão).....	184
4.8	Análise de desempenho do pavimento utilizando o software FlexPave 1.1 .....	190
<b>CAPÍTULO 5.....</b>		<b>197</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....</b>	<b>197</b>
5.1	Caracterização convencional, reológica e desempenho mecânico dos ligantes asfálticos	197
5.2	Caraterização química da RAR.....	198
5.3	Teor de projeto para as misturas propostas .....	198
5.4	Desempenho mecânico das misturas.....	199
5.5	Recomendações para trabalhos futuros .....	201
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>203</b>
<b>Apêndice A: Caracterização LVE dos ligantes.....</b>		<b>214</b>
<b>Apêndice B: Amostras utilizadas e resultados dos ensaios de Dano por Umidade Induzida e Cantabro .....</b>		<b>216</b>
<b>Apêndice C: Propriedades volumétricas das amostras utilizadas nos ensaios uniaxiais.....</b>		<b>217</b>
<b>Apêndice D: Caracterização LVE das misturas.....</b>		<b>218</b>
<b>Apêndice E: Série de Prony das misturas .....</b>		<b>220</b>
<b>Apêndice F: Curvas de Wöhler obtidas segundo os dados experimentais, e por meio do critério de ruptura <math>G^R</math> e dados do modelo S-VECD .....</b>		<b>221</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Características do Asfalto Modificado por Polímero segundo a norma DNIT 129/2011 – EM.....	37
Tabela 2.2- Comparação da composição de pneus entre veículo de passeio e veículo comercial (Rahman, 2004 – Modificado) .....	40
Tabela 2.3 – Centro das faixas de distribuições granulométricas do DNIT para mistura densa (Faixa C), mistura descontínua aberta – CPA (Faixa V) e mistura descontínua densa ( <i>Gap-graded</i> ). .....	46
Tabela 2.4-Propriedades físicas dos asfaltos-borrachas segundo a ASTM D 6114/09.....	52
Tabela 2.5 - Ensaio que estabelecem parâmetros índices para qualificar os materiais e correlacionar com a deformação permanente (Beja, 2020).....	90
Tabela 2.6 - Pesquisas no Brasil que realizaram ensaios uniaxiais com configurações diferentes da proposta de Witczak <i>et al.</i> (2002) (Bastos, 2016). .....	91
Tabela 2.7 - Critérios de FN para diferentes níveis de tráfego da literatura (Faccin, 2018). .....	92
Tabela 3.1-Número de ensaios conduzidos para cada ligante e para cada mistura asfáltica. ....	96
Tabela 3.2- Propriedades ensaiadas nos agregados, normativas, especificações e valores (Nunes, 2017).....	99
Tabela 3.3- Distribuição granulométrica da mistura e faixas de limite do ADOT e DNIT. ....	100
Tabela 3.4-Ensaio de caracterização convencional dos ligantes asfálticos .....	103
Tabela 3.5-Resumo das configurações adotadas para cada ensaio realizado nos ligantes CAP 50/70 e AB-R30. ....	111
Tabela 3.6- Seleção do número de giros para o compactador SUPERPAVE (Asphalt Institute, 2007).....	112
Tabela 3.7-Temperaturas de mistura e compactação para MAC e MAB-R .....	113
Tabela 3.8-Propriedades volumétricas para misturas asfalto-borracha segundo DNIT ES 112/09. ....	114

Tabela 3.9 - Parâmetros CDI e TDI segundo Faheem & Bahia (2004). .....	115
Tabela 3.10 - Limites da curva de densificação para o .....	115
Tabela 3.11 - Corpos de provas produzidos para cada ensaio mecânico realizado. ....	116
Tabela 4.1-Resultados da caracterização convencional dos ligantes asfálticos. ....	149
Tabela 4.2-Níveis adequados de tráfego para o CAP 50/70 e para o AB-R30 segundo a classificação da norma AASTHO T350-14. ....	158
Tabela 4.3- Coeficientes obtidos do ensaio LAS para o CAP 50/70, resultados de 2 amostras. .	159
Tabela 4.4- Coeficientes obtidos do ensaio LAS para o AB-R30, resultados de 2 amostras. ....	159
Tabela 4.5-Resumo das propriedades volumétricas nos projetos de dosagem das misturas MAC e MAB-R.....	162
Tabela 4.6-Exemplo de cálculo de $TF$ considerando $SA_{Agregado}$ e $SA_{RAR-Agregado}$ para 8,0% de ligante sendo, 5,60% de CAP50/70 e 2,40% de RAR.....	166
Tabela 4.7- Exemplo de cálculo de $TF$ considerando $SA_{RAR-Ligante}$ para 8,0% de ligante sendo, 5,60% de CAP50/70 e 2,40% de RAR.....	167
Tabela 4.8-Resumo dos resultados de $SA$ e $TF$ para a etapa de dosagem das misturas asfálticas. .....	167
Tabela 4.9-Resultados de perda de massa no ensaio de escorrimento das misturas MAC e MAB- R30. ....	170
Tabela 4.10-RT e RRT da mistura de controle, MAC. ....	172
Tabela 4.11- RT e RRT da mistura modificada com RAR, MAB-R.....	172
Tabela 4.12 - Resultados do ensaio de perda de massa – Ensaio Cantabro .....	175
Tabela 4.13 - Parâmetros do modelo sigmoidal e coeficientes do fator de translação. ....	176
Tabela 4.14 - <i>Flow number</i> segundo o modelo de Francken e seus parâmetros.....	183
Tabela 4.15 - Coeficientes do ajuste da função potência para a curva característica de dano $CxS$ . .....	186
Tabela 4.16 - Valores de $G^R$ e $N_f$ para a construção da envoltória de cada mistura.....	188

Tabela 4.17- Comparação dos FAF para as curvas de fadiga segundo os dados experimentais e segundo a simulação com os dados do modelo S-VECD. ....	190
Tabela 4.18 - Valores de dano médio acumulado ou consumo de vida de fadiga, com 120 meses, para as estruturas simuladas. ....	191

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1-Partes constituintes dos pneus automotivos (modificado-Michelan, 2003). ....	42
Figura 2.2-Diferença entre a forma dos grãos da borracha obtida pelo a) processo de moagem ..	43
Figura 2.3-Resultado da BMP obtida pelo processo de redução por hidrojato (Memon <i>apud</i> LoPresti, 2013).....	44
Figura 2.4 - Comportamento visual das curvas das granulometrias para mistura densa (Faixa C), mistura descontínua aberta – CPA (Faixa V) e mistura descontínua densa ( <i>Gap-graded</i> ).....	46
Figura 2.5-Diferentes misturas asfálticas com distribuição granulométrica: a) descontínua e b) densa.....	47
Figura 2.6- Relação entre as tecnologias e terminologias na utilização de BMP como modificadora da mistura asfáltica (modificado-Epps, 1994). ....	49
Figura 2.7-Processo seco de incorporação de BMP em misturas asfálticas (Bertollo, 2002).....	49
Figura 2.8-Esquema representando a produção de ligante AB por meio do processo úmido (modificado-LoPresti, 2013). ....	53
Figura 2.9- Unidade portátil de produção de ligante AB (modificado-www.dgroadmachinery.com 2021).....	55
Figura 2.10- Constituintes da RAR a) asfalto, b) granulado de borracha e c) material de enchimento ( <i>filler</i> ) (modificado-Sousa <i>et al.</i> , 2012). ....	58
Figura 2.11- Modelo sugerido para descrever a estrutura e comportamento da RAR como modificadora do asfalto (modificado-Sousa <i>et al.</i> , 2012). ....	59
Figura 2.12- Visualização dos grânulos de RAR: a) a olho nu, b) e c) através de uma lupa com capacidade de ampliação de até 200 vezes.....	60

Figura 2.13 - Aspectos de domínios típicos de comportamento mecânico de misturas asfálticas dependendo da deformação e número de ciclos, dada uma mesma temperatura (modificado-Mangiafico, 2014).	62
Figura 2.14 - Representação esquemática das várias componentes de deformação (modificado-Sides <i>et al.</i> , 1985).	62
Figura 2.15- Comportamento de um material viscoelástico em ensaio sob solicitação harmônica (Mello, 2008).	64
Figura 2.16- Exemplo de determinação da curva mestra de misturas asfálticas para a temperatura de referência de 20°C.	67
Figura 2.17 - Representação dos modelos de Maxwell e Kelvin-Voigt.	70
Figura 2.18 - Curva de evolução do módulo complexo no ensaio de fadiga (modificado-Di Benedetto <i>et al.</i> , 2004).	72
Figura 2.19 - Principais características dos ensaios de fadiga (modificado-Di Benedetto <i>et al.</i> , 2004).	74
Figura 2.20 - (a) Esquema da solicitação e resposta de um carregamento harmônico em um material viscoelástico; (b) histerese formada pela defasagem da resposta à solicitação aplicada (Mello, 2008).	76
Figura 2.21 - (a) Exemplificação conceitual da tendência de ensaios de fadiga sob deformação controlada. (b) Número de ciclo (N) versus Módulo dinâmico Normalizado e Ângulo de fase durante os ensaios em diferentes níveis de deformação (modificado-Kim <i>et al.</i> , 2003).	77
Figura 2.22 - Curvas características de dano para diferentes misturas asfálticas (Kim, 2009).	80
Figura 2.23 - Representação esquemática para um único nível de deformação da técnica usada para verificar superposição t-T com dano crescente (modificado-Kim, 2009).	85
Figura 2.24 - Resultados dos ensaios de creep estático (FT) e creep dinâmico (FN) (Beja, 2020).	90
Figura 2.25 - Configurações do ensaio FN (modificado-Zhang <i>et al.</i> , 2013).	92
Figura 3.1- Planejamento da pesquisa.	95

Figura 3.2- Curva granulométrica adotada, limites máximo e mínimo segundo a faixa do DNIT, plotados juntamente com a curva de densidade máxima, pontos de controle e zona de restrição para o TNM de 12,5mm. ....	100
Figura 3.3-Produção de 1,5 Kg de AB-R30: a) Massa de RAR; b) Massa de ligante CAP 50/70 e c) Agitação por 10 minutos a 160°C. ....	102
Figura 3.4-Etapas do ensaio RTFO: a) tempo de envelhecimento em forno específico; b) condição dos frascos após o ensaio; c) conferência da perda de massa durante o ensaio. ....	102
Figura 3.5- a) Visão geral do DSR instalado no Infralab b) Montagem de ensaio com placas paralelas de 8 mm de diâmetro, posicionamento da amostra para ensaio e c) Montagem de ensaio com placas paralelas de 25 mm de diâmetro, posicionamento da amostra para ensaio. ....	104
Figura 3.6- Compactador giratório SUPERPAVE. ....	112
Figura 3.7-Produção dos corpos de prova: a) Corpos de prova após desmoldagem; b) Corte de topo e base do CP para a altura final de 150 mm; c) Coreamento dos CPs em serra copo diâmetro de 100 mm; d) CPs após a retirada no núcleo na serra copo; e) CPs após retirada de topo e base nas dimensões adequadas aos ensaios. ....	117
Figura 3.8 - a) Visão geral do equipamento granulômetro a laser da Microtrac; b) Carregamento da amostra no equipamento para a análise das partículas de RAR. ....	122
Figura 3.9 - a) Início do ensaio, massa de mistura asfáltica na cesta de ensaio no interior da estufa; b) Fim do ensaio, escorrimento de duas amostras da mesma mistura no papel filtro. ....	123
Figura 3.10-Preparação dos CPs para o ensaio de dano por umidade induzida: a) Ciclo de congelamento; b) Ciclo de aquecimento e c) Posicionamento do CP para ensaio de RT. ....	125
Figura 3.11 - Amostras compactadas no compactador Marshall submetidas ao ensaio Cantabro: a) Amostras antes do ensaio; b) Amostras após o ensaio; c) Nítida diferença do desgaste entre as misturas MAB-R30 (superior) e MAC (inferior), esta última com topo e base mais arredondados. ....	126
Figura 3.12 - Montagem do ensaio de módulo dinâmico e ângulo de fase: a) Colagem dos <i>targets</i> com Araldite para fixação dos LVDTs axiais no CP; b) Colocação da placa inferior e duas membrans de látex lubrificadas com vaselina para diminuição do atrito na base do CP; c) CP	

posicionado com outras duas membranas no topo; d) Placa de aplicação da carga posicionada no topo do CP e LVDTs axiais posicionados.....	128
Figura 3.13 - Ensaio de FN: a) Amostras destinadas ao ensaio; b) CP posicionado no equipamento antes do início do ensaio; c) CP apresentando deformações plásticas após o ensaio. ....	129
Figura 3.14 - Preparo das amostras para o ensaio de fadiga: a) Cola Vedacit Tix utilizada para a fixação da amostra entre os pratos de topo e base; b) Gabarito centralizador da amostra para a cura da cola; c) Processo de colagem ocorrendo, níveis de bolha para verificação od paralelismo das faces; d) CP fora do gabarito, após a cura da cola. ....	131
Figura 3.15 - Etapas de montagem do ensaio de fadiga uniaxial cíclica: a) Aparato utilizado no <i>AsphaltQube</i> na acoplagem do prato de topo na prensa; b) Amostras coladas nas placas de topo e base, notar presença do centralizador de carga; c) Colocação da amostra no equipamento, ajuste e parafusamento da parte inferior; d) Ajuste da parte superior após posicionamento do atuador (aplicação de carga constante de 0,09kN) até a placa fixada na prensa; e) Aperto dos parafusos na parte inferior da amostra. ....	132
Figura 3.16 - Representação esquemática da energia de pseudo-deformação total dissipada no gráfico de tensão-pseudo deformação (modificado-Zhang <i>et al.</i> , 2013).....	134
Figura 3.17 - Estruturas de pavimento analisadas no FlexPAVE™ conforme Schuster (2018)..	140
Figura 3.18- Interface gráfica do FlexPAVE™ 1.1 aba <i>Desing Structure</i> .....	141
Figura 3.19 - Configuração da aba <i>Climate information</i> . ....	142
Figura 3.20 - Configuração da aba <i>Traffic data</i> . ....	143
Figura 3.21- Aba <i>Results - Fatigue cracking</i> . ....	144
Figura 3.22- Malha de pontos utilizada para a determinação do dano médio acumulado na camada do revestimento (modificado-Nascimento, 2015). ....	144
Figura 4.1-Curvas de Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Derivada (DTG) mostrando o comportamento da amostra de RAR. ....	147
Figura 4.2 - Termograma de DSC para a amostra de RAR.....	148

Figura 4.3- Diagrama de espaço black dos ligantes CAP 50/70 e AB-R30 nas condições virgem e envelhecido.....	151
Figura 4.4- Curva mestra para o módulo de cisalhamento dinâmico ( $ G^* $ ) a temperatura de 25°C para os ligantes CAP 50/70 e AB-R30 nas condições virgem e envelhecido. ....	153
Figura 4.5- Curva mestra para o ângulo de fase ( $\delta$ ) a temperatura de 25°C para os ligantes CAP 50/70 e AB-R30 nas condições virgem e envelhecido.....	154
Figura 4.6 - Resultados de testes do ensaio MSCR para a modificação do CAP 50/70 com RAR. ....	155
Figura 4.7-Valores de R3,2 kPa com a temperatura para o CAP 50/70 e AB-R30. ....	156
Figura 4.8- Valores de J <sub>nr</sub> 3,2 kPa com a temperatura para o CAP 50/70 e AB-R30. ....	157
Figura 4.9 - Resultados da recuperação e da compliância não recuperável para 17 e 23% de adição de RAR na temperatura de 64°C (modificado- <i>Alsaad et al.</i> , 2018). ....	158
Figura 4.10- Curva de dano característica do ensaio LAS para os ligantes CAP 50/70 e AB-R30. ....	160
Figura 4.11- Vida de fadiga N <sub>f</sub> em função dos valores de deformação cisalhante ( $\gamma$ ).....	161
Figura 4.12 – Parâmetros volumétricos da dosagem segundo a metodologia Superpave para as misturas MAC e MAB-R30.....	162
Figura 4.13 – Parâmetro CDI x teor de ligante (%). ....	165
Figura 4.14- Distribuição granulométrica da RAR obtida por meio do granulômetro a laser. ....	166
Figura 4.15 - Espesura do filme de ligante em função dos valores de VAM (%) das misturas...	169
Figura 4.16 - Espesura do filme de ligante em função dos valores de RBV (%) das misturas. ....	169
Figura 4.17- Resultados do escorrimento do ligante obtidos para quatro ligantes utilizados na Rússia (modificado- <i>Sousa et al.</i> ,2012). ....	171
Figura 4.18 - Resultados RRT do ensaio DUI para várias misturas modificadas com BMP e RAR, sem digestão (0 minutos) e com tempo de digestão (30 minutos) (modificado- <i>Chaves et al.</i> 2019). ....	174

Figura 4.19 - Resultados do ensaio Cantabro para misturas do tipo <i>thingap</i> (modificado-Sousa <i>et al.</i> , 2012). .....	175
Figura 4.20 – Diagrama de espaço black das misturas MAC e MAB-R30. ....	177
Figura 4.21 - Plano Cole-Cole para as misturas MAC e MAB-R30.....	178
Figura 4.22 - Curva mestra do módulo dinâmico ( $ E^* $ ) para as misturas MAC e MAB-R30 para a temperatura de 20°C.....	179
Figura 4.23 - Curva mestra do ângulo de fase ( $\varphi$ ) para as misturas MAC e MAB-R30 para a temperatura de 20°C.....	180
Figura 4.24 - Curvas de deformação plástica versus número de ciclos para cada mistura ensaiada. ....	181
Figura 4.25 - <i>Flow number</i> (FN) obtido entre as amostras e valores médio para as misturas MAC e MAB-R30.....	182
Figura 4.26 - Resultados de FN para misturas descontínuas ( <i>gap-graded</i> ) com BMP e RAR e mistura de controle (densa) (modificado-Shah, 2018).....	184
Figura 4.27 - Função potência ajustada para quatro amostras ensaiadas da mistura MAC, para a temperatura de 20°C.....	185
Figura 4.28 - Função potência ajustada para quatro amostras ensaiadas da mistura MAB-R30, para a temperatura de 20°C. ....	185
Figura 4.29 - Curvas características de dano das misturas estudadas para a temperatura de 20°C. ....	186
Figura 4.30 - Envoltórias de ruptura por meio do parâmetro $G^R$ para as misturas MAC e MAB-R30, ensaiadas a 20°C.....	188
Figura 4.31 - Comparação entre as curvas de Wöhler dos dados experimentais e os dados de simulação a partir de $G^R$ para os ensaios realizados a 20°C. ....	189
Figura 4.32 - Curvas de dano médio acumulado ao longo do tempo para MAC e MAB-R30 nas três estruturas testadas. ....	191

Figura 4.33 - Dano médio acumulado para misturas estudadas por Mocelin (2018). CA-B é a mistura descontínua produzida à quente com ECOFLEX-AB-8. ....	193
Figura 4.34 - Dano médio acumulado para misturas densas produzidas com ECOFLEX-AB-8 analisadas por Schuster (2018).....	193
Figura 4.35 - Dano médio acumulado na camada de revestimento da mistura MAC com 5 cm de espessura com 1 mês (à esquerda) e com 120 meses (à direita). ....	194
Figura 4.36 - Dano médio acumulado na camada de revestimento da mistura MAC com 10 cm de espessura com 1 mês (à esquerda) e com 120 meses (à direita). ....	194
Figura 4.37 - Dano médio acumulado na camada de revestimento da mistura MAC com 15 cm de espessura com 1 mês (à esquerda) e com 120 meses (à direita). ....	194
Figura 4.38 - Dano médio acumulado na camada de revestimento da mistura MAB-R30 com 5 cm de espessura com 1 mês (à esquerda) e com 120 meses (à direita).....	195
Figura 4.39 - Dano médio acumulado na camada de revestimento da mistura MAB-R30 com 10 cm de espessura com 1 mês (à esquerda) e com 120 meses (à direita).....	195
Figura 4.40 - Dano médio acumulado na camada de revestimento da mistura MAB-R30 com 15 cm de espessura com 1 mês (à esquerda) e com 120 meses (à direita).....	195

## LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials;</i>
AB	Asfalto borracha
AB-R30	Asfalto-Borracha com 30% de RAR;
ADOT	Departamento de Transporte do Arizona;
ANIP	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos;
<i>apud</i>	Citado por;
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials;</i>
ASU	<i>Arizona State University;</i>
BMP	Borracha Moída de Pneu;
BN	Borracha Natural;
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo;
CENPES	Centro de Pesquisa Leopoldo Américo Miguez de Mello;
CNT	Confederação Nacional de Transporte;
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente;
CPA	Camada Porosa de Atrito
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem;
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre;
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer;</i>
EN	Norma europeia;
ESAL	<i>Equivalent Standard Axle Load;</i>
<i>et al</i>	E outros;
EVA	Copolímero de Etileno-Acetato de Vinila
Hz	Hertz;
INFRALAB	Laboratório de Infraestrutura;
kN	Quilo Newton;
kPa	Quilo Pascal;
LAS	<i>Linear Amplitude Sweep</i>
MAB-R30	Mistura Asfalto-Borracha com 30% de RAR;
Máx	Máximo;
Mín	Mínimo;
mm	Milímetros;
MPa	Mega Pascal;
µm	Micrómetro;
µε	Microdeformação;
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program;</i>
NCSU	<i>North Carolina State University</i>
PG	<i>Performance Grade;</i>
R <sup>2</sup>	Coefficiente de correlação linear;
RAR	<i>Reacted and Activated Rubber;</i>
RBV	Relação Betume Vazios;
RT	Resistência à Tração
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test;</i>
RRT	Razão de Resistência à Tração

s	Segundos;
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program;</i>
SBR	Borracha de Butadieno Estireno;
SBS	Copolímero de Estireno Butadieno;
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt;</i>
SUPERPAVE	<i>Superior Performance Pavements;</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UnB	Universidade de Brasília;
USP	Universidade de São Paulo;
VAM	Vazios no Agregado Mineral;
VCB	Vazios Com Betume;
VECD	<i>Viscoelastic Continuum Damage;</i>
Vv	Volume de Vazios.

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	coeficiente do modelo de vida de fadiga
$a_T$	fator de translação da curva mestra
B	coeficiente do modelo de vida de fadiga
$C_i$	coeficientes experimentais da curva característica
D	dano
$D_f$	dano na ruptura
$E^*$	módulo complexo
$E'$	módulo de armazenamento
$E''$	módulo de perda
$ E^* $	módulo dinâmico
$F_s$	força exercida pelo equipamento
$f$	frequência
$G^*$	módulo cisalhante complexo
$G'$	módulo cisalhante de armazenamento
$G''$	módulo cisalhante de perda
$ G^* $	módulo dinâmico cisalhante
i	número imaginário
$k_i$	coeficientes dos modelos
m	inclinação da parte linear central da curva mestra
N	número de ciclos
$N_f$	vida de fadiga
r	raio da amostra
T	torque aplicado pelo reômetro

$T_L$	tempo de carga
$T_R$	tempo de descanso
$t$	tempo
$t_r$	tempo de carregamento na temperatura de referência
$z$	coeficiente do modelo de fadiga
$\alpha$	coeficiente da lei de evolução do dano
$\beta$	parâmetro da curva sigmoïdal
$\varepsilon$	deformação
$\varepsilon_0$	amplitude de deformação
$\varepsilon_e$	deformação elástica
$\varepsilon_p$	deformação plástica
$\varepsilon_{ve}$	deformação viscoelástica
$\varepsilon_{vp}$	deformação viscoplástica
$\delta$	ângulo de fase do ligante
$\delta$	parâmetro da curva sigmoïdal
$\varphi$	ângulo de fase da mistura
$\varphi_{DSR}$	ângulo de deflexão
$\omega$	frequência angular
$\omega_r$	frequência angular reduzida
$\gamma$	deformação cisalhante
$\gamma_0$	deformação cisalhante inicial
$\gamma_{máx}$	deformação cisalhante máxima
$\gamma$	parâmetro da curva sigmoïdal
$\delta$	parâmetro da curva sigmoïdal
$\pi$	número Pi
$\sigma$	tensão
$\sigma_0$	amplitude de tensão
$\tau$	tensão cisalhante
$\nu$	coeficiente de Poisson
$\varepsilon^R$	pseudo-deformação;
$E_R$	módulo de referência;
$E(t)$	módulo de relaxação;
$\xi$	tempo reduzido;
$\tau$	variável de integração;
$\varepsilon$	deformação;
$(\varepsilon_{0,ta}^R)$	pseudo-deformação de amplitude de tração;
$\beta$	fator de forma do carregamento;
$(\varepsilon_{0,pp})$	deformação pico a pico;
$ E _{LVE}^*$	norma do módulo complexo ensaiado;
$DMR$	razão do módulo dinâmico;
$(\sigma_{0,pp})$	tensão de pico a pico;
$\Delta C_j$	variação de C entre as etapas $j$ e $j-1$ ;
$\Delta C_i$	variação de C entre os ciclos $i$ e $i-1$ ;
$\alpha$	taxa de evolução do dano;
$\Delta \xi$	diferença entre o tempo reduzido e o tempo transcorrido entre as etapas $j$ e $j-$

	$I$ ;
$\Delta N_i$	variação do número de ciclos;
$\xi_p$	tempo de pulso reduzido;
$K_1$	fator de ajuste de carga;
$dS$	evolução do dano

## 1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura é vista como fundamental para o desenvolvimento econômico sustentado e para a integração dos mercados interno e internacional, bem como para o acesso a oportunidades econômicas para todos. Cidades inteligentes, os motores das economias modernas, dependem de transporte público, energia limpa, edifícios sustentáveis, controle da poluição e manejo de resíduos para atrair os melhores talentos e fomentar a inovação (Banco Mundial, 2016).

A Pesquisa CNT de Rodovias tem evidenciado, ao longo dos anos, que as condições das rodovias brasileiras pavimentadas avaliadas não se encontram satisfatórias. Tal fato, também, é reforçado pelo resultado do ranking de competitividade global do Fórum Econômico Mundial. O Brasil foi classificado na 93ª posição, entre 141 países, com relação à variável rodovias (considerando índices de conectividade e condições funcionais da via), ficando atrás de outros países da América Latina (CNT, 2021).

Além de falhas preventivas, como falta de manutenção das vias e excesso de cargas, a que podem ser atribuídas os danos de fadiga e deformação permanente na malha rodoviária, o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis vigente no Brasil é datado de 1966. É considerado um método empírico, fundamentado no ensaio de CBR (California Bearing Ratio) e no tráfego previsto com vistas à proteção da camada de subleito, porém, não considera as características da camada de mistura asfáltica e condicionantes ambientais. Desde a criação do método até o presente momento, o tipo e volume de tráfego rodante nas rodovias brasileiras evoluiu, trazendo a necessidade de desenvolvimento de um método mais realista, baseado nos conceitos científicos da Mecânica dos Pavimentos e calibrado empiricamente para nossas condições.

Recentemente, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) em conjunto com as universidades brasileiras tem realizado grande esforço para a consolidação do novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis a partir de uma abordagem mecanístico-empírica. O programa MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional) foi desenvolvido com

contribuições dos trabalhos de Franco (2007), Guimarães (2009), Nascimento (2015) e Fritzen (2016), e está disponibilizado na página virtual do DNIT.

O programa MeDiNa fundamentado na proposta de Franco (2007), então denominado SisPavBR, utilizou dados de trechos experimentais construídos dentro do campus da COPPE/UFRJ em sua etapa de implantação e calibração. Estes trechos constituíram um estudo amplo de aplicação de materiais, ensaios de laboratório e monitoramento de vias, que foi intitulado de Projeto Fundação.

Fritzen (2016) explica que a etapa de validação foi realizada com dados de monitoramento de trechos experimentais, realizados em projetos de pesquisa financiados e coordenados pelo CENPES/Petrobras denominada como Rede Temática de Asfalto em parceria com centros de ensino como a Universidade Federal do Ceará (UFC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e Universidade de São Paulo (USP). O autor comenta que a implantação do programa foi programada para ocorrer em dois níveis, A e B. O nível A (atual operacionalidade do programa) considera o revestimento asfáltico elástico, caracterizado pelos ensaios mecânicos de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral de carga repetida. O nível B considerará o revestimento asfáltico viscoelástico, a velocidade dos veículos e as variações de temperatura da camada e é caracterizado pelos ensaios mecânicos de módulo dinâmico e fadiga por tração direta com tensão controlada.

Além do dimensionamento adequado e execução construtiva conforme o projeto serem premissas necessárias a fim de estender a durabilidade dos pavimentos, outra solução, atrelada ao avanço na tecnologia de materiais, é o uso de ligantes que promovem melhorias das características e propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Para pavimentos flexíveis, algumas destas melhorias foram feitas com a modificação do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), adicionando polímeros, fibras sintéticas, fíleres e borracha granulada de pneus usados. O desenvolvimento de novas tecnologias para integrar materiais mais ecológicos, resíduos e materiais reciclados no ciclo de produção de misturas asfálticas é uma solução que melhora tanto a sustentabilidade quanto a relação custo-benefício da indústria da pavimentação asfáltica. (Kowalki *et al.*, 2016).

O uso de borracha moída de pneu (BMP) em misturas asfálticas por via úmida (*field blend*) é praticado há anos nos Estados Unidos, com histórico de bom desempenho. No entanto, tem como desvantagens a necessidade de equipamento apropriado ao processo de fabricação instalado na usina, altas temperaturas de agitação do ligante modificado e maior tempo de preparo.

No Brasil é mais comum a produção de mistura asfalto-borracha (AB) a partir do ligante modificado na refinaria (*terminal blend*), que consome uma menor quantidade de borracha e adiciona óleos extensores durante sua produção. Misturas asfálticas obtidas com este tipo de AB apresentam pior desempenho mecânico quando comparado às misturas produzidas pela via úmida (*field blend*) (Shatnawi, 2011). Pesquisas desenvolvidas em universidades brasileiras, considerando diferentes vias de modificação, vêm mostrando as melhorias da incorporação de borracha às misturas asfálticas (Oda, 2000; Salini, 2000; Specht, 2004; Dantas Neto, 2004; Pinheiro, 2004; Wickboldt, 2005; Faxina, 2006; Mello, 2008; Fontes, 2009 e Camargo, 2016).

Neste sentido esta pesquisa busca contribuir com o conhecimento sobre as misturas modificadas com BMP a partir da utilização de uma borracha pré-tratada (RAR). A RAR busca atender à demanda de simplificação da produção da mistura AB na usina, tendo bons resultados de desempenho em campo. Assim, buscou-se entender a composição química da RAR, o efeito da modificação no ligante e na mistura a partir das propriedades reológicas e do comportamento mecânico.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

As atividades de construção e reabilitação do sistema viário consomem grandes quantidades de energia e materiais naturais, produzindo resíduos e gerando emissões de gases do efeito estufa. Tendo em vista as crescentes preocupações com a saúde e o meio ambiente, novos materiais devem ser desenvolvidos. A busca por ações ambientalmente corretas possui relação direta com o uso de materiais sustentáveis e precisa de avanços tecnológicos para que possam agregar melhorias de desempenho sem prejuízo à qualidade na pavimentação.

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) instituiu em 1999 a Resolução 258, em que as empresas fabricantes e as importadoras de pneus ficaram obrigadas a coletar e dar destinação final, ambientalmente adequada, aos pneus inservíveis existentes no

território nacional, na proporção definida em função das quantidades de pneus fabricados e importados.

Sousa *et al.* (2009) destacam que a necessidade de alta temperatura (acima de 180 °C), demasiado tempo de produção do ligante AB (45 minutos até uma hora), a complexidade e o custo da unidade de mistura a ser instalada em cada usina de asfalto são fatores que encarecem as misturas AB, em comparação à execução de misturas asfálticas convencionais. Consequentemente o método de produção de misturas AB por via úmida, com adaptações de produção na usina (*field blend*), é pouco aplicado mundialmente, não apresentando uso significativo, prático e implementado, à exceção de alguns estados dos EUA, como o Arizona.

As tecnologias de borracha granulada pré-tratada estão surgindo como um novo método para produzir misturas AB no campo. Neste contexto, a *Reacted and Activated Rubber* (RAR) foi desenvolvida com a proposta de simplificação do processo de usinagem (como o realizado na mistura asfáltica obtida pela via seca) e obtenção de desempenho da mistura asfáltica superior (como a mistura asfáltica obtida pela via úmida segundo a técnica empregada na terminologia *field blend*), além da utilização de uma maior porcentagem de borracha e um processo de mistura a temperaturas mais baixas. Estes materiais quando adicionados a um CAP de base apresentam características aceitáveis de AB, normatizado pela ASTM D 6114/09 (Lopes *et al.*, 2021). Assim é necessário o estudo de novas tecnologias que facilitem e estimulem a aplicação de AB no Brasil, bem como a viabilidade da produção destes novos materiais no país.

A teoria do dano contínuo viscoelástico (VECD), desenvolvida em 1990 por Kim e Little, passou por atualizações ao longo do tempo e vem sendo bastante utilizada e difundida na caracterização de misturas asfálticas (Lee e Kim, 1998; Daniel e Kim, 2002; Chehab *et al.*, 2002; Chehab *et al.*, 2003; Underwood *et al.*, 2006 e Underwood *et al.*, 2009). Mais recentemente, Underwood *et al.* (2010) e Underwood *et al.* (2012) formularam simplificações a este modelo que passou a ser designado como *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD).

No Brasil, Mello (2008) utilizou o modelo VECD para caracterizar e simular o comportamento de diferentes misturas asfálticas aplicadas em rodovias do estado do Arizona, nos Estados Unidos. O autor realizou ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos (4PB) nessas misturas na *Arizona State University* (ASU). Nascimento (2015) realizou ensaios de fadiga uniaxial cíclica em misturas brasileiras durante seu doutorado na *North Carolina State University*

(NCSU), validando os desempenhos observados em campo e previstos nas análises computacionais, utilizando um *software* que implementa o modelo S-VECD.

Atualmente, vários centros de pesquisas do Brasil vêm aderindo ao protocolo de ensaio de fadiga segundo o modelo S-VECD normatizado pela AASHTO TP 107 (2014), ainda sem normativa no país. A realização do ensaio envolve diferentes etapas e particularidades, desde a fabricação da amostra, acessórios necessários, processo de colagem da amostra e preparo desta no equipamento. Trabalhos, como o de Babadopulos (2014), Boeira (2018), Mocelin (2018), Schuster (2018), Santos (2020) e Vestena (2021), mostram a crescente utilização desta forma de análise de desempenho em misturas asfálticas.

Finalmente, a presente pesquisa tem caráter inovador contribuindo com o estudo a respeito do material RAR e sua ação no ligante e no comportamento de uma mistura não convencional do tipo descontínua densa, quanto a sua eficiência em agregar melhorias nas propriedades reológicas (módulo dinâmico e ângulo de fase), no comportamento quanto ao trincamento por fadiga e deformação permanente acumulada. Além disso, toda a etapa laboratorial dispôs da utilização de premissas internacionalmente aceitas. Ao final, foram realizadas simulações mecânicas, sob um modelo de dano, a fim de obter as respostas ao consumo da vida de fadiga nos pontos considerados críticos para camadas de revestimento em concreto asfáltico.

## **1.2 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA**

A autora desta tese realizou em seu trabalho de mestrado (Nunes, 2017) uma avaliação da adição de 25% e 30% de RAR ao CAP 50/70 e uma mistura de granulometria descontínua. No estudo em questão, a adição de 30% de RAR, em massa de ligante, apresentou o melhor desempenho tanto nos ligantes quanto nas misturas. Cabe mencionar que o foco da pesquisa de Nunes (2017) corresponde ao estudo da fadiga sob a luz do ensaio no equipamento de viga à flexão em quatro pontos (4PB), segundo o protocolo da AASHTO T 321 (2007), diferentemente do que se busca no desenvolvimento desta tese.

Assim, a presente pesquisa, tendo como ponto de partida os resultados obtidos por Nunes (2017), busca investigar o seguinte questionamento: qual o efeito da adição de *Reacted and Activated Rubber* (RAR), em 30% de massa de ligante, nas propriedades físicas e no desempenho mecânico à fadiga e deformação permanente de um ligante asfáltico brasileiro de uso

convencional e de uma mistura asfáltica de granulometria descontínua produzida segundo o mesmo teor de adição?

### **1.3 HIPÓTESE**

A adição de RAR em uma mistura de granulometria descontínua do tipo *gap-graded* apresentaria resultados de comportamento mecânico superior à mistura produzida com ligante convencional e àquelas produzidas por via úmida, além de possibilitar a simplificação do processo de obtenção de misturas AB.

### **1.4 OBJETIVO GERAL**

O principal objetivo dessa pesquisa é analisar, por meio de ensaios mecânicos, a influência da adição de RAR, na proporção de 30%, nas propriedades de um ligante convencional, CAP 50/70, e no desempenho da mistura asfáltica de granulometria descontínua usinada à quente, produzida em laboratório. Desta forma, os resultados serão comparados a partir de uma mistura de controle, produzida com a mesma granulometria, sem a adição de RAR. Os resultados dos ensaios propostos nesta pesquisa também serão comparados com resultados de ensaios em misturas AB, tipo *gap-graded*, obtidas por via úmida presentes na literatura. Além disso, o trabalho visa a simulação numérica dos dados obtidos nos ensaios de laboratório no programa FlexPAVE™.

### **1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos são:

- Analisar a caracterização dos ligantes asfálticos por meio de ensaios convencionais encontrados nas especificações nacionais;
- Analisar a caracterização reológica e o comportamento à fadiga e deformação permanente dos ligantes asfálticos;
- Examinar a caracterização química e granulométrica da composição da RAR;
- Determinar o teor de projeto, utilizando o compactador giratório, para a mistura de controle e mistura produzida com adição de RAR;

- Verificar o comportamento em propriedades de engenharia das misturas asfálticas por meio de ensaios de: dano por umidade induzida, Cantabro, módulo dinâmico, *Flow Number* e fadiga por tração direta uniaxial cíclica;
- Implementar o ensaio de fadiga por tração direta uniaxial cíclica no Laboratório de Infraestrutura - INFRALAB/FT/UnB e contribuir com o conhecimento a respeito do dano nas misturas estudadas;
- Modelar o comportamento das misturas estudadas por meio do modelo S-VECD, gerando suas curvas características de dano e envoltórias de ruptura;
- Aplicar os resultados experimentais obtidos para as misturas em simulações de algumas estruturas de pavimentos no programa FlexPAVE™ (que utiliza os dados de dano e da caracterização linear viscoelástica para as análises), permitindo a visualização da evolução do dano no interior do revestimento asfáltico;
- Comparar resultados de comportamento entre as misturas asfálticas com e sem adição de RAR produzidas nesta tese, misturas do tipo *gap-graded* produzidas por via úmida e misturas asfálticas densas produzidas com CAP 50/70 no Brasil, disponíveis em bibliografias, submetidas aos mesmos ensaios mecânicos propostos neste estudo.

## **1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O presente trabalho foi estruturado nos capítulos que se descrevem a seguir:

### *Capítulo 1 – Introdução*

Apresenta uma breve descrição sobre o uso de asfalto-borracha e o foco das pesquisas brasileiras em realizar avanços na caracterização do material asfáltico, o histórico do tema, o objetivo geral e os específicos e metodológicos que foram necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

### *Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica*

Na revisão bibliográfica são apresentados os processos que envolvem a aplicação da BMP na pavimentação. Discorre-se sobre a composição e aplicação da RAR. As propriedades analisadas no desempenho das misturas asfálticas e os conceitos de fadiga e deformação permanente, os quais permitiram ajustar os dados experimentais apresentados aos modelos empíricos conhecidos.

### *Capítulo 3 – Materiais e Métodos*

Apresenta a descrição detalhada dos materiais empregados na pesquisa. Descreve os métodos de caracterização física e mecânica empregados. Detalha as normativas e os equipamentos utilizados, bem como as especificações sob as quais procederam os ensaios.

### *Capítulo 4 – Apresentação e Análise de Resultados*

A partir dos dados experimentais obtidos nos ensaios de laboratório, discute-se os resultados comparando-os com as produções do meio técnico. Além disso, após a aplicação do modelo S-VECD, apresentam-se os resultados das análises numéricas para as estruturas propostas.

### *Capítulo 5 – Conclusões e Sugestões para Pesquisas Futuras*

Apresenta as conclusões mais relevantes obtidas a partir dos dados experimentais e das análises numéricas da pesquisa. Adicionalmente comenta-se sobre alguns itens não avaliados durante o desenvolvimento do trabalho os quais sugerem pesquisa futura.

### *Capítulo 6 – Referências Bibliográficas*

O capítulo apresenta os documentos técnicos e acadêmicos utilizados como apoio no desenvolvimento da tese.

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento de materiais e procedimentos utilizados nesta tese. Inicialmente, são colocados os conceitos sobre os materiais modificadores do CAP, o histórico sobre a utilização e as diferentes formas de incorporação da borracha em misturas asfálticas no Brasil e no mundo. Também é abordado o desenvolvimento do material a ser investigado, *Reacted and Activated Rubber* (RAR).

Além disso, está contida na revisão bibliográfica a teoria que explica o comportamento dos materiais viscoelásticos, os modelos utilizados para reproduzir as respostas destes materiais, as solicitações e os ensaios mecânicos que caracterizam o desempenho à fadiga e deformação permanente em misturas asfálticas. Por fim é abordado o modelo de dano contínuo viscoelástico simplificado, que será aplicado na análise de desempenho de uma estrutura hipotética de pavimento utilizando as misturas estudadas.

#### 2.1 ASFALTO MODIFICADO POR POLÍMERO (AMP)

O aumento da frota veicular assim como o excesso de carga por eixo no transporte rodoviário, associados à falta de manutenção da rodovia e ao envelhecimento físico e químico do CAP, contribuem com a necessidade de maior qualidade na mistura asfáltica e seus constituintes. Desta forma, a fim de melhorar as propriedades reológicas de um ligante, e, conseqüentemente, o desempenho das misturas asfálticas são utilizados agentes modificadores dentre o quais polímeros, fíleres naturais e materiais nanotecnológicos.

Os polímeros são frequentemente utilizados para modificar os ligantes asfálticos para melhorar propriedades reológicas como: estabilidade no armazenamento, rigidez à flexão, flexibilidade a baixas temperaturas e aumento da resistência à fissuração em baixas temperaturas. Segundo Yildirim (2007), a execução de pavimentos flexíveis com asfalto modificado por polímeros tem mostrado melhoria no desempenho destes, apresentando maior resistência à deformação permanente e trincamento térmico, além de diminuição dos danos de fadiga e menor suscetibilidade à ação térmica.

Leite (1999) justifica o uso de asfaltos modificados ao invés de cimentos asfálticos convencionais. Segundo a autora:

- Mesmo CAPs mais duros podem não fornecer suficiente resistência à deformação em rodovias com alto volume de tráfego canalizado, tais como corredores de ônibus;
- CAPs mais consistentes contribuem para melhoria da resistência à formação de trilhas de roda, mas aumentam o risco de trincas por fadiga em certas condições;
- Determinadas misturas abertas não apresentam resistência mecânica desejada devido à baixa coesividade e adesividade imposta pelo CAPs convencional;
- No caso de membranas cuja finalidade é proteger as camadas superficiais de reflexão de trincas, se deseja grande elasticidade e capacidade de acomodar expansões que não são obtidas por CAPs convencionais;
- No caso de revestimento de pontes se deseja redução significativa da susceptibilidade térmica e aumento da resistência à flexão, requisitos não apresentados pelo CAP convencional;
- Reduzir custos de manutenção de pavimentos;
- Aumentar resistência ao envelhecimento e oxidação;
- Aumentar resistência à abrasão de misturas betuminosas;
- Permitir uso de filmes finos de ligante nos agregados;
- Possibilitar o emprego de revestimentos superficiais com misturas não convencionais: revestimentos drenantes, microrrevestimentos, pavimentos de alto módulo, pavimentos ultradelgados e *Stone Matrix Asphalt*- SMA.

Yildirim (2007) descreve resumidamente as propriedades dos principais polímeros empregados em modificação de asfaltos:

- Borracha Natural (BN): melhora a resistência à deformação permanente, mas é sensível à decomposição e frequentemente apresenta problemas de compatibilidade. O uso de borracha de pneu como modificador de asfalto é uma solução ambientalmente correta, mas que requer temperaturas mais elevadas de mistura e tempos mais longos de digestão, a fim de prevenir a separação de fases (borracha – ligante asfáltico);
- Borracha de Butadieno Estireno (SBR): melhora a ductilidade a baixas temperaturas, aumenta a viscosidade, melhora a recuperação elástica e as propriedades de coesão e adesão;

- Copolímero de Estireno Butadieno (SBS): vem substituindo o SBR, devido sua melhor compatibilidade com os ligantes e melhor resistência à tração. Este é atualmente o polímero mais utilizado para modificação de asfaltos, pois melhora sua elasticidade, trabalha bem a baixas temperaturas, além de o ligante modificado poder ser reutilizado.

Airey (1997) ressalta que, a modificação do ligante com polímeros requer uma boa compreensão da interrelação entre os dois. As misturas contendo ligantes modificados por polímeros inadequadas podem não resultar num desempenho melhorado da mistura asfáltica. Além disso, o uso de polímeros pode resultar em misturas asfálticas rígidas que serão de difícil fabricação, transporte, aplicação e compactação. Ainda segundo o autor, o aumento da rigidez do ligante levará ao aumento do módulo dinâmico da mistura asfáltica e assim melhorará a capacidade de distribuição de cargas no material, reduzindo as deformações críticas. Isto aumentará a vida de projeto de uma dada camada de asfalto. Aumentar a componente elástica da resposta aumenta a flexibilidade do asfalto, o que é importante devido às deformações de tração na base do revestimento.

Yusoff *et al.* (2013) estudaram os dados de caracterização reológica de mais de 60 combinações diferentes entre ligantes não modificados, ligantes modificados com polímeros e *fillers*, nas condições de amostras envelhecidas e não envelhecidas. Leite (1999), Lucena *et al.* (2004), Pamplona *et al.* (2012) e Nuñez *et al.* (2014) desenvolveram pesquisas em universidades brasileiras, analisando os benefícios da modificação de polímeros e fíleres em ligantes convencionais.

Segundo Li *et al.* (2017) as nano-partículas podem melhorar a adesividade produzindo uma ligação entre o asfalto e nano-partículas e desta forma impedir a geração e o desenvolvimento de micro trincas. Neste sentido, os principais nano-materiais estudados e recomendados para modificação de ligantes asfálticos são: nano-sílica ( $\text{SiO}_4$ ), nano-argila, nano-fibras de carbono, nano-tubos de carbono, nano-zinc e nano-carvão.

Martínez (2017) e Bastidas-Martínez *et al.* (2021) mostram em seu trabalho que a incorporação de cal e fíleres alternativos, como lodos de estação de tratamento de água, rejeitos de minério de ferro e borracha, em ligantes e misturas asfálticas pode ser considerada uma prática viável do ponto de vista técnico e ambiental, que contribui com alternativas seguras de disposição final de resíduos.

Nos serviços de pavimentação das rodovias brasileiras vem sendo bastante comum a aplicação de AMP visto o seu bom desempenho frente a solicitação do tráfego e do clima, além das melhorias anteriormente relacionadas. A norma DNIT 129/2011- EM estabelece as principais características definidoras do CAP modificado por polímero elastomérico. Segundo a normativa CAPs modificados por polímeros elastoméricos são classificados, segundo o ponto de amolecimento e a recuperação elástica a 25 °C, nos tipos 55/75-E, 60/85-E e 65/90-E. Na Tabela são apresentadas as características que estes CAPs devem apresentar, de modo que, em sua utilização, seja alcançada a máxima eficiência.

**Tabela 2.1-** Características do Asfalto Modificado por Polímero segundo a norma DNIT 129/2011 – EM.

Características	Unidade	55/75-E	60/85-E	65/90-E	Método de Ensaio	
		Limite da Especificação			ABNT / NBR	DNIT- ME
Penetração 25°C, 5s, 100g	0,1 mm	45 – 70	40-70	40-70	-	155/2010
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	55	60	65	-	131/2010
Ponto de Fulgor, mín.	°C	235	235	235	11341	-
Viscosidade Brookfield a 135°C, spíndle 21, 20 rpm, máx.	cP	3000	3000	3000	15184	-
Viscosidade Brookfield a 150°C, spíndle 21, 50 rpm, máx	cP	2000	2000	2000	15184	-
Viscosidade Brookfield a 177°C, spíndle 21, 100 rpm, máx.	cP	1000	1000	1000	15184	-
Ensaio de Separação de Fase, máx.	°C	5	5	5	15166	-
Recuperação Elástica a 25°C, 20 cm, mín.	%	75	85	90	-	130/2010
<b>Efeito do calor e do ar - RTFOT , 163 °C, 85 minutos</b>						
Varição de massa, máx.	% massa	1	1	1	15235	-
Varição do PA, máx.	°C	- 5 a +7	- 5 a +7	- 5 a +7	-	131/2010
Porcentagem de Penetração Original, mín.	%	60	60	60	-	131/2010
Porcentagem de Recuperação Elástica Original a 25°C, mín.	%	80	80	80	-	131/2010

## 2.2 BORRACHA MOÍDA DE PNEU (BMP) NA PAVIMENTAÇÃO

Na década de 60, Charles H. McDonald, iniciou uma pesquisa com o intuito de desenvolver, com a incorporação de borracha moída, um material altamente elástico para ser aplicado na manutenção da superfície de pavimentos asfálticos. Suas pesquisas resultaram no desenvolvimento de um produto composto de ligante asfáltico e 25% de borracha de pneu moído, misturados a uma temperatura de 190°C durante 20 minutos, para ser utilizado em remendos. Esse produto, denominado “*band-aid*”, foi utilizado também como selante de trincas e como camada de reforço (por meio do processo denominado *Stress Absorbing Membrane Interlayer - SAMI*) (Way, 2003).

O Departamento de Transporte do Arizona (ADOT) começou a utilizar asfalto-borracha em 1964 em serviços de manutenção de pavimentos. De 1974 a 1989, aproximadamente 1100 km de rodovias estaduais foram construídas com aplicação de asfalto-borracha (Way, 2003). Em 1988 o ADOT executou uma Camada Porosa de Atrito (CPA) com asfalto-borracha com espessura de uma polegada em várias milhas da Interestadual 19, no sul de Tucson. Até o ano de 1996 o pavimento executado não havia apresentado trincas (Takallou e Takallou, 2003).

Nas décadas de 1970 e 1980, o Departamento de Transportes da Califórnia (Caltrans) realizou várias aplicações de mistura AB em trechos teste como alternativa de restauração em pavimentos deteriorados. Nessas aplicações o asfalto-borracha foi utilizado em revestimentos esbeltos com a técnica *chip seal*, em misturas asfálticas densas empregadas para reforço estrutural e em misturas asfálticas descontínuas (*open-graded, gap-graded*), usadas como camadas intermediárias para evitar a reflexão de trincas (Caltrans, 2003).

Na Europa o asfalto-borracha tem sido também utilizado a partir da década de 1980, na Bélgica, França, Áustria, Holanda, Polônia, Alemanha, Grécia e Reino Unido, com especial destaque para os países de Portugal, Espanha, Itália, República Checa e Suécia (LoPresti, 2013).

A República da África do Sul começou a produzir misturas AB no início da década de 1970 e na década de 1980 e têm sido utilizados os processos da via seca e da via úmida com sucesso, mas com maior predominância para a via seca (Visser e Verhaeghe, 2000).

No Brasil, na década de 90, o Centro de Pesquisa da Petrobrás (CENPES) e algumas universidades começaram a desenvolver pesquisas voltadas à área de materiais asfálticos modificados por polímeros e borracha de pneus descartados, com o objetivo principal de estudar o desempenho desses materiais. Anos depois, em 1999, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) instituiu a Resolução 258, em que as empresas fabricantes e as importadoras de pneus ficaram obrigadas a coletar e dar destinação final, ambientalmente adequada, aos pneus inservíveis existentes no território nacional, na proporção definida em função das quantidades de pneus fabricados e importados. É neste contexto de diminuição da poluição ambiental e melhoria do comportamento dos materiais asfálticos convencionais que se inserem os ligantes asfálticos modificados com borracha granulada de pneus usados. Podem ser listados trabalhos de relevância realizados no país que se referem à utilização de asfalto-borracha como Leite (1999), Oda (2000),

Bertollo (2002), Specht (2004), Dantas Neto (2004), Pinheiro (2004), Wickboldt (2005), Mello (2008), Camargo (2016).

Em 2009 o CONAMA lançou a Resolução nº 416, que revogou a Resolução nº 258/1999, e dispõe sobre a prevenção da degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada. A referida resolução determina aos fabricantes e importadores de pneus novos, com peso unitário superior a dois quilos, a coletarem e destinarem adequadamente os pneus inservíveis existentes no território nacional. Para cada pneu novo comercializado para o mercado de reposição, as empresas fabricantes ou importadoras deverão dar destinação adequada a um pneu inservível, sendo a quantidade convertida em peso de pneus inservíveis a serem destinados. Além disso, estabelece a implantação de pontos de coleta de pneus inservíveis em todos os municípios com população superior a cem mil habitantes.

Segundo o Relatório de Pneumáticos (2020), elaborado segundo a Resolução 416/2009, considerando o declarado ao Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA) relativo ao período de janeiro a dezembro de 2019, o processo industrial de fabricação de borracha moída ocupou o segundo lugar entre as tecnologias de destinação ambientalmente adequadas praticadas pelas empresas destinadoras e declaradas na pesquisa. Em primeiro lugar ocupa a tecnologia de coprocessamento, em terceiro a laminação e quarto a pirólise. Ainda segundo a pesquisa, a meta de destinação calculada para os grupos de fabricantes e importadores, no mesmo período foi cumprida em 99%.

Embora a utilização de borracha de pneu seja mundialmente difundida e apresente crescentes avanços, no Brasil, data-se do ano 2001 a primeira aplicação de asfalto-borracha em uma rodovia. Segundo Ribeiro (2001) *apud* Specht (2004), trata-se de um trecho da BR-116, localizado entre Guaíba e Camaquã no estado do Rio Grande do Sul. A norma DNIT 111/2009 - EM fixa as principais características definidoras do CAP modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, apresentando especificações e faixas de valores para dois tipos de ligante AB chamados na norma de AB8 e AB22, classificados segundo a faixa de viscosidade rotacional. A empresa Greca Asfaltos realiza em seu site a contagem em tempo real da utilização de um ligante AB do tipo *terminal blend*, distribuído comercialmente, a qual aponta para o consumo de cerca de doze milhões de pneus inservíveis desde seu primeiro uso até o momento (Greca Asfaltos, 2021).

### 2.2.1 Composição física e química dos pneus automotivos

Em geral, os pneus são compostos de borracha natural (látex natural) e borracha sintética (advindo do petróleo). A proporção desses materiais varia de acordo com o tamanho e uso do pneu. Quanto maior o pneu, maior a concentração da borracha natural em relação à borracha sintética. O segundo maior componente do pneu é outro composto petrolífero que é o negro de fumo. A quantidade de negro de fumo pode variar significativamente dependendo do tipo de fabricante devido aos vários tipos disponíveis. O negro de fumo é usado principalmente para enrijecer a borracha, controlar a abrasão e reduzir a aquaplanagem (Shulman, 2000). O terceiro maior componente em termos de quantidade em um pneu é o aço. O aço é usado para fornecer rigidez, bem como flexibilidade. Além disso, a maioria dos pneus contém nylon ou poliéster. A Tabela 2.2 apresenta a composição de pneus de veículos de passeio e comercial na União Européia.

**Tabela 2.2-** Comparação da composição de pneus entre veículo de passeio e veículo comercial (Rahman, 2004 – Modificado)

<b>Material</b>	<b>Veículo de passeio (%)</b>	<b>Veículo comercial (%)</b>
Borracha	48	43
Negro de fumo	22	21
Metal	15	27
Tecido	5	-
Óxido de Zinco	1	2
Enxofre	1	1
Aditivos	8	6

A borracha natural é altamente deformável devido à sua composição química de longas cadeias de polímeros. Essas cadeias podem se movimentar de forma relativamente independente umas com relação às outras, resultando em deformações. Por meio do processo de vulcanização se formam as retículas entre as cadeias de polímeros, de forma que as cadeias não podem mais se movimentar de forma independente. Assim, quando um carregamento é aplicado na borracha vulcanizada, esta irá deformar, mas, quando o carregamento for retirado, a borracha vulcanizada terá a capacidade de voltar à sua forma original (LoPresti, 2013), desta forma se caracterizando como um material altamente elástico.

O processo de vulcanização de borracha foi descoberto casualmente por Charles Goodyear, em 1839, ao deixar cair enxofre em uma amostra de borracha que estava sendo aquecida. Com isso, foi descoberto um material mais resistente e elástico, cuja demanda se multiplicou no mundo todo (Goodyear, 2021). Uma das principais aplicações da borracha vulcanizada sempre foi como pneu de veículos rodoviários.

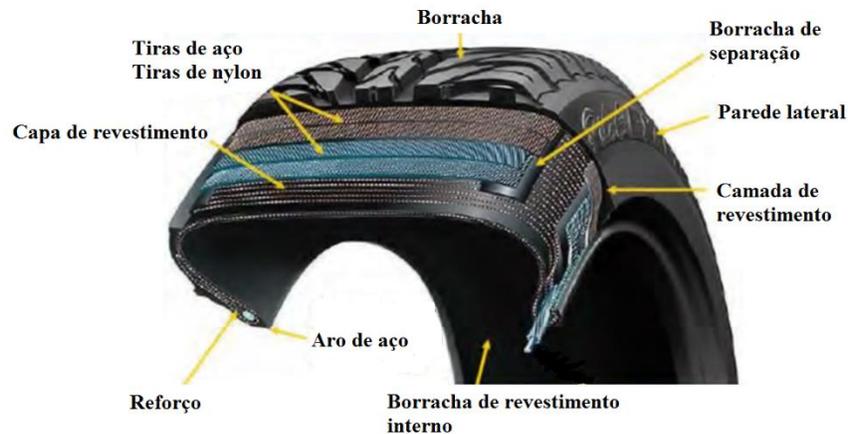
Devido às melhorias que a incorporação de borracha de pneu traz aos pavimentos ao longo de sua vida útil, juntamente com a questão ambiental sobre a disposição de pneus inservíveis, diversos países aderiram a pesquisas e a utilização de asfalto-borracha em obras de pavimentação (Oda e Fernandes Júnior, 2001).

Rahman (2004) ressalta que a produção do pneu é um processo complexo para combinar composto elastomérico (borracha), tecido e aço, e então mantê-lo sob efeito de calor e pressão. A resistência a mofo, bolor, calor e umidade, retardo do desenvolvimento bacteriano, resistência à luz solar, raios ultravioleta, alguns óleos, muitos solventes, ácidos e outros produtos químicos são algumas das características inerentes dos pneus. As características físicas incluem sua não biodegradabilidade, não toxicidade, peso, forma e elasticidade. No entanto, muitas das características, que são benéficas durante sua vida na estrada como produtos de consumo são desvantajosos em sua vida pós-consumo e podem criar problemas de coleta, armazenamento e / ou descarte.

Do ponto de vista da estrutura, a Figura 2.1 ilustra os principais constituintes dos pneus automotivos. Em geral, os pneus para veículos de passeio, a partir dos quais é obtida grande parte da borracha moída utilizada na modificação dos ligantes asfálticos, são constituídos pelas seguintes partes:

- borracha da banda de rolamento e da parede lateral: parte do pneu que entra diretamente em contato com o pavimento, oferecendo grande resistência ao desgaste;
- tiras de aço ou cinturões de aço (aço circunferencial e inextensível) dos pneus radiais necessários para a estabilização da carcaça;
- tiras de nylon ou carcaça de lona: composta de fibras de nylon ou poliéster, formando a parte resistente do pneu;

- aro de aço: são constituídos por arames de aço de grande resistência e tem por finalidade manter o pneu acoplado firmemente ao aro;
- reforço: são constituídos por um composto de borracha de alto grau de flexibilidade, tendo por objetivo proteger a carcaça contra os agentes externos.



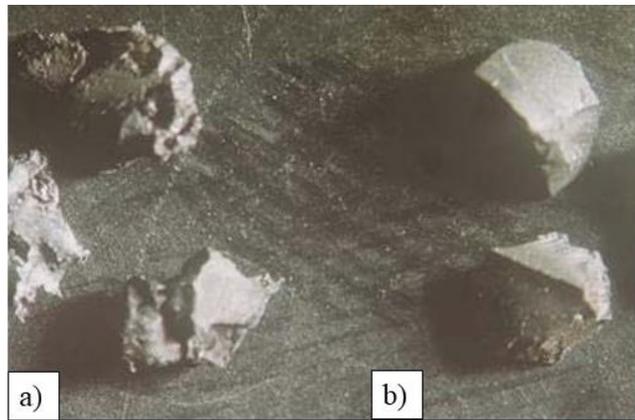
**Figura 2.1**-Partes constituintes dos pneus automotivos (modificado-Michelan, 2003).

### 2.2.2 Processos de obtenção de BMP

Os processos convencionais para obtenção da BMP utilizada na modificação dos ligantes asfálticos são a moagem em temperatura ambiente e trituração com emprego de técnicas criogênicas. O processo de moagem à temperatura ambiente consiste em rasgar e cortar os pneus usados em um conjunto de moinhos ou granuladores, peneiras, esteiras de transporte e vários tipos de ímãs para remover o aço existente nas carcaças. O processo de separação criogênica da borracha é realizado em temperaturas extremamente baixas ( $-87^{\circ}\text{C}$  a  $-198^{\circ}\text{C}$ ) por meio da aplicação de um banho de nitrogênio líquido às carcaças dos pneus usados. Sob temperaturas muito baixas, a borracha torna-se muito frágil e pode ser triturada facilmente em uma prensa, na granulometria desejada. Em geral, as partículas da BMP resultantes têm superfície específica menor do que aquelas de mesma distribuição granulométrica obtidas pelo processo de moagem à temperatura ambiente (RPA, 2011).

De acordo com a ASTM 6114, a borracha utilizada para modificar o ligante deve ter no máximo 0,75% de umidade, massa específica de  $1,15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05$  e possuir no máximo 0,01% de metais. A quantidade de fibra tolerável para ligantes de concretos asfálticos é inferior a 0,5% em massa e, no caso de ligante para aspersão, o valor aceitável é 0,1%. É permitido adicionar até 4 % de material inerte fino (talco, por exemplo) para prevenir o empolamento das partículas de borracha.

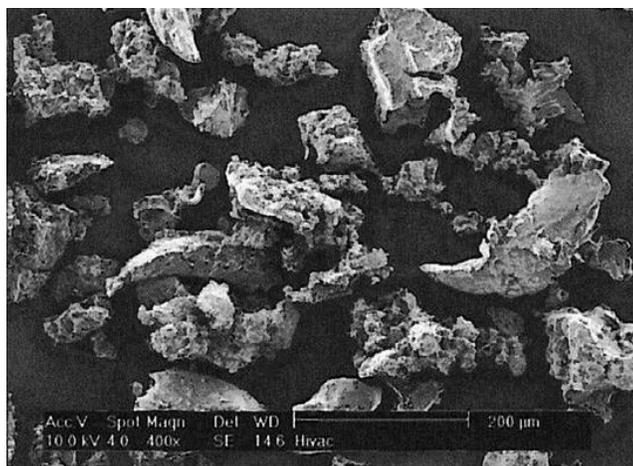
Segundo Dantas Neto (2004), as principais diferenças observadas entre a borracha obtida pelo processo de moagem em temperatura ambiente e aquela obtida pelo processo criogênico são em termos de superfície específica e forma dos grãos, como mostra a Figura 2.2. Pode ser observado que a borracha “b” apresenta grãos com formas mais regulares do que os grãos da borracha “a” e conseqüentemente menor superfície específica para a mesma distribuição granulométrica, como é o caso.



**Figura 2.2-**Diferença entre a forma dos grãos da borracha obtida pelo a) processo de moagem e pelo b) processo criogênico (modificado-Dantas Neto, 2004)

Além das técnicas convencionais de moagem a temperatura ambiente e o processo criogênico, Memon (2011) e LoPresti (2013) descrevem outros processos patenteados, menos comuns, atualmente em uso para reduzir o pneu a um pó fino para ser usado como BMP. Um destes processos é a moagem úmida (*wet-grinding*) em que pequenas partículas de borracha são ainda mais reduzidas por moagem em um meio líquido, geralmente em água. A moagem é realizada entre dois rebolos pouco espaçados. A BMP obtida é usada principalmente como modificador de ligante asfáltico. Na redução do tamanho por hidrojato (*hydro jet size reduction*) o

pneu é processado em partículas mais finas com a ajuda de água pressurizada. Jatos de água em alta pressão (cerca de 55.000 psi) giram em configurações de alta velocidade, produzindo BMP. No entanto, o protocolo do processo é relativamente novo e ainda desconhecido para a maioria da indústria. Ainda assim, o alto nível de aspereza da BMP resultante a torna muito atraente para a modificação do ligante asfáltico. Na Figura 2.3 exemplifica-se uma análise microscópica da BMP por meio do processo patenteado *hydro jet size reduction*.



**Figura 2.3**-Resultado da BMP obtida pelo processo de redução por hidrojato (Memon *apud* LoPresti, 2013)

Oliver (1981) estudou a BMP produzida por moagem em temperatura ambiente, polimento, raspagem e moagem criogênica. O autor concluiu que as partículas de borracha com superfície porosa, de baixa densidade aparente, implicam no processo de digestão do asfalto-borracha com alta recuperação elástica, enquanto partículas angulares de face lisa, de alta densidade aparente, implicam em uma digestão pobre em propriedades elásticas. Mesmo quando finamente moída (25% passando pela peneira nº 200) pelo processo criogênico, as partículas apresentaram digestão insatisfatória no processo de produção do asfalto-borracha.

Dantas Neto (2004) estudou a influência do tipo da BMP nas propriedades físicas dos ligantes asfalto-borracha. Segundo o autor a redução na superfície específica da borracha obtida pelo processo criogênico faz com que a absorção das frações leves existentes no ligante asfáltico convencional pelas partículas de borracha ocorra de maneira menos intensa. Assim, diminuem a viscosidade rotacional e o ponto de amolecimento dos asfaltos-borracha produzidos, quando comparados com aqueles fabricados com a borracha obtida pelo processo de moagem a temperatura ambiente.

Specht (2004) analisou as características e desempenho mecânico de ligantes modificados com borracha e de misturas produzidas pelo processo úmido e pelo processo seco. Os resultados obtidos demonstraram a superioridade tanto dos ligantes modificados quanto das misturas asfálticas preparadas com tais ligantes. Em relação ao processo seco o autor descreve a melhoria das características de resistência à fadiga e ao trincamento térmico, devido à menor sensibilidade a variações de temperatura.

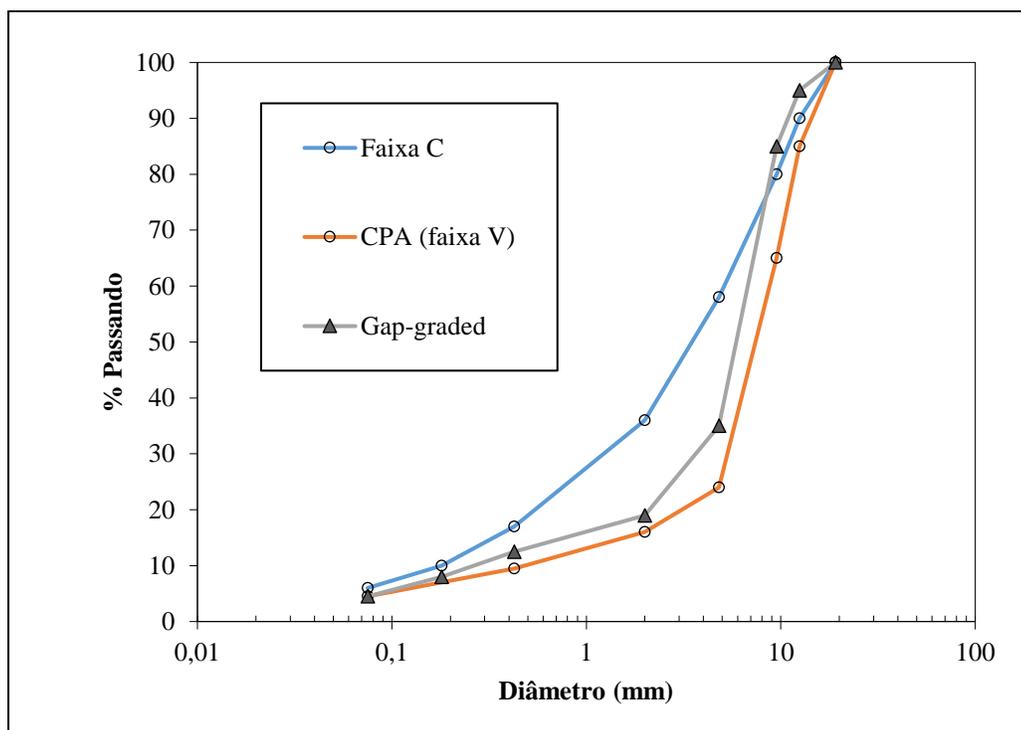
### **2.2.3 Granulometrias utilizadas em misturas asfalto-borracha**

Os pavimentos asfálticos são compostos por diferentes tipos de agregados que são incorporados na mistura podendo apresentar uma distribuição granulométrica densa ou descontínua. São consideradas contínuas ou bem graduadas as misturas que apresentam distribuição granulométrica sem o predomínio ou ausência de material em qualquer fração. Já misturas descontínuas possuem um desequilíbrio em certos tamanhos de partículas (Pinheiro, 2004). Na Tabela 2.3 são exibidas as faixas das distribuições granulométricas do DNIT para graduação contínua (norma DNIT 031/2006 – ES), descontínua aberta (norma DNER – ES 386/99, *open-graded* ou Camada Porosa de Atrito – CPA) e graduação descontínua densa (norma DNIT 112/2009 – ES, *gap-graded*). Na Figura 2.4 são apresentadas as respectivas curvas de distribuição granulométrica.

Observando a Tabela 2.3 e a Figura 2.4, percebe-se que a graduação densa representada pela Faixa C apresenta a curva granulométrica contínua e bem graduada, o que proporcionará um esqueleto mineral com poucos vazios. Por outro lado, as graduações descontínuas concentram a maior parte da granulometria em agregados de maiores dimensões. Na CPA, além da insuficiência de material fino, a curva apresenta uma característica de distribuição quase que uniforme de agregados graúdos, formando um esqueleto mineral com muitos vazios, o que a torna uma camada drenante. Na mistura descontínua densa a curva granulométrica é predominantemente constituída de agregados graúdos, apresentando algumas frações intermediárias e pouca presença de material fino. Este arranjo de partículas proporciona robustez na composição da mistura asfáltica, apresentando um bom desempenho estrutural, com menor número de vazios em relação à CPA.

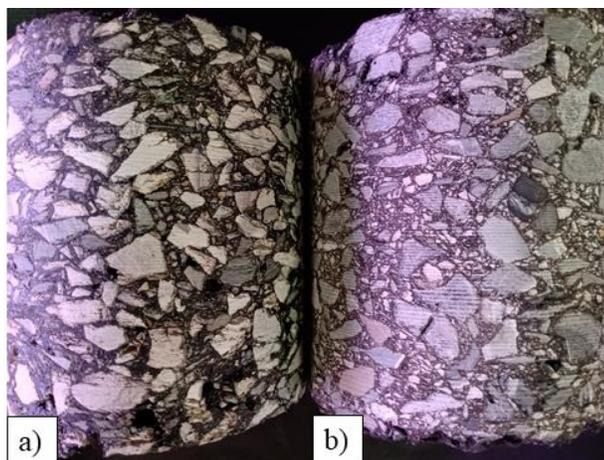
**Tabela 2.3** – Centro das faixas de distribuições granulométricas do DNIT para mistura densa (Faixa C), mistura descontínua aberta – CPA (Faixa V) e mistura descontínua densa (*Gap-graded*).

Tamanho da malha		Valores da média entre limites mín e máx do DNIT (%)					
(")	(mm)	Faixa C		CPA (Faixa V)		<i>Gap-graded</i>	
		Passando	Retido	Passando	Retido	Passando	Retido
3/4"	19,1	100	-	100	-	100	-
1/2"	12,5	90	10	85	15	95	5
3/8"	9,5	80	10	65	20	85	10
N° 4	4,75	58	22	24	41	35	50
N° 10	2	36	22	16	8	19	16
N° 40	0,42	17	19	9,5	6,5	12,5	6,5
N° 80	0,18	10	7	-	-	8	4,5
N° 200	0,075	6	4	4,5	5	4,5	3,5



**Figura 2.4** - Comportamento visual das curvas das granulometrias para mistura densa (Faixa C), mistura descontínua aberta – CPA (Faixa V) e mistura descontínua densa (*Gap-graded*).

Na Figura 2.5 é apresentada a diferença visual da distribuição dos agregados nas misturas asfálticas de granulometrias (a) descontínua e (b) densa. É perceptível a concentração de agregados de maiores dimensões e menor incidência de material fino na mistura descontínua.



**Figura 2.5-**Diferentes misturas asfálticas com distribuição granulométrica: a) descontínua e b) densa.

Nos projetos de misturas asfálticas é desejada uma distribuição de agregados que resulte em maior intertravamento do esqueleto mineral. Devido às partículas de borracha, notou-se que o ligante AB proporcionaria uma maior espessura do filme de ligante. Desta forma, observou-se a necessidade de ajustar a granulometria do agregado, para se ter uma grande quantidade de Vazios no Agregado Mineral (VAM).

Segundo a RPA (2011) o consumo de ligante AB em misturas com granulometrias descontínuas é maior do que o consumo de ligante convencional. Por exemplo, a mistura descontínua densa pode apresentar teor de projeto entre 7 e 9% de ligante AB, em massa de mistura, enquanto uma mistura convencional densa com ligantes não modificados apresenta geralmente teores de projeto entre 4,5 e 5,5%. Uma mistura descontínua aberta pode apresentar teores de projeto entre 9 e 10% de ligante AB, enquanto a mesma projetada com ligante convencional poderá conter um teor de projeto de aproximadamente 6%.

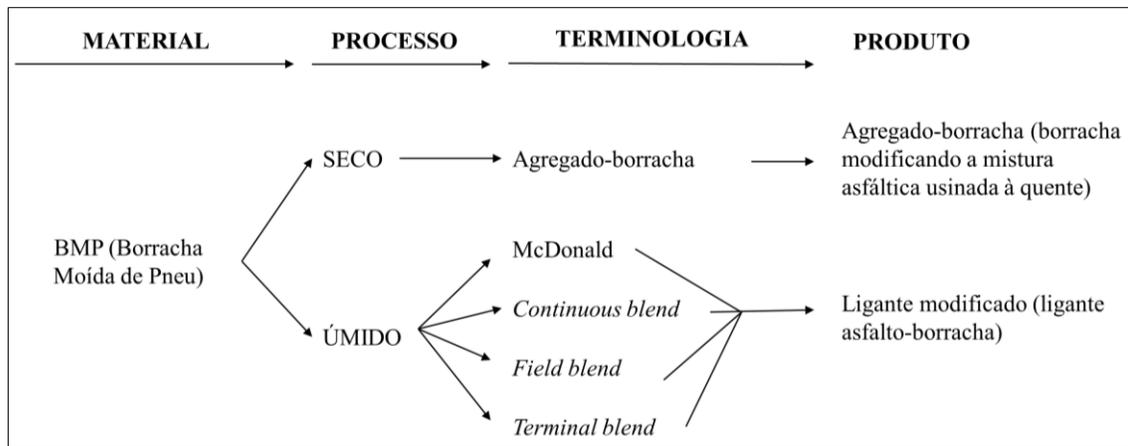
Embora ligantes modificados com borracha melhorem o desempenho de misturas asfálticas em geral, verificou-se que granulometrias descontínuas do tipo densa e aberta são mais adequadas para produzi-las, melhorando significativamente suas características de desempenho em comparação com misturas de granulometria contínua densa (Harvey *et al.*, 2001; Kaloush, 2014; Nadkarni *et al.*, 2009; Putman e Amir Khanian, 2004; Saha e Biligiri, 2015; Xiao *et al.*, 2007; Way *et al.*, 2012b).

Kaloush *et al.* (2002) destacam que as misturas AB usinadas à quente, geralmente são misturas do tipo descontínuas densas (*gap-graded*) ou descontínuas abertas (*open-graded*). A mistura descontínua densa contém cerca de 7,5% de ligante AB e é comumente aplicada como camada estrutural final apresentando de 25 a 50 mm de espessura. A mistura descontínua aberta contém geralmente 9% de ligante AB e é aplicada como a camada de desgaste final com 12,5 a 25 mm de espessura.

Segundo a Caltrans (2003), as misturas descontínuas densas proporcionam uma superfície de pavimento durável e flexível com resistência a reflexão de trincas, afundamento de trilha de roda e oxidação, boas características de atrito devido à textura da superfície fornecida pela granulometria e, muitas vezes, redução do ruído do tráfego. A mistura atua como uma camada estrutural no pavimento. As misturas descontínuas abertas, são utilizadas como camadas de desgaste e possuem um elevado volume de vazios (15% a 25%) quando comparadas com misturas convencionais. Este elevado volume de vazios resulta em uma elevada permeabilidade, reduzindo os efeitos de projeção de água, permitindo o escoamento rápido sobre a via e reduzindo os riscos de hidroplanagem.

#### **2.2.4 Processos de incorporação de BMP a misturas asfálticas**

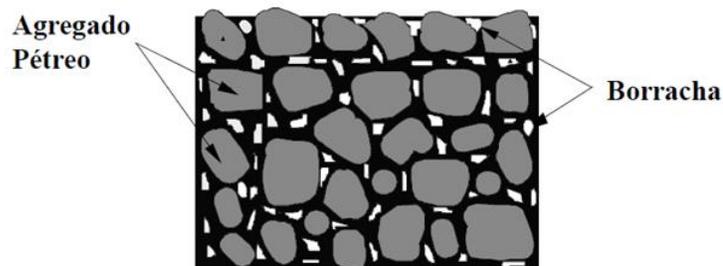
A BMP pode ser adicionada ao concreto asfáltico como parte dos agregados ou como um agente modificador do ligante asfáltico. O tamanho, a forma e a textura da BMP necessários variam a depender da aplicação proposta (Heitzman, 1992). Diversos estudos abordam os processos e as tecnologias empregadas durante a produção de misturas modificadas com borracha, classificando sua obtenção em dois processos principais: seco e úmido (Heitzman, 1992; Bahia e Davis, 1994; Epps, 1994; Abdelrahman e Carpenter, 1999; Visser e Verhaeghe, 2000; Takallou e Takallou, 2003). A Figura 2.6 mostra a relação entre os processos empregados e as terminologias na adição de BMP em misturas asfálticas usinadas à quente.



**Figura 2.6-** Relação entre as tecnologias e terminologias na utilização de BMP como modificadora da mistura asfáltica (modificado-Epps, 1994).

### 2.2.4.1 Processo seco ou via seca

O processo seco, também chamado de asfalto-borracha de 1ª geração e ainda agregado-borracha, define qualquer método de adicionar BMP diretamente na mistura usinada a quente, normalmente pré-misturando a BMP com o agregado aquecido antes de adicionar o ligante asfáltico. Segundo Bertollo (2002) a borracha adicionada deve substituir no máximo 3% do peso total dos agregados, e pode ser adicionada em misturas de granulometrias densas ou descontínuas a depender do tamanho dos grãos de borracha incorporados. Na Figura 2.7 é apresentada a disposição da BMP após a adição na mistura asfáltica.



**Figura 2.7-** Processo seco de incorporação de BMP em misturas asfálticas (Bertollo, 2002).

O método de incorporação pelo processo seco não requer a instalação de equipamentos especiais ou mudanças significativas na usina, porém a interação entre o concreto asfáltico e a

BMP não representam melhorias significativas nos aspectos de desempenho mecânico da mistura (Heitzman, 1992). Visser e Verhaeghe (2000) afirmam que no processo seco não ocorre a fusão do ligante com a borracha incorporada e Takallou e Takallou (2003) defendem que a borracha tem função de aditivo e não de um agente modificador. Desta forma, os autores defendem que o termo asfalto-borracha para denominar o processo seco é inapropriado.

Segundo Takallou *et al.* (1990), a adição de um tipo de BMP distribuído comercialmente na Suíça e no Estados Unidos, foi considerado uma nova forma de controle de gelo no inverno devido à maior flexibilidade e ação de partículas de borracha salientes. Nos resultados, os autores observaram que para aplicações em regiões frias: (1) houve melhoria na resistência à fissuração por tração induzida por carga e trincamento térmico; (2) resistência à derrapagem melhorada em condições de gelo; (3) boa resistência a pneus com tachas e/ou correntes; e (4) redução dos níveis de ruído dos pneus.

Salini (2000) avaliou o desempenho de uma composição granulométrica contínua densa (Faixa C) variando-se as quantidades de ligante asfáltico e BMP, segundo o processo seco. A metodologia empregada resultou em significativa melhoria do desempenho estrutural da mistura asfáltica modificada com BMP quando comparada com uma mistura de referência (sem borracha) apresentando valores de módulo resiliente inferiores, vida de fadiga menos susceptível às solicitações impostas pelo tráfego (inclinação da curva) e valores de números de ciclos sempre superiores aos da mistura de referência.

No trabalho de Bertollo (2002), as misturas modificadas com borracha apresentaram menores valores de módulo de resiliência, influenciado pela granulometria e teor de borracha, e de resistência à tração, influenciada apenas pelo teor de borracha. A autora conclui que a utilização de BMP pelo processo seco melhorou o desempenho em termos de resistência à deformação permanente (simulador de tráfego tipo LCPC) quando comparada à mistura de controle.

Pinheiro (2004) estudou o comportamento mecânico de misturas asfálticas de granulometria contínua densa com a substituição de 2,5 %, em peso da mistura, do agregado mineral por BMP em 3 diferentes granulometrias: 2,0 a 1,2 mm; 0,42 a 0,075 mm e 2,0 a 0,075 mm. Foram avaliados os efeitos do tempo de digestão e do tamanho das partículas de BMP. Os resultados apontaram para a importância do tempo de digestão no processo seco e mostram que as misturas

com borracha possuem valores menores de resistência à tração e módulo de resiliência e maior vida de fadiga para baixos níveis de tensão, quando comparados a uma mistura convencional.

Dantas Neto (2004) estudou a incorporação BMP em misturas de graduação contínua densa (Faixa C). Os resultados encontrados pelo autor mostraram que ocorre uma redução no módulo resiliente, na resistência à tração e na resistência às deformações permanentes destas misturas em relação àquelas confeccionadas com o ligante AB. O autor avalia que as eventuais reações entre as partículas de borracha granulada e o ligante convencional que ocorrem no processo seco, possivelmente dependem da granulometria da borracha utilizada. A utilização de um granulado de borracha com elevada superfície específica (partículas de pequenas dimensões) aumenta a área de contato ligante-borracha, favorecendo as reações entre estes materiais durante pequenos intervalos de tempo, e sob temperaturas relativamente baixas quando comparadas àquelas utilizadas no processo úmido.

Embora a adição de BMP por via seca seja uma técnica simples de modificação da mistura asfáltica e que apresenta melhorias em seu comportamento, a fragilidade do método consiste no entrosamento limitado entre a borracha e o ligante. A interação entre estes componentes está diretamente ligada a granulometria, a superfície da borracha e o tempo de preparo da mistura. Estes são aspectos que comprometem a simplicidade do método, adicionando custos e maior controle tecnológico de execução. Além disso, é preciso considerar que a mistura produzida segundo o processo seco responderá de maneira diferente aos fenômenos de fadiga e deformação permanente, sofrendo influência dos fatores de tráfego e clima. Se por um lado, em baixas temperaturas a mistura apresentará um bom desempenho à fadiga devido ao ganho de componentes elástica, por outro lado, em altas temperaturas a baixa interação entre o ligante e a BMP não aumentam a resistência às deformações permanentes.

#### **2.2.4.2 Processo úmido ou via úmida e suas terminologias**

Heitzman (1992) definiu o processo úmido como qualquer método que adiciona a BMP no ligante asfáltico antes de incorporá-lo à mistura asfáltica, produzindo um ligante asfáltico modificado por borracha, ou ligante asfalto-borracha. A ASTM D 6114/09 define o processo úmido que dá origem ao ligante asfalto-borracha como uma combinação de ligante asfáltico, BMP e outros aditivos, caso necessário. A borracha será misturada e interage com o ligante asfáltico aquecido, de forma a causar um inchamento das partículas de borracha. A norma indica

que são necessários pelo menos 15% de borracha, em relação ao peso total do ligante, para proporcionar propriedades aceitáveis de asfalto-borracha. A Tabela 2.4 mostra a classificação dos asfaltos-borracha em função da temperatura do pavimento, em três tipos distintos, denominados como Tipo I, Tipo II e Tipo III.

**Tabela 2.4-**Propriedades físicas dos asfaltos-borrachas segundo a ASTM D 6114/09.

<b>Propriedades físicas</b>	<b>Tipo I</b>	<b>TipoII</b>	<b>Tipo III</b>
Temperatura do pavimento (°C)	-1 a 43	-9 a 43	-9 a 27
Viscosidade rotacional a 175°C (cP)	1500-5000	1500-5000	1500-5000
Penetração a 25°C, 100g, 5s (1/10 mm)	25-75	25-75	50-100
Ponto de amolecimento (°C)	>57	>54	>52
Resiliência, 25°C (%)	>25	>20	>10

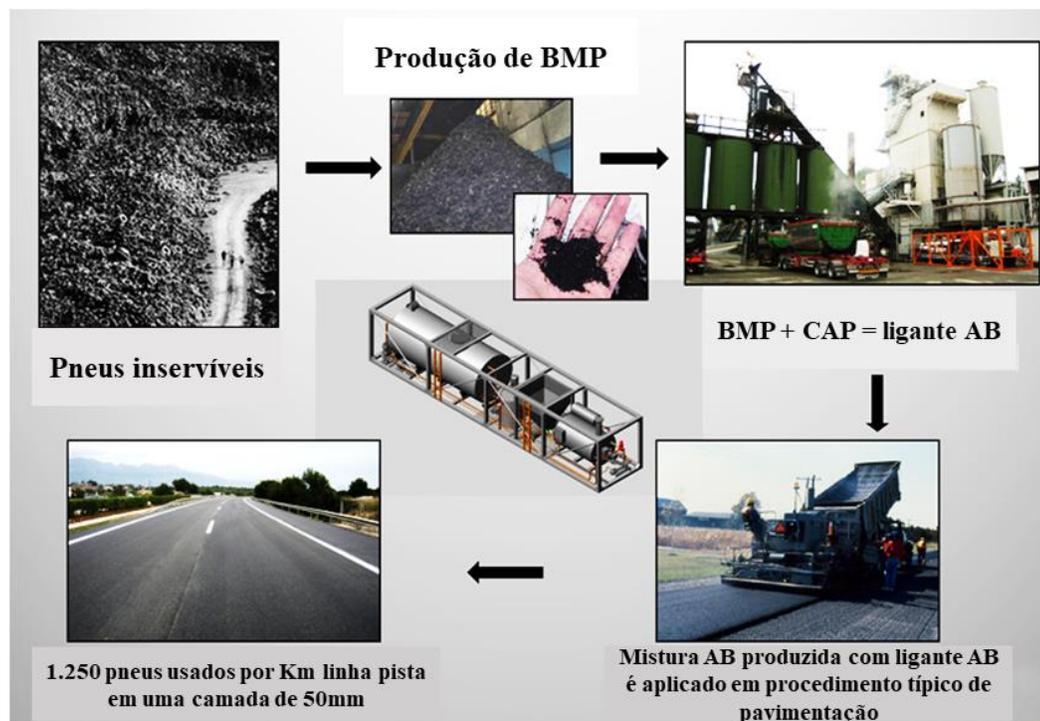
Visser e Verhaeghe (2000) apontam que no processo úmido, o ligante asfáltico é aquecido a temperaturas da ordem de 190°C, em um tanque de superaquecimento em condições herméticas, sendo transportado em seguida, para um tanque de mistura apropriado. No tanque de mistura, ocorre a adição da BMP ao ligante convencional previamente aquecido. A mistura entre o ligante convencional e a borracha granulada, ocorre em um período de 1 a 4 horas a uma determinada temperatura. Este processo é facilitado pela ação de um dispositivo mecânico, geralmente uma palheta giratória horizontal introduzida no tanque de mistura.

As partículas de borracha aumentam de volume devido à absorção de óleos aromáticos contidos no cimento asfáltico, formando um gel viscoso, resultado da redução da distância entre partículas de borracha, aumentando a viscosidade Heitzman (1992). Segundo Specht (2004), em contrapartida, são transferidas para o asfalto algumas características químicas das borrachas vulcanizadas como inibidores de raios ultravioleta e antioxidantes, produzindo assim, um material mais resistente ao envelhecimento e com maior resistência a fissuração, contribuindo para uma maior durabilidade do pavimento.

Airey *et al.* (2003) realizaram estudos sobre a absorção das frações leves pelas partículas de borracha em asfaltos-borracha confeccionados com diferentes ligantes asfálticos convencionais. Os resultados mostram que a absorção das frações leves existentes nos ligantes asfálticos pela borracha aumentou com a percentagem de borracha e com o tempo de interação. Entretanto, a taxa de variação da absorção do ligante diminuiu com o tempo em que a borracha permaneceu em contato com o ligante asfáltico. Ou seja, a partir de certo ponto a borracha se encontra em estado de saturação, não absorvendo mais nenhuma quantidade de compostos voláteis. Além disso, os

autores compararam a presença de asfaltenos e maltenos em amostras de ligante coletadas em diferentes condições: virgem, envelhecidas por 40 horas a 160°C e residuais (coletadas após a interação com a borracha). Os resultados mostraram que o aquecimento dos ligantes convencionais produziu o seu envelhecimento devido à diminuição das percentagens de maltenos e pode-se verificar que esta diminuição foi ainda maior nas amostras residuais, indicando que além da volatilização, outro fator contribuiu para a perda destes componentes, confirmando assim a sua absorção pelas partículas de borracha.

LoPresti (2013) ressalta que o termo processo úmido se refere a toda uma família de tecnologias que varia muito com relação ao processamento escolhido. A interação entre o ligante asfáltico e a borracha é específica e depende de uma série de fatores básicos, incluindo: variáveis de processamento como temperatura, tempo e dispositivo (aplicando agitação /cisalhamento), propriedades do ligante de base (fonte) e eventual uso de óleo extensores, propriedades da BMP (fonte), métodos de processamento, tamanho de partícula e composição. Na Figura 2.8 é apresentado esquematicamente, maneira generalizada, as etapas envolvidas na produção de misturas AB pelo processo úmido.



**Figura 2.8-**Esquema representando a produção de ligante AB por meio do processo úmido (modificado-LoPresti, 2013).

## **McDonald**

Processo úmido original proposto por Charles McDonald na década de 60. Consiste na mistura de ligante asfáltico e BMP (15 a 25% em relação ao peso de ligante), a uma temperatura elevada (170 a 200°C), durante determinado tempo (20 a 120 minutos). A mistura reage e forma um composto denominado asfalto-borracha, com propriedades reológicas diferentes do ligante original, podendo ser incorporado aditivos para ajustar a viscosidade da mistura (Epps, 1994).

### ***Continuous blend***

Desenvolvido em 1989 na Flórida, neste processo as partículas finas de borracha são adicionadas ao ligante asfáltico em um processo contínuo. Essa tecnologia difere do processo McDonald em vários aspectos: são adicionados menores teores de borracha (8 a 10%), as partículas de borracha são mais finas e a temperatura durante a mistura e tempo de reação são menores (Epps, 1994).

### ***Field blend***

As misturas AB são normalmente produzidas na usina de asfalto incorporando algumas modificações à estrutura existente. As modificações incluem a introdução / adaptação de tanques de mistura aquecidos, tanques de reação aquecidos, alimentação e armazenamento de borracha (Heitzman, 1992). LoPresti (2013) comenta é possível uma modificação menos drástica na usina, instalando uma unidade portátil de mistura e tanque de reação, tipicamente um reboque montado e transportado para o local, baseada no sistema McDonald, para obter o ligante AB e com isso a posterior produção da mistura AB em uma planta de asfalto.

A unidade de mistura recebe a BMP na tremonha, que em seguida, move-se para o tanque de mistura para ser combinado com o ligante asfáltico convencional, o ligante AB resultante é armazenado no tanque de reação portátil. Uma vez reagido, o ligante AB é movido para um segundo compartimento que serve de alimentação para a planta de mistura asfáltica, sendo incluído na produção da mistura AB. Ao final, a mistura AB pode ser executada em equipamentos convencionais de pavimentação. Na Figura 2.9 é apresentada uma unidade portátil de produção de ligante AB.



**Figura 2.9-** Unidade portátil de produção de ligante AB (modificado-[www.dgroadmachinery.com](http://www.dgroadmachinery.com) 2021).

Além de analisar o comportamento de misturas contínuas modificadas com BMP pelo processo seco, Dantas Neto (2004) realizou um extenso estudo sobre a produção de ligante AB em laboratório em que foram averiguados a porcentagem e o tipo de borracha, a temperatura de fabricação e o tempo de mistura empregados na obtenção dos ligantes tendo por base o ligante convencional CAP 50/70. Segundo o autor, os ligantes AB na confecção das misturas asfálticas de graduação contínua e descontínua produziu, em relação às misturas asfálticas convencionais, o aumento do módulo resiliente, da resistência ao trincamento por fadiga e da resistência às deformações permanentes, além da diminuição do ângulo de fase. O autor concluiu que misturas AB apresentaram melhores características de deformabilidade e desempenho estrutural significativamente superior às misturas asfálticas convencionais.

Camargo (2016) analisou as propriedades reológicas de um asfalto-borracha, produzido segundo o processo *field blend* e comparou suas características com as de ligantes típicos empregados no Brasil (ligante CAP 30/45 e ligante modificado com SBS). O autor realizou ensaios laboratoriais de fadiga e deformação permanente nos ligantes e em uma mistura asfáltica de graduação descontínua densa (*gap-graded*). Os bons resultados de desempenho dos ensaios de laboratório corroboraram aos resultados obtidos com ensaios de campo, em um trecho

experimental da RJ-122, local em que a tecnologia asfalto-borracha, produzido segundo esta terminologia, foi utilizada pela primeira vez no país.

### ***Terminal blend***

A Caltrans (2003) define o processo *terminal blend* como uma modificação do processo úmido em que a borracha granulada é incorporada ao ligante asfáltico na própria refinaria. No sistema *terminal blend* também chamado de asfalto-borracha de 3ª geração, a modificação do asfalto convencional não requer agitação contínua para manter as partículas de borracha dispersas no ligante modificado devido a presença de aditivos. Este fato resulta em um produto uniforme e estável, não havendo a separação de fases durante o armazenamento. Assim pode ser produzido em uma planta e posteriormente transportado para a obra, permitindo sua estocagem prolongada.

Embora o processo terminal não necessite equipamentos específicos acoplados diretamente durante a fase de usinagem, segundo Takallou e Takallou (2003) o processo de incorporação por via terminal caracteriza-se por utilizar uma quantidade de borracha geralmente inferior àquela empregada no processo úmido. Além disso, a quantidade reduzida de borracha de pneu e a introdução de óleos extensores na mistura fazem com que o desempenho desta seja reduzido quando comparado ao de misturas obtidas pelo processo úmido.

Oda (2000) avaliou os diferentes fatores que influenciam na produção do asfalto-borracha como o tipo e o teor de ligante; o tipo, teor e tamanho das partículas de borracha; a temperatura e o tempo de reação e a presença de diluente. A autora ensaiou os ligantes produzidos conforme as metodologias tradicionais (penetração, ponto de amolecimento, ponto de fulgor, viscosidade Saybolt-Furol e Ductilidade) e ensaios preconizados pela metodologia Superpave (viscosidade rotacional, cisalhamento dinâmico, envelhecimento de curto e longo prazo e rigidez à fluência na flexão). A autora concluiu que o principal efeito é dado segundo o teor de borracha adicionado, além disso, que o ligante asfalto-borracha pode aumentar a resistência ao acúmulo de deformação permanente e ao aparecimento de trincas por fadiga do revestimento.

Pinheiro (2004) verificou a aplicação de ligante AB, segundo a terminologia *terminal blend*, produzido em laboratório e fornecido comercialmente, em diferentes curvas granulométricas de misturas contínuas densas e descontínuas (densa e aberta). O autor variou ainda os teores de ligante AB, a granulometria da BMP incorporada ao ligante, as temperaturas e os tempos de

reação. As misturas descontínuas mostraram-se superiores às contínuas, quando o mesmo ligante com 20% de borracha foi utilizado. As misturas contínuas tiveram seu comportamento mecânico melhorado com o emprego do ligante AB menos viscoso, ou seja, com um teor menor de borracha. Já para as misturas abertas, a alta viscosidade do ligante melhorou as propriedades coesivas das misturas asfálticas.

Faxina (2006) observa que é desejável que o ligante asfáltico empregado no processo úmido em terminal contenha uma concentração relativamente alta de frações leves, o que pode ser obtido pela adição de óleos extensores ou pela seleção de ligantes asfálticos de menor consistência. Em ambos os casos, é possível compensar o aumento da viscosidade provocado pela adição da borracha, assim como proporcionar óleos aromáticos em quantidade suficiente para promover a reação entre a borracha e o ligante asfáltico, sem remover componentes essenciais do ligante asfáltico de base.

Fontes (2009) avaliou o comportamento quanto ao módulo, fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas de granulometrias contínua e descontínua com aplicação de asfalto-borracha segundo a terminologia *continuous blend* e *terminal blend*. De acordo com a autora, os resultados mostraram que, em relação a uma mistura convencional, produzida com ligante convencional, a incorporação da borracha no ligante produz melhorias consideráveis em termos de comportamento elástico e aumento da resistência à fadiga e da resistência à deformação permanente, além da capacidade de retardar a propagação de trincas.

### **2.3 REACTED AND ACTIVATED RUBBER - RAR**

Como visto, a fabricação de asfalto-borracha requer instalação de equipamentos específicos na usina, com elevada temperatura e demasiado tempo de mistura. Neste sentido, a tecnologia de grânulos de borracha pré-ativados, *Reacted and Activated Rubber* (RAR), foi desenvolvida com a proposta de simplificação do processo de usinagem (como o realizado na mistura AB obtida pela via seca) e obtenção de desempenho da mistura AB superior (como a mistura AB obtida por via úmida definida como *field blend*), além da utilização de uma maior porcentagem de borracha e um processo de mistura a temperaturas mais baixas.

Chavez *et al.* (2019) denominaram a utilização da RAR na produção de misturas asfálticas como um processo de produção de AB semi-úmido uma vez que a BMP é submetida a um pré

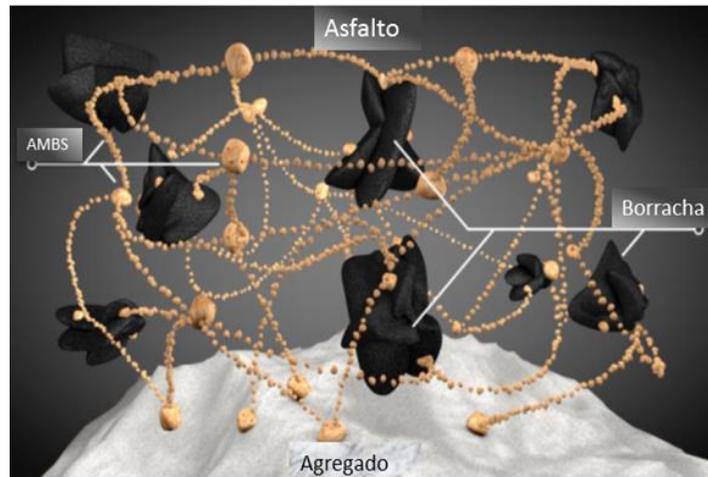
tratamento, em uma etapa de digestão prévia, como ocorre na produção do ligante AB por via úmida (*field blend*) sendo adicionada na produção da mistura asfáltica como um material seco.

A RAR é composta por asfalto convencional, granulado fino de borracha (usualmente passando na peneira N° 30) e por material de enchimento (fíler) em porcentagens devidamente otimizadas (Ishai *et al.*, 2011). Geralmente, RAR consiste em cerca de 62 a 65% de borracha moída, 20 a 25% de asfalto convencional e 15 a 20% de fíler. Durante a produção o CAP utilizado apresenta característica de menor rigidez, permitindo uma melhoria na viscosidade que garantem a trabalhabilidade dos ligantes mesmo em caso de utilização de maior teor de borracha (Shah, 2018). Na Figura 2.10 são apresentados os constituintes da RAR.



**Figura 2.10-** Constituintes da RAR a) asfalto, b) granulado de borracha e c) material de enchimento (*filler*) (modificado-Sousa *et al.*, 2012).

A obtenção da RAR ocorre devido à presença de diferentes interações entre os componentes da mistura. Inicialmente ocorre a atração eletrostática entre as cadeias de carbono do asfalto e os íons metálicos do material de enchimento, tal interação cria uma malha com grande caráter apolar, favorecendo então a aproximação e consequente interação hidrofóbica entre o asfalto e a borracha. Segundo Sousa *et al.* (2012) a RAR é igualmente envolvida com uma fórmula especial de fíler que uma vez dispersa no asfalto também se interliga ela própria aos agregados. Esta interligação melhora a adesividade entre o asfalto e o agregado reduzindo a sensibilidade à água. Desta forma a nova rede interliga os agregados, o asfalto, a borracha e as partículas de fíler, como pode ser visualizado na Figura 2.11.



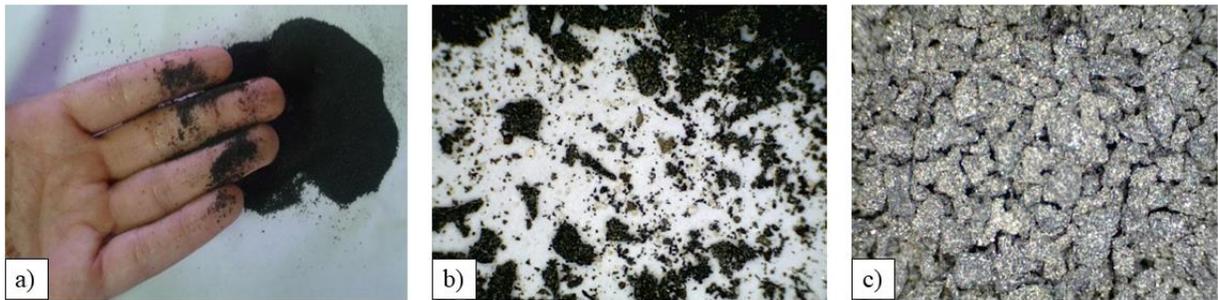
**Figura 2.11-** Modelo sugerido para descrever a estrutura e comportamento da RAR como modificadora do asfalto (modificado-Sousa *et al.*, 2012).

Sousa *et al.* (2012) definem como componente do fíler da RAR um material descrito como *Activated Mineral Binder Stabilizer* (AMBS) ou estabilizador de ligante mineral ativo. Este material, segundo os autores, consiste em micro-partículas de sílica mineral (dimensão igual ou inferior a 40  $\mu\text{m}$ ), as quais são resíduos da mineração de fosfato. A ativação, realizada pelo envolvimento nano-monomolecular das partículas, é efetuada para que o ligante adquira propriedades de tixotropia com redução da rigidez por cisalhamento, uma vez que o mástique presente na mistura deve ter elevada viscosidade em repouso.

Os avanços obtidos com a utilização da RAR na produção de misturas asfálticas a quente remontam a pesquisas realizadas com o AMBS, que foi desenvolvido para evitar o escorrimento excessivo do ligante em misturas do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA), durante o transporte, armazenamento e aplicação. Os resultados das pesquisas mostraram que a substituição das fibras de celulose por AMBS em misturas do tipo SMA ocasionaram muitos efeitos positivos em indicadores de desempenho, como resistência ao dano por umidade induzida, ao desgaste Cantabro, à deformação permanente, ao trincamento térmico e aumento na vida de fadiga (Wu *et al.*, 2012).

Nunes (2017) destaca as vantagens de logística no transporte e produção, pelo fato do material poder ser armazenado de forma ensacada em grandes quantidades, não depender instalações específicas na planta de usinagem e não necessitar aquecimento prévio. A possibilidade de armazenamento e facilidade no transporte, contribuem para diminuir o

desperdício de massa asfáltica devido à logística no tempo de entrega e aplicação da mistura em campo. A Figura 2.12 apresenta a visualização da RAR em diferentes escalas, pronta para o uso.



**Figura 2.12-** Visualização dos grânulos de RAR: a) a olho nu, b) e c) através de uma lupa com capacidade de ampliação de até 200 vezes.

Sousa *et al.* (2012) ressaltam que a RAR pode ser adicionada a qualquer tipo de mistura asfáltica usinada a quente e orientam sobre as seguintes utilizações em substituição de parte da massa de ligante asfáltico contido nos diferentes tipos de misturas:

- (i) Misturas densas: até 20% do teor de ligante da mistura;
- (ii) Misturas SMA: até 30% do teor de ligante da mistura;
- (iii) Misturas descontínuas: até 40% do teor de ligante da mistura;
- (iv) Misturas abertas: até 50% do teor de ligante da mistura.

Sousa *et al.* (2012) comentam que há um melhoramento significativo das propriedades do ligante que pode ser observado quando a adição de RAR é superior a 15 %. Além disso, os autores também ressaltam que existe certa quantidade de adição do material a partir do qual não haverá ligante disponível na mistura de forma suficiente para envolver adequadamente os agregados, ou a viscosidade se torna demasiadamente elevada. Ainda segundo os autores, tal fato ocasiona um aumento do Volume de Vazios (Vv) e de Vazios no Agregados Minerais (VAM) na mistura compactada, para além dos limites aceitáveis, podendo ocorrer ainda um envolvimento parcial dos agregados.

Encontros da comunidade que se dedica às pesquisas com utilização de asfalto borracha intituladas de *Rubberized Asphalt Rubber - RAR Conferences* ou conferência do asfalto emborrachado ou ainda conferência do asfalto-borracha, ocorrem desde o ano 2000 e podem ser mencionados diversos estudos sobre a aplicação do material RAR em misturas asfálticas nas escalas campo e laboratório (Manica *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2018; Shah *et*

*al.*, 2018; Alsaad *et al.*, 2018). No Brasil, os trabalhos de Nunes (2017) e Lopes *et al.* (2021) que são pesquisas da autora desta tese, representam a primeira aplicação do material em pesquisa de misturas asfálticas desenvolvidas em laboratório.

## 2.4 COMPORTAMENTO DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

As misturas asfálticas são sensíveis à temperatura, à amplitude de deformação e ao número de ciclos (Olard *et al.*, 2005, Mangiafico, 2014). Segundo Christensen *et al.* (2003) os materiais que possuem o comportamento viscoelástico estão fora do escopo de teorias como a elasticidade linear e a viscosidade. Na Equação 2.1 é mostrada a relação linear e proporcional da tensão e da deformação, segundo a Lei de Hooke em uma dimensão para os materiais elásticos.

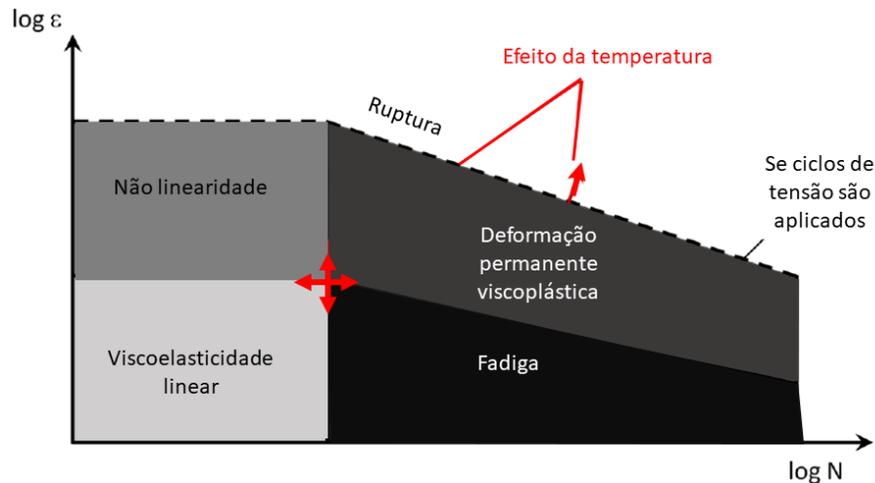
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2.1)$$

onde  $\varepsilon$  e  $\sigma$  são respectivamente as deformações e tensões uniaxiais, e  $E$  o módulo de Young.

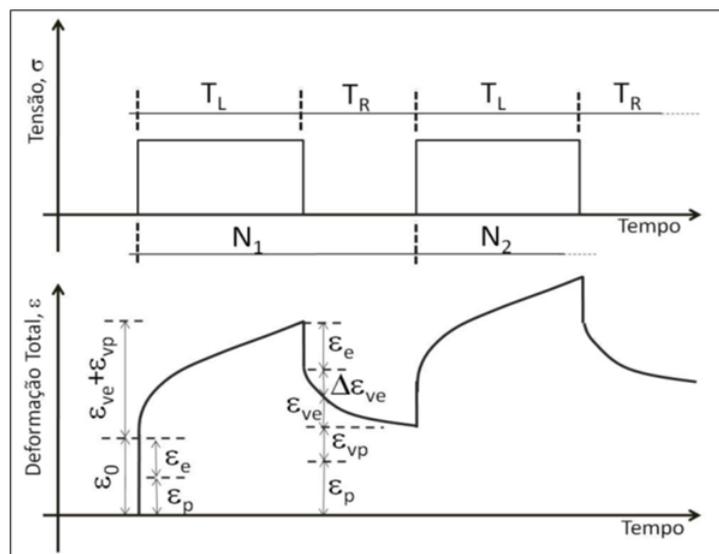
Mangiafico (2014) explica que se a um ligante ou mistura asfáltica são submetidos a uma deformação de pequena amplitude (domínio de "pequena deformação") por um número relativamente baixo de ciclos, o comportamento pode ser assumido como o de um material viscoelástico linear (linear viscoelastic - LVE). Em temperaturas muito baixas, abaixo de sua temperatura de transição vítrea  $T_g$ , o aspecto viscoso de seu comportamento mecânico pode ser desprezado (portanto, pode ser assumido como um material elástico linear). No entanto, se uma pequena deformação for aplicada por um número relativamente alto de ciclos, pode ocorrer fadiga, levando à ruptura. Caso o material seja submetido a deformações de grande amplitude, seu comportamento torna-se não linear. Finalmente, se ciclos de tensão repetidos são aplicados ao material, ocorre o acúmulo de deformação permanente viscoplástica. Na Figura 2.13 mostram-se os domínios típicos de comportamento mecânico de misturas asfálticas dependendo da deformação e número de ciclos, dada uma mesma temperatura.

Sides *et al.* (1985) mostram as diferentes parcelas de deformação quando um material visco-elastoplástico é submetido a uma solicitação particular. Observa-se que quando o carregamento é aplicado em um material viscoelástico e mantido constante por um período  $T_L$ , a deformação  $\varepsilon_0$ ,

composta por componentes elástica ( $\epsilon_e$ ) e plástica ( $\epsilon_p$ ), ocorre instantaneamente. Em seguida, deformações viscoelásticas ( $\epsilon_{ve}$ ) e viscoplásticas ( $\epsilon_{vp}$ ) desenvolvem-se durante o período em que o carregamento é aplicado. Quando o carregamento é retirado, observa-se a restituição da parcela de deformação elástica de forma instantânea, seguida da parcela viscoelástica durante o período sem carga ( $T_R$ ). Com a sequência de carregamentos, o material irá acumular deformações plásticas. Na Figura 2.14 são apresentadas as várias componentes de deformação.



**Figura 2.13** - Aspectos de domínios típicos de comportamento mecânico de misturas asfálticas dependendo da deformação e número de ciclos, dada uma mesma temperatura (modificado-Mangiafico, 2014).



**Figura 2.14** - Representação esquemática das várias componentes de deformação (modificado-Sides *et al.*, 1985).

Conforme Kim (2009) várias funções de resposta viscoelástica podem ser usadas para caracterizar o comportamento no domínio viscoelástico linear da mistura asfáltica, sendo os mais fundamentais o módulo de relaxação  $E(t)$ , função *creep*  $D(t)$ , e módulo complexo  $E^*$ . A necessidade de diferentes tipos de funções resposta é atribuída a uma série de fatores, incluindo tipo de aplicação de carregamento, condições sob as quais o material é caracterizado, e as dificuldades experimentais que limitam a determinação dessas funções (e. g. tensões muito altas ou muito baixas, problemas com célula de carga, faixas de limite de força e deslocamento dos equipamentos).

Enquanto essas funções de resposta, ou propriedades viscoelásticas lineares, são fundamentais para caracterizar a mistura asfáltica no domínio da viscoelasticidade linear, elas também servem como componentes chave em modelos constitutivos que descrevem o comportamento não linear sob dano. Além disso, quando as misturas asfálticas são usadas em testes experimentais, as funções resposta podem ser usadas como “impressões digitais viscoelásticas” para avaliar a variação e/ou determinar se o material foi danificado ou não (Kim, 2009).

Christensen (1982) explica que devido à dependência do tempo e da taxa de aplicação da carga (ou deslocamento), as equações constitutivas dos materiais viscoelásticos deixam de ser algébricas, como é o caso das relações elásticas, e passam a ser representadas por integrais de convolução. A Equação 2.2 e a Equação 2.3 mostram as relações tensão-deformação para os materiais viscoelástico lineares.

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \quad (2.2)$$

$$\varepsilon(t) = \int_0^t D(t - \tau) \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau \quad (2.3)$$

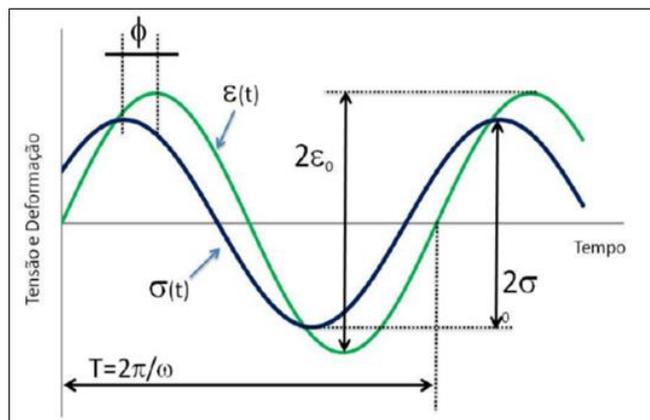
onde  $E$  e  $D$  são o módulo de relaxação e a função *creep*, respectivamente,  $t$  o tempo de interesse e  $\tau$  a variável de integração.

Ainda segundo Christensen (1982), a função *creep* e o módulo de relaxação são grandezas dependentes, visto que mensuram a mesma propriedade do material. Entretanto as propriedades não apresentam relação de reciprocidade perfeita, ou seja, não são simplesmente uma o inverso da outra.

### 2.4.1 Módulo dinâmico e ângulo de fase

As propriedades mecânicas de um material viscoelástico dependem do tempo de carregamento e esta dependência pode ser observada em ensaios dinâmicos. Quando materiais viscoelásticos são submetidos a ensaios dinâmicos sob carregamento harmônico ou oscilatório, a caracterização é realizada pelo módulo complexo ( $E^*$ ) e pelo ângulo de fase ( $\phi$ ), duas propriedades que determinam as respostas mecânicas sob condições de solicitações harmônicas em regime permanente.

Na Figura 2.15 é ilustrado o comportamento de um material viscoelástico. Quando submetido a uma deformação senoidal (Equação 2.4), o material apresenta uma resposta de tensão também senoidal (Equação 2.5), porém defasada por certo ângulo de fase ( $\phi$ ). Para um material puramente elástico  $\phi = 0^\circ$  e para materiais puramente viscosos  $\phi = 90^\circ$ , sendo assim os materiais viscoelástico apresentam valores de ângulo de fase no intervalo  $0^\circ < \phi < 90^\circ$ .



**Figura 2.15-** Comportamento de um material viscoelástico em ensaio sob solicitação harmônica (Mello, 2008).

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (2.4)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (2.5)$$

onde  $\varepsilon_0$  é a amplitude de deformação,  $\sigma_0$  é a amplitude de tensão e  $\omega$  é a frequência angular e  $\varphi$  é o ângulo de fase.

O módulo complexo, possui partes reais e imaginárias e é definido pela Equação (2.6):

$$E^* = E' + i \cdot E'' \quad (2.6)$$

em que parcela  $E'$  é conhecida como módulo de armazenamento e a parcela  $E''$  é conhecida como módulo de perda como mostra a Equação 2.7 e a Equação 2.8, respectivamente.

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos(\varphi) = |E^*| \cdot \cos(\varphi) \quad (2.7)$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \text{sen}(\varphi) = |E^*| \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (2.8)$$

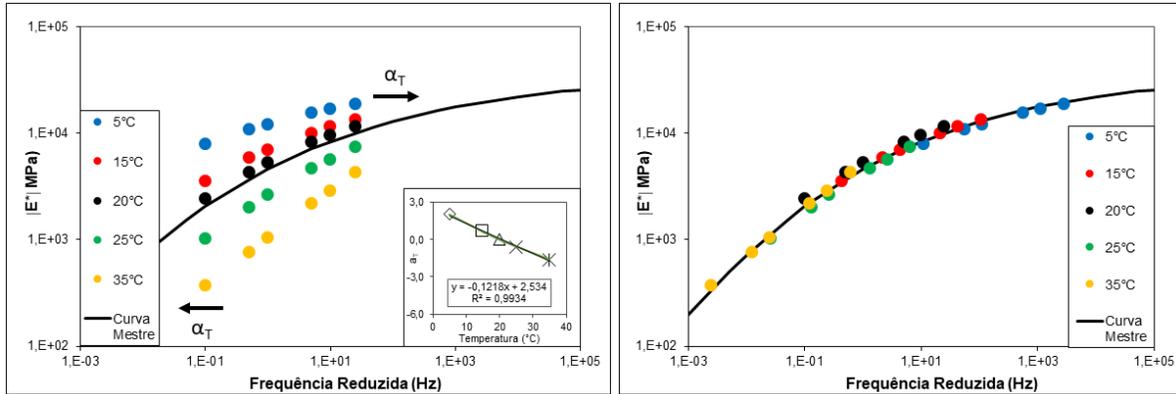
O valor absoluto do módulo complexo é denominado como módulo dinâmico, definido como a relação entre as amplitudes de tensão e deformação em um carregamento harmônico na Equação 2.9:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2.9)$$

Atualmente existem diversos equipamentos que se destinam a medir as propriedades reológicas em ligantes e misturas asfálticas. O ensaio pode ser conduzido sob tensão ou deformação controlada, dependendo de qual dessas variáveis o aparelho é configurado para controlar. Além disso, é possível controlar o formato de onda oscilatória que será aplicada durante o ensaio. Os equipamentos utilizados nesta pesquisa para os ensaios em ligantes e misturas são descritos no Capítulo 3.

O ensaio para obtenção das propriedades reológicas é realizado em diferentes temperaturas (varredura de temperatura) e usando diferentes frequências de carregamento (varredura de frequência) juntamente com a aplicação do princípio de superposição tempo-Temperatura, t-T (ou Frequência-Temperatura) para a construção de curvas mestras tanto para o módulo dinâmico quanto para o ângulo de fase. Segundo este princípio, o efeito do tempo e da temperatura pode ser combinado em um único parâmetro. Por exemplo, pode-se observar o mesmo valor de rigidez de um material viscoelástico ao se realizar um ensaio em alta temperatura e longo tempo de carregamento (baixas frequências) ou baixas temperaturas e curto tempo de carregamento (altas frequências).

É bastante comum a representação do comportamento reológico por meio da curva mestra nos ligantes asfálticos e misturas asfálticas empregados na pavimentação, principalmente pela vantagem de prever o comportamento esperado de um material sob certas condições conhecidas (tráfego e temperatura). Airey (1997) define a curva mestra como um combinado de várias curvas isotérmicas, que são deslocadas manualmente, para que a sua sobreposição resulte numa curva única a uma dada temperatura de referência, podendo esta ser arbitrariamente escolhida. Na Figura 2.16 mostra-se o esquema de obtenção da curva mestra nos ensaios de módulo dinâmico em cinco temperaturas e seis frequências.



**Figura 2.16-** Exemplo de determinação da curva mestra de misturas asfálticas para a temperatura de referência de 20°C.

Bonaquist *et al.* (2002) e Pellinen (2001) desenvolveram um método de construção da curva mestra usando uma técnica para deslocar dados experimentais a partir de um ajuste da função sigmoideal. Os fatores de deslocamento dos dados experimentais, os *shifts factors*, são calculados e otimizados simultaneamente com os coeficientes da função sigmoideal. Na Equação 2.10 é mostrada a função sigmoideal.

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma \log(\xi)}} \quad (2.10)$$

onde  $\delta$  é o valor mínimo do módulo dinâmico  $|E^*|$ ,  $\xi$  é a frequência reduzida,  $\alpha$  são os intervalos de valores do módulo dinâmico  $|E^*|$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são parâmetros que descrevem a forma do modelo sigmoideal. Para as misturas asfálticas, Sotil (2005) *apud* Mello (2008) afirma que os coeficientes  $\delta$  e  $\alpha$  dependem da granulometria, da quantidade de ligante e de vazios na amostra. Já os coeficientes  $\beta$  e  $\gamma$  estão relacionados com as características do ligante e com a magnitude de  $\delta$  e  $\alpha$ .

O fator de translação  $a_T$  define o deslocamento necessário a uma determinada temperatura em como mostra a Equação 2.11:

$$a_T = \frac{t}{t_r} = \frac{\omega_r}{\omega} \quad (2.11)$$

onde  $t$  é o tempo de carregamento em uma temperatura de interesse,  $t_r$  é o tempo de carregamento na temperatura de referência e  $a_T$  é o fator de translação em função da temperatura.

A translação é realizada segundo a Equação 2.12:

$$\log a_T(T_i) = a.T_i^2 + b.T_i + c \quad (2.12)$$

onde  $a_T$  é o fator de translação em função da temperatura e  $a$ ,  $b$  e  $c$  são coeficientes determinados durante a construção da curva mestra.

Segundo Kim (2009), a justificativa de se utilizar uma função sigmoideal na construção da curva mestra é de que a sua obtenção é baseada nas observações dos resultados do comportamento físico da mistura. A parte superior da função sigmoideal se aproxima assintoticamente da rigidez máxima da mistura, que depende da rigidez limite do ligante (módulo vítreo) em temperaturas frias. Em altas temperaturas, o carregamento compressivo faz com que a influência do agregado seja mais dominante do que a influência do ligante viscoso, fazendo com que a rigidez da mistura se aproxime de um limite valor de equilíbrio, que é dependente da granulometria do agregado.

#### 2.4.2 Análogos mecânicos

Serão descritos os modelos analógicos de espectro discreto mais utilizados para a caracterização do comportamento no domínio da viscoelasticidade linear. De uma forma geral, as representações são feitas por meio de combinações de molas e amortecedores que representam as parcelas elástica e viscosa do material, respectivamente.

O modelo de Maxwell, Figura 2.17 (a), apresenta uma mola ( $E$ ) e um amortecedor ( $\eta$ ) ligados em série, enquanto o modelo Kelvin-Voigt na Figura 2.17 (b) apresenta os mesmos elementos associados em paralelo. O modelo de Maxwell representa uma aproximação de resposta para o módulo de relaxação, mas não é representativo para modelar a função *creep*. Por outro lado, o modelo de Kelvin-Voigt representa bem o comportamento da função *creep*, porém sem boa representatividade para a relaxação. Dessa forma, nenhum dos dois modelos consegue representar de maneira eficaz o comportamento dos materiais viscoelásticos.

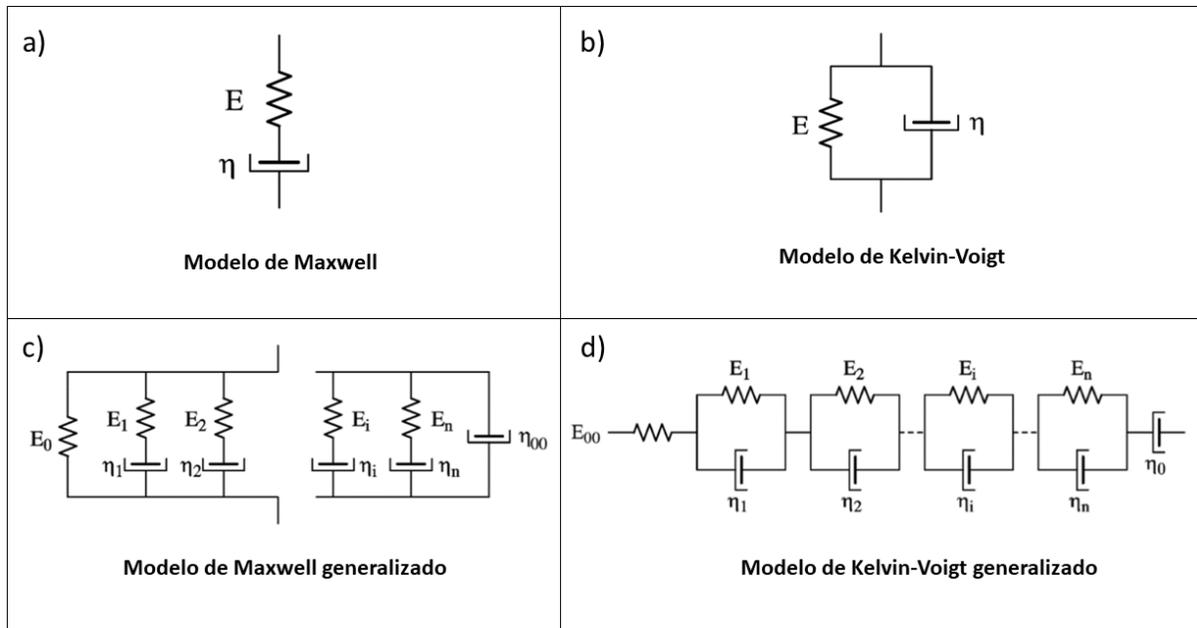
A fim de obter uma representação mais fiel da resposta viscoelástica linear surgiram os modelos generalizados que também utilizam molas e amortecedores, em arranjos mais complexos. O modelo de Maxwell generalizado, Figura 2.17 (c), consiste na associação em paralelo de pares de mola-amortecedor ligados em série. O modelo Kelvin-Voigt generalizado, Figura 2.17 (d), consiste em associações em série de pares mola-amortecedor ligados em paralelo.

As funções analíticas que relacionam tensão-deformação que representam os modelos generalizados, mostrados na Figura 2.17 (c) e (d), são conhecidas como Séries de Prony (Christensen, 1982). Segundo Kim (2009), a popularidade desta representação é atribuída principalmente à sua capacidade de descrever uma ampla gama de resposta viscoelástica e a eficiência relativamente simples e robusta para o cálculo computacional associada às suas funções de base exponencial. Tendo por base os modelos generalizados, mostram-se na Equação 2.13 e na Equação 2.14, as representações analíticas para a relaxação,  $E(t)$ , e a função *creep*,  $D(t)$ , respectivamente.

$$E(t) = E_{k0} + \eta_{\infty} \delta + \sum_{i=1}^n E_{ki} e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (2.13)$$

$$D(t) = \frac{1}{E_{k\infty}} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_{ki}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) \quad (2.14)$$

onde os parâmetros  $E_{k0}$ ,  $E_{ki}$ ,  $\eta_{\infty}$  e  $\tau_i$ , definem uma série de Prony de  $n$  elementos que representa as propriedades viscoelásticas linear do material (caracterização LVE).



**Figura 2.17** - Representação dos modelos de Maxwell e Kelvin-Voigt.

## 2.5 FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Tayebali *et al.* (1994) explicam a resitência à fadiga das misturas asfálticas como a habilidade de suportar carregamentos repetidos sem que haja o desenvolvimento de trincas. Segundo Di Benedetto *et al.* (2004), a manifestação de trincamentos por fadiga é um dos principais modos de ruptura de uma estrutura de pavimento.

Preussler e Pinto (2001) afirmam que o fenômeno de fadiga é um processo de deterioração estrutural que um material sofre quando submetido a um estado de tensões e de deformações cíclicas, resultando em trincas ou ruptura completa, após um número suficiente de repetições de carregamento, ou seja, é a perda de rigidez que o material sofre, quando solicitado repetidamente por uma carga. Devido a isto, as características que envolvem o comportamento à fadiga da estrutura de um pavimento são consideradas como um importante parâmetro de projeto

Babadopulos (2017), citando Poncelet (1839), menciona que a perda de resistência do material acontece como consequência da aplicação de uma carga menor do que aquela em que o material apresentará a ruptura. Eventualmente, a ruptura advém da repetição dessas cargas, que individualmente não a produziriam no material. Babadopulos (2017), citando (Wöhler, 1870), comenta ainda que a taxa de acúmulo de dano por fadiga é depende do nível de tensões aplicadas.

Witczak (1975) e Bounnare *et al.* (1980) ressaltam que as deformações e tensões críticas que ocasionam a fadiga também são função da rigidez da mistura. Uma vez que a rigidez do concreto asfáltico em uma camada de pavimento varia com a profundidade, implicará também na variação da deformação. Este fato atrelado à ação do tráfego propagará o trincamento por toda a camada.

Após a obtenção dos dados experimentais em ensaios de fadiga estes são utilizados em modelos de previsão em que as curvas de Wöhler e a hipótese de Miner (Miner, 1945 e Palmgreen, 1924) são classicamente usadas. A hipótese admite que as contribuições relativas de cargas simples podem ser acumuladas linearmente como se mostra na Equação 2.15:

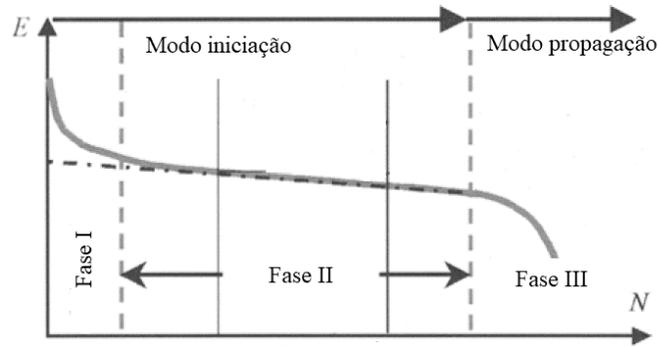
$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = C \quad (2.15)$$

em que  $n_i$  é o número de ciclos reais,  $N_i$  é o número de ciclos disponíveis para dado nível de tensão,  $k$  é o número dos carregamentos aplicados e  $C$  é a constante usualmente considerada como 1.

Como destaca Mangiafico (2014), embora tenha sido provado que esta lei não é exata, ainda é amplamente utilizada como primeira aproximação devido à sua simplicidade. Sua principal desvantagem é a negligência da história do carregamento. De fato, a ordem dos diferentes carregamentos tem influência na vida final à fadiga, mas não é considerado.

### 2.5.1 Ensaios de fadiga

Di Benedetto *et al.* (2004) afirmam a importância de ensaios laboratoriais para a determinação dos modelos de fadiga, em que são estabelecidos pela relação entre o estado de tensão-deformação e o número de ciclos de carga até atingir a ruptura de acordo com um determinado critério. As solicitações em diferentes níveis de tensão ou deformação, devem reproduzir o mais próximo possível as condições estabelecidas em campo para as misturas asfálticas. Segundo os autores, durante os ensaios em misturas asfálticas, observa-se que a norma do módulo complexo (módulo dinâmico) diminui, em três fases distintas: Fase I, Fase II e Fase III, conforme mostra-se na Figura 2.18.



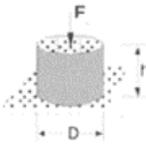
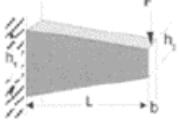
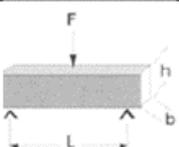
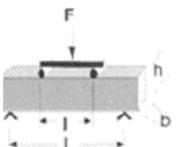
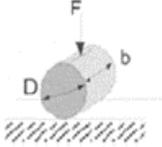
**Figura 2.18** - Curva de evolução do módulo complexo no ensaio de fadiga (modificado-Di Benedetto *et al.*, 2004).

- Fase I ou fase de adaptação: Esta fase é caracterizada por uma rápida diminuição da rigidez (módulo complexo) devido ao esforço repetitivo da carga. No entanto, esta diminuição não é ocasionada puramente por fadiga, mas também pelo aquecimento (dissipação da energia) e tixotropia (contribuição do ligante). Di Benedetto *et al.* (2004) sustentam esta opinião a partir de observações de carregamentos cíclicos em que rigidez diminuída é rapidamente recuperada quando o teste é interrompido;
- Fase II ou fase quase estacionária: Durante esta fase, o papel da fadiga na diminuição da rigidez é predominante. Embora a influência dos efeitos de aquecimento térmico e tixotropia seja diminuída, estes ainda devem ser considerados. Segundo Babadopulos (2017), o ângulo de fase também aumenta, menos que na Fase I, as microfissuras estão distribuídas no volume do material e a mecânica dos meios contínuos ainda é precisa na descrição do fenômeno;
- Fase III ou fase de falha: As fases I e II correspondem a um processo de iniciação de fissuras no material, enquanto durante a fase III, ocorre a propagação local de trincas. As perturbações nas tendências do módulo complexo medido são observadas (tanto em módulo e quanto no ângulo de fase). Babadopulos (2017) disserta que as micro trincas provavelmente coalescerão em uma macro trinca, e a mecânica do contínuo não é mais precisa na descrição do fenômeno. Ainda segundo o autor, embora seja difícil distinguir precisamente quando ocorreu a coalescência, a transição entre a Fase II e a Fase III é geralmente considerada como ruptura por fadiga.

Atualmente, existem diferentes tipos de ensaios para determinação da vida de fadiga em misturas asfálticas. Estes podem ser uniaxiais de tração/compressão (T/C) e ensaio de tração indireta em amostras cilíndricas, ensaios em viga à flexão em amostras prismáticas trapezoidais e retangulares. Di Benedetto *et al.* (2004) apresentam um resumo das principais características dos ensaios que foram realizados para o estudo da fadiga em misturas asfálticas. Na Figura 2.19 apresentam-se as características dos testes de fadiga realizados.

Tayebali *et al.* (1994) destacam as vantagens e desvantagens dos diferentes ensaios de fadiga em misturas asfálticas. Os autores citam que um dos principais problemas com os ensaios de fadiga em amostras cilíndricas por compressão diametral é o acúmulo de deformações durante a execução do ensaio, fazendo com que a vida de fadiga do material seja subestimada. Outras características negativas do ensaio são as concentrações de tensões, os trincamentos e a impossibilidade de se executar os ensaios sob a condição de deformação constante.

No Brasil, a realização do ensaio uniaxial de tração/compressão (T/C) vem ganhando cada vez mais espaço como ferramenta de pesquisa do desempenho à fadiga nas misturas asfálticas. Mangiafico (2014) descreve que neste tipo de teste, uma amostra cilíndrica é carregada axialmente e é medida a resposta do material. É um teste homogêneo, pois em cada momento o estado de tensão e deformação é o mesmo em todos os pontos da amostra (pelo menos na região central). Por esta razão, não são necessárias hipóteses para acessar as propriedades mecânicas fundamentais do material. Como será explicado mais adiante, os resultados obtidos neste tipo de ensaio cíclico, que ocorre sob um protocolo de caracterização de dano em misturas asfálticas que economiza tempo, permitem calibrar o modelo S-VECD e obter critérios de fadiga.

Tipo	Geometria do ensaio	Carregamento
T/C		Tração-Compressão (homogêneo)
2PB		Flexão em dois pontos (Não homogêneo)
3PB		Flexão em três pontos (Não homogêneo)
4PB		Flexão em quatro pontos (Não homogêneo)
ITT		Tração indireta (Não homogêneo)

**Figura 2.19** - Principais características dos ensaios de fadiga (modificado-Di Benedetto *et al.*, 2004).

Em Fortaleza, na UFC, Babadopulos (2014) aplicou ensaios T/C e o modelo S-VECD no estudo do envelhecimento para modelar o comportamento mecânico de misturas asfálticas. Em São Paulo, na USP, Bessa (2017) realizou ensaios T/C, entre outros ensaios de fadiga, e o modelo S-VECD para estabelecer correlações entre os resultados de campo e os modelos de previsão. Em Porto Alegre, na UFRGS, Mocelin (2018) implementou o protocolo de ensaios por meio do modelo S-VECD caracterizando misturas asfálticas quentes e mornas com ligante convencional, modificado por polímero e com borracha. Em Santa Maria, na UFSM, Boeira (2018), implementou o protocolo para o ensaio T/C, Schuster (2018) e Vestena (2021) ensaiaram e utilizaram o modelo S-VECD para estudar o comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas nas rodovias do Rio Grande do Sul.

Mocelin (2018) e Dapper (2020) realizaram ensaios de fadiga T/C em misturas quentes e mornas com graduação descontínua, modificadas com ligante AB de nome comercial ECOFLEX AB-8. Os resultados obtidos pelos autores foram utilizados para calibrar o modelo S-VECD. Mocelin (2018) aplicou os parâmetros do modelo S-VECD no programa FlexPAVE™ e a mistura modificada com AB-8 apresentou desempenho à fadiga superior em comparação à mistura convencional, sendo superada pela mistura modificada com polímero. Dapper (2020) produziu misturas contínuas e descontínuas, com utilização de AB-8 e as curvas de Wöhler obtidas a partir do modelo S-VECD, classificou a mistura descontínua com o melhor resultado entre duas misturas densas.

Shah (2018) avaliou o desempenho à fadiga no ensaio T/C de três misturas sendo duas de graduação descontínua, uma modificada com BMP e outra modificada com RAR, e uma terceira mistura de controle de graduação densa com ligante convencional. As curvas de Wöhler obtidas a partir do modelo S-VECD mostraram que a adição de RAR melhorou o desempenho à fadiga superando cerca de 64 vezes a mistura de controle e 30 vezes a mistura com BMP.

### **2.5.2 Critérios de ruptura por fadiga**

Como visto anteriormente, as mudanças que ocorrem no módulo complexo durante os ensaios de fadiga são uma indicação da ruptura, mas há influência de outros fenômenos. Desta forma, a determinação precisa do ciclo onde ocorre a coalescência das macro-trincas é uma tarefa difícil.

Comumente nos ensaios realizados sob o modo de deformação controlada, diversos autores definem a ruptura quando o módulo de rigidez é reduzido à metade de seu valor inicial (Pronk e Hopman, Tayebali *et al.*, 1994 e Van Dijk e Visser, 1977). Babadopulos (2017) enfatiza que este método negligencia a influência de outros fenômenos, que podem ser dependentes do material, e a possibilidade de que materiais diferentes possam suportar diferentes acúmulos de dano sem apresentar ruptura.

Observar a tendência de evolução em outros parâmetros do material, como dissipação energia, também é apresentada na literatura como um meio para determinar o número de ciclos na ruptura por fadiga (Hopman *et al.*, 1989). Este conceito tem por base a característica de materiais viscoelásticos em que os ciclos de carga e descarga ocasionam o fenômeno da histerese,

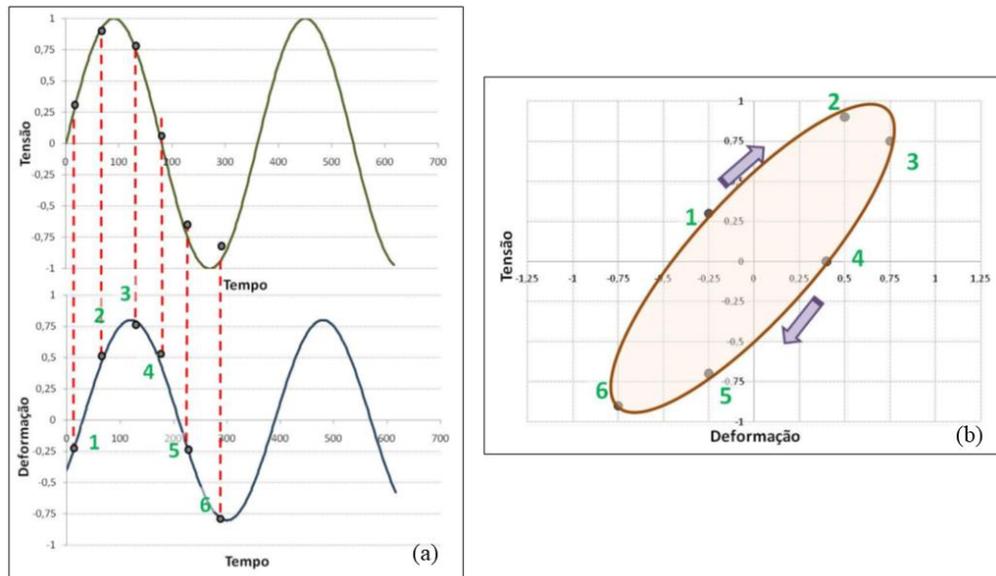
mostrado na Figura 2.20, representada pela elipse no gráfico tensão-deformação. A energia dissipada é calculada conforme a Equação 2.16:

$$W_{ciclo} = \pi \sigma_0 \varepsilon_0 \text{sen}(\varphi) \quad (2.16)$$

onde  $\sigma_0$  é a amplitude de tensão,  $\varepsilon_0$  é a amplitude de deformação e  $\varphi$  é o ângulo de fase. A energia dissipada acumulada é entendida como o somatório da energia da energia dissipada em cada ciclo. Assim é possível acompanhar a evolução da razão da energia dissipada (*DER*), segundo a Equação 2.17:

$$DER = \frac{\Sigma W}{W_N} \quad (2.17)$$

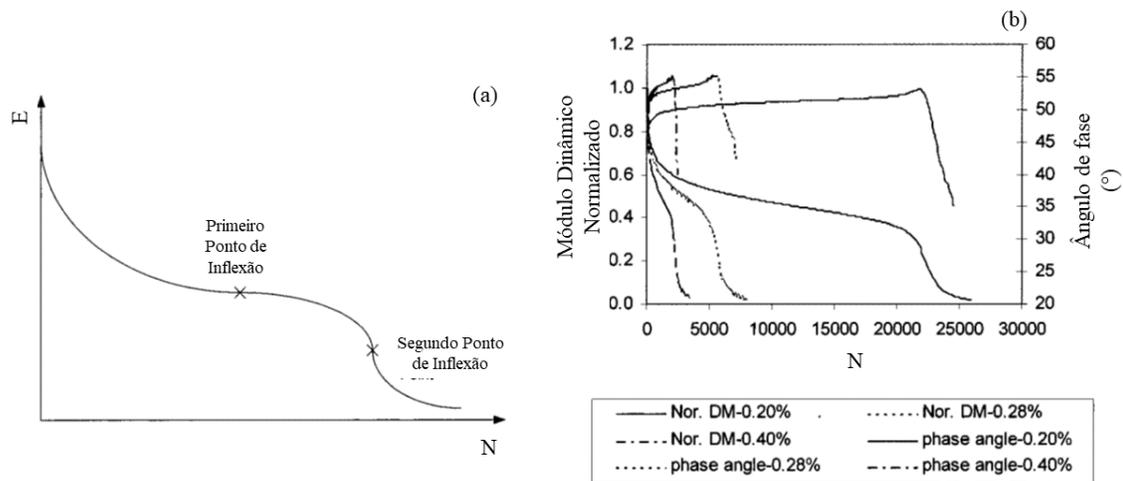
onde  $\Sigma W$  é o somatório da energia dissipada em cada ciclo,  $N$  é o número do ciclo e  $W_N$  é a energia dissipada durante o ciclo  $N$ .



**Figura 2.20** - (a) Esquema da solicitação e resposta de um carregamento harmônico em um material viscoelástico; (b) histerese formada pela defasagem da resposta à solicitação aplicada (Mello, 2008).

Outro critério utilizado em ensaios com modelagem de dano contínuo viscoelástico é Segundo Ponto de Inflexão (SIP) ou pico do ângulo de fase como é mostrado na Figura 2.21.

Proposto por Kim *et al.* (2003), este critério consiste em identificar dois pontos de inflexão na curva do módulo complexo versus número de ciclos. O SIP também correspondente ao pico do ângulo de fase, é considerado como representativo de uma mudança no comportamento mecânico do material, devido ao acúmulo de danos por fadiga. Assim o número de ciclos onde ocorre o SIP é considerado a vida de fadiga.



**Figura 2.21** - (a) Exemplificação conceitual da tendência de ensaios de fadiga sob deformação controlada. (b) Número de ciclo (N) versus Módulo dinâmico Normalizado e Ângulo de fase durante os ensaios em diferentes níveis de deformação (modificado-Kim *et al.*,2003).

Mangiafico (2014) comenta sobre outro critério de ruptura, em que a hipótese é que quando ocorre a transição entre as fases II e III (Figura 2.18), uma trinca começa a se propagar, perturbando a homogeneidade do campo de deformação da amostra. Segundo o autor, para avaliar as diferentes deformações em diferentes pontos de uma amostra cilíndrica ensaiada no modo tração-compressão, as medidas de deformação devem ser realizadas utilizando pelo menos três extensômetros colocados a  $120^\circ$  um do outro. Com esta configuração, quando qualquer um dos três extensômetros excede 25% (em valor absoluto), o campo de deformação da amostra é considerado não mais homogêneo, indicando a presença de uma trinca. A ruptura por fadiga é assumida e o número correspondente de ciclos é considerado como a vida de fadiga.

### 2.5.3 Modelos de fadiga

Schutz (1996) *apud* Mello (2008) relata que os modelos iniciais aplicados na previsão de vida de fadiga consideravam uma relação similar àquelas desenvolvidas nos estudos conduzidos por

Whöler em metais. O modelo, mostrado na Equação 2.18, relaciona o número de ciclos com a amplitude de deformação inicial imposta ao material:

$$N_f = k_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_0}\right)^{k_2} \quad (2.18)$$

onde  $N_f$  é a vida de fadiga correspondente a um critério de ruptura,  $\varepsilon_0$  é a deformação imposta e  $k_1$  e  $k_2$  são coeficientes determinados experimentalmente.

Devido ao fato de que a fadiga não é dependente somente da deformação aplicada, mas também se relaciona com a rigidez do material Bonnaure *et al.* (1980) propuseram uma formulação conhecida como Modelo Geral, mostrada na Equação 2.19:

$$N_f = k_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_0}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{1}{S_0}\right)^{k_3} \quad (2.19)$$

em que  $\varepsilon_0$  é a deformação imposta,  $S_0$  é a rigidez inicial da mistura asfáltica e  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são coeficientes determinados experimentalmente.

Além das formulações que relacionam o número de ciclos com a deformação imposta e a rigidez da mistura, alguns pesquisadores proporam o conceito de energia dissipada para a análise de fadiga (Tayebali *et al.*, 1994). A energia decresce com o aumento do número de ciclos de carregamento no ensaio de fadiga à deformação controlada. Por outro lado, a energia dissipada por ciclo aumenta com o número de ciclos de carregamento para o ensaio de fadiga realizado sob tensão controlada.

Van Dijk (1975) *apud* Mello (2008), baseado em ensaios de laboratório em misturas asfálticas sob carregamento senoidal, estabeleceu uma relação entre o número de ciclos de fadiga e a energia total dissipada por unidade de volume até o ponto de ruptura. Van Dijk e Visser (1977) também reportaram que os resultados dos diferentes tipos de ensaios dinâmicos em vigas poderiam ser descritos para uma mistura específica como mostrado na Equação 2.20 por uma

relação entre os ciclos para ruptura,  $N_f$ , e a energia dissipada acumulada por unidade de volume até o ponto de fadiga,  $W_N$ :

$$W_N = A \cdot N_f^z \quad (2.20)$$

em que  $A$  e  $z$  são constantes específicas da mistura. Fatores como temperatura, frequência do carregamento, período de descanso entre aplicações sucessivas de carregamento e modo de carregamento (tensão controlada ou deformação controlada) não influenciam nesta relação.

O modelo desenvolvido por Tayebali *et al.* (1994) baseado na energia dissipada inicial que ocorre durante os ensaios de fadiga a flexão, mostrado na Equação 2.21, relaciona o número de ciclos até a ruptura com a porcentagem de vazios preenchidos com ligante:

$$N_f = 2,365 \cdot \exp^{0,069 \cdot RBV} \cdot w_0^{-1,882} \quad (R^2 = 0,76) \quad (2.21)$$

onde  $RBV$  é a Relação Betume Vazios e  $w_0$  a energia dissipada inicial.

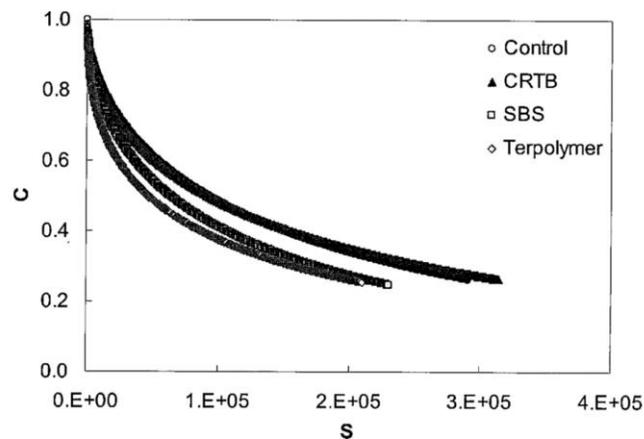
## 2.6 Modelo Simplificado de Dano Contínuo Viscoelástico (S-VECD)

Como menciona Underwood *et al.* (2012), o fenômeno de fadiga é complexo, dependente do material e das condições de resposta da estrutura do pavimento às solicitações do carregamento. O pressuposto dificulta a existência de protocolos eficientes para análises rápidas dos resultados e conseqüentemente, para as tomadas de decisão em campo, afastando o estado da prática do estado da técnica.

O ensaio de fadiga por T/C consiste na aplicação de uma deformação cíclica senoidal e constante na amostra, que avalia o estado da rigidez do material até que ocorra a ruptura, que pode ser detectada pela evolução do ângulo de fase. Assim, os resultados do ensaio são aplicados no modelo *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD), que utiliza a mecânica do dano contínuo. Atualmente este modelo é implementado em um programa computacional para análise de pavimentos, desenvolvido por pesquisadores da *North Carolina State University*

(NCSU), nomeado de *Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses* (LVECD), comercialmente chamado de FlexPAVE™.

Originalmente, a teoria do dano contínuo foi aplicada no desenvolvimento do modelo constitutivo chamado *Viscoelastic Continuum Damage* (VECD). Este modelo utiliza propriedades fundamentais dos materiais, como as características viscoelásticas, para descrever a evolução do dano (S) e diminuição da integridade (C) nas misturas asfálticas, obtendo as chamadas curvas características de dano, mostrada na Figura 2.22, uma propriedade intrínseca do material e independente das condições em que se realizam os ensaios (temperatura, amplitude e modo de controle). Este estudo foi desenvolvido por um grupo de pesquisadores da NCSU nos EUA, liderados pelo professor Richard Kim (Lee e Kim, 1998; Daniel e Kim, 2002; Chehab *et al.*, 2002; Chehab *et al.*, 2003; Underwood *et al.*, 2006 e Underwood *et al.*, 2009).



**Figura 2.22** - Curvas características de dano para diferentes misturas asfálticas (Kim, 2009).

O modelo S-VECD é formulado sob três pilares conforme descreve Nascimento (2015): (i) princípio da correspondência elástico-viscoelástico, baseado na pseudo-deformação; (ii) teoria do trabalho potencial de Schapery, baseada na mecânica do dano contínuo; (iii) e superposição tempo-temperatura (t-T) com dano acumulado.

Schapery (1984) sugeriu que as equações constitutivas para certos meios viscoelásticos são idênticas às dos casos elásticos, mas as tensões e deformações não são necessariamente grandezas físicas no corpo viscoelástico. Em vez disso, são pseudo-variáveis na forma de integrais de convolução. A pseudo-deformação uniaxial, por exemplo, é definida na Equação 2.22:

$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \cdot \int_0^t E(t - \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau \quad (2.22)$$

onde  $E_R$  é o módulo de referência, o qual é uma constante e possui mesma dimensão do módulo de relaxação. Esta equação representa a condição de carregamento transiente no modelo VECD.

É possível observar que parte da (2.22 se refere a relação tensão deformação elástica linear mostrada na ( 2.1. O que permite reescrevê-las da forma mostrada na Equação 2.23:

$$\sigma = E_R \cdot \varepsilon^R \quad (2.23)$$

A relação mostrada pela Equação 2.23 apresenta similaridade com a Lei de Hooke que foi apresentada na Equação 2.1. Normalmente adota-se o módulo de referência  $E_R$  como 1, assim, o valor de  $\varepsilon^R$  é igual ao valor da resposta de tensão de um material viscoelástico linear, o que significa dizer que em condições de viscoelasticidade linear, a razão entre  $\sigma$  e  $\varepsilon^R$  (pseudo-módulo secante ou integridade,  $C$ ) é unitária (Babadopulos, 2014). É mostrado na Equação 2.24 a forma de relação entre o parâmetro  $C$  a tensão e a pseudo-deformação.

$$C = \frac{\sigma}{\varepsilon^R} \quad (2.24)$$

A partir do momento em que esta razão é diferente da unidade significa que o material está sofrendo dano, alterando a sua microestrutura interna, e assim a tensão aplicada necessária para manter o nível de deformação estabelecida passa a ser menor. Visando correlacionar a redução da integridade do material ( $C$ ) com a evolução do dano ( $S$ ), Schapery (1990) desenvolveu a teoria do trabalho potencial para aplicação em meios elásticos e, então, estendeu-a para os meios viscoelásticos. O modelo utiliza variáveis internas de estado para definir as mudanças estruturais ou danos, baseando-se no conceito dos processos irreversíveis da termodinâmica. Segundo Lundström e Isacsson (2003), umas das principais características desta teoria é de que ela se baseia na suposição de que o trabalho realizado é essencialmente independente da trajetória de carregamento, ou seja, que o acréscimo de dano está somente relacionado com o carregamento

externo. Dessa forma, pode-se considerar que o dano seja caracterizado pelas mudanças no parâmetro de dano escolhido e que tais mudanças interferem diretamente nas respostas mecânicas. A teoria desenvolvida por Schapery (1990) para materiais elásticos é basicamente fundamentada em três elementos principais mostrados nas equações 2.25, 2.26 e 2.27, que representam a função densidade de energia, a relação tensão-deformação e a lei de evolução do dano, respectivamente:

$$W = W(\varepsilon_{ij}, S_m) \quad (2.25)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{ij}} \quad (2.26)$$

$$-\frac{\partial W}{\partial S_m} = \frac{\partial W_S}{\partial S_m} \quad (2.27)$$

onde  $\sigma_{ij}$  e  $\varepsilon_{ij}$  são os tensores de tensão e deformação,  $W$  é a função densidade de energia,  $W_S$  é a energia dissipada devido às mudanças estruturais,  $S_m$  é a variável interna de dano e  $m$  representa o número de parâmetros de danos considerados no modelo.

As equações 2.25 e 2.27 são definidas para os materiais elásticos e a consideração do princípio da correspondência, por meio do uso das pseudo-variáveis, permite estendê-las para um material viscoelástico, como apresentado por Schapery (1990). Para isso, basta que a deformação e o trabalho sejam substituídos pela pseudo-deformação e pelo pseudo trabalho, respectivamente. Park *et al.* (1996) justificam a não utilização da lei de evolução do dano apresentada (Equação 2.28) para os materiais viscoelásticos, já que ambos os lados da equação são função da taxa de carregamento. Os autores apresentam uma lei de evolução similar àquelas já bem conhecidas para os casos da evolução do dano em materiais viscoelásticos:

$$S_m = \left( -\frac{\partial W^R}{\partial S_m} \right)^{\alpha_m} \quad (2.28)$$

onde  $W^R = W(\varepsilon_{ij}^R, S_m)$  é a densidade da energia de pseudo-deformação e  $\alpha_m$  é uma constante dependente do material,  $S_m$  é a variável interna de dano e  $m$  representa cada variável de dano utilizada, sem implicar soma sobre índices repetidos.

Desta forma, verifica-se que a equação constitutiva para os materiais lineares viscoelásticos com dano anteriormente mostrado na Equação 2.24 pode ser descrita como mostra a Equação (2.29):

$$\sigma = C(S)\varepsilon^R \quad (2.29)$$

onde  $C(S)$  é a pseudo-rigidez ( $C$ ), atrelada a função de dano ( $S$ ), ou seja, a pseudo-rigidez conforme a evolução do dano no material.

A partir da Equação 2.29 sabendo-se que a área sob um gráfico tensão-deformação fornece o trabalho realizado sobre o material, é possível calcular a função de densidade de energia de pseudo-deformação. Como a área sob a curva é um triângulo, visto que com o so da pseudo-deformação o material assume representação elástica do comportamento, a função é dada pela Equação 2.30:

$$W^R = \frac{1}{2} C(S)(\varepsilon^R)^2 \quad (2.30)$$

Combinando a lei de evolução do dano (Equação 2.28) e a função densidade de energia de pseudo-deformação (Equação 2.30) tem-se segundo Lee (1996):

$$\frac{dS}{dt} = \left( -\frac{1}{2} \frac{dC}{dS} (\varepsilon^R)^2 \right)^{\alpha} \quad (2.31)$$

aplicando a regra da cadeia:

$$S = \int_0^t \left( \frac{1}{2} \frac{dC}{dt} (\varepsilon^R)^2 \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} dt \quad (2.32)$$

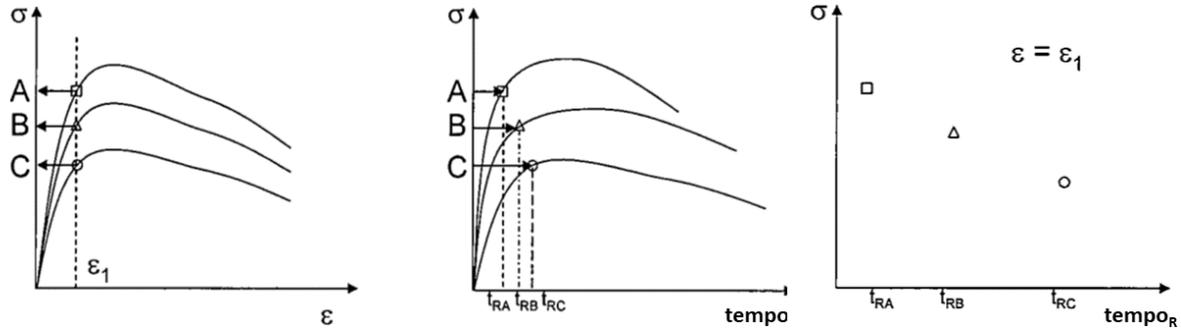
Segundo Lee e Kim (1998), aplicando-se técnicas de integração numérica, o dano ( $S$ ) em função do tempo pode ser determinado conforme a Equação 2.33:

$$S = \sum_{t=1}^N \left[ \frac{1}{2} (\varepsilon^R)^2 (C_{i-1} - C_1) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_{i-1} - t_1)^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (2.33)$$

Chehab (2002) mostra que a utilização do princípio de superposição t-T não é válida somente para materiais íntegros, mas também para aqueles sob a ação de solicitações que causam dano. Em suma, para um nível de deformação estabelecido e constante são determinados a tensão, tempo e temperatura em ensaios monotônicos. O tempo correspondente é convertido em tempo reduzido, a partir dos fatores de translação da caracterização do módulo dinâmico e ângulo de fase, e são plotados com a respectiva tensão. Dessa forma, se a curva característica é conceitualmente função do material, deve-se obter a mesma curva para diferentes temperaturas bastando, para isso, aplicar o princípio t-T, como mostrado na Figura 2.23. Para que a curva característica leve em conta essa propriedade, determina-se o parâmetro de dano trocando-se o tempo  $t$  pelo denominado tempo reduzido  $\xi$ , modificando as equações de acúmulo de dano (Equação 2.33) e pseudo-deformação (Equação 2.22). O tempo reduzido é definido na Equação (2.34):

$$\xi = \frac{t}{a_T} \quad (2.34)$$

em que  $a_T$  é o fator de translação obtido na determinação da curva mestre conforme o item 2.4.1.



**Figura 2.23** - Representação esquemática para um único nível de deformação da técnica usada para verificar superposição t-T com dano crescente (modificado-Kim, 2009).

Nascimento (2015) descreve que o modelo VECD tem por base os resultados de fadiga do ensaio monotônico e assim apresenta algumas deficiências práticas. A primeira questão é de que a carga requerida no ensaio para a caracterização do modelo é muito próxima da capacidade máxima do *Asphalt Material Performance Tester* (AMPT, equipamento de ensaio bastante utilizado nos EUA para caracterização em misturas asfálticas). A segunda questão é a impossibilidade de utilização de um critério de ruptura por fadiga pelo método.

Desta forma, o modelo VECD foi adaptado conforme Underwood *et al.* (2010) e Underwood *et al.* (2012), mantendo a forma de análise para o primeiro ciclo do ensaio, onde o acúmulo de dano é bastante significativo, e modificou-se para a condição de carregamento cíclico, dando-se o nome de *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD). Os autores comentam que do zero até o primeiro ciclo de carregamento a análise deve ser rigorosa e a formulação matemática é a mesma do VECD, para ensaios monotônicos. Essa primeira porção de dano é chamada de  $dS_{transitório}$ . Para o restante do ensaio utiliza-se a nova formulação simplificada de forma que a porção de dano que se segue é conhecida por  $dS_{cíclico}$ , assim:

$$dS = \begin{cases} dS_{transitório} & \xi \leq \xi_p \\ dS_{cíclico} & \xi > \xi_p \end{cases} \quad (2.35)$$

Underwood *et al.* (2010), Underwood *et al.* (2012) e a norma AASTHO TP 101 (2014) apresentam as formulações necessárias para a aplicação do modelo S-VECD. A Equação 2.36 e a

Equação 2.37 se referem ao cálculo das pseudo-deformações, na Equação 2.38 e na Equação 2.39 é apresentado a formulação de cálculo para a integridade e na Equação 2.40 e na Equação 2.41 são apresentadas e as formulações para o cálculo da evolução do dano. Outras informações pertinentes à formulação dos cálculos são detalhadas no item 3.9.

$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^{\xi} E(\xi - \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau \quad \xi \leq \xi_p \quad (2.36)$$

$$(\varepsilon_{0,ta}^R)_{ciclo\ i} = \frac{1}{E_R} x \frac{\beta + 1}{2} ((\varepsilon_{0,pp})_i x |E|_{LVE}^*) \quad \xi > \xi_p \quad (2.37)$$

$$C = \frac{\sigma}{\varepsilon^R \cdot DMR} \quad \xi \leq \xi_p \quad (2.38)$$

$$C^* = \frac{(\beta + 1)}{2} \cdot \frac{(\sigma_{0,pp})}{(\varepsilon_{0,ta}^R) \cdot DMR} \quad \xi > \xi_p \quad (2.39)$$

$$(dS_{transitório})_j = \left( -\frac{DMR}{2} (\varepsilon^R)_j^2 \Delta C_j \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (\Delta \xi)_j^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad \xi \leq \xi_p \quad (2.40)$$

$$dS_{ciclo\ i} = \left( -\frac{DMR}{2} (\varepsilon_{0,ta}^R)^2 \Delta C_i \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (\Delta N_i \cdot \xi_p \cdot K_1)^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad \xi > \xi_p \quad (2.41)$$

onde:

$\varepsilon^R =$  pseudo-deformação;

$E_R =$  módulo de referência;

$E(t) =$  módulo de relaxação;

- $\xi =$  tempo reduzido;
- $\tau =$  variável de integração;
- $\varepsilon =$  deformação;
- $(\varepsilon_{0,ta}^R)$  pseudo-deformação de amplitude de tração;
- $\beta =$  fator de forma do carregamento;
- $(\varepsilon_{0,pp})$  deformação pico a pico;
- $|E|_{LVE}^*$  = norma do módulo complexo ensaiado;
- $DMR =$  razão do módulo dinâmico;
- $(\sigma_{0,pp}) =$  tensão de pico a pico;
- $\Delta C_j =$  variação de  $C$  entre as etapas  $j$  e  $j-1$ ;
- $\Delta C_i =$  variação de  $C$  entre os ciclos  $i$  e  $i-1$ ;
- $\alpha =$  taxa de evolução do dano;
- $\Delta \xi =$  diferença entre o tempo reduzido e o tempo transcorrido entre as etapas  $j$  e  $j-1$ ;
- $\Delta N_i =$  variação do número de ciclos;
- $\xi_p =$  tempo de pulso reduzido;
- $K_1 =$  fator de ajuste de carga;
- $dS =$  evolução do dano

## 2.7 DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Segundo Sousa *et al.* (1991), a deformação permanente é causada por uma combinação de densificação (diminuição de volume e aumento de densidade) e deformação de cisalhamento que se desenvolve gradualmente com o aumento do número de aplicações de carga, fazendo com que o pavimento desenvolva o chamado afundamento na trilha de roda (também conhecida pelo termo em inglês *rutting*), comumente caracterizada por apresenta-se em forma de depressões longitudinais ao longo da rodovia. Os autores destacam ainda aspectos de segurança, uma vez que as depressões podem ocasionar hidroplanagem e à medida que avançam em profundidade da pista, dificultam a condução dos veículos. Kaloush (2001) afirma que a deformação permanente provocada pela ação repetitiva das cargas de tráfego é um dos consideráveis tipos de defeitos que afetam o desempenho de pavimentos asfálticos.

Atualmente alguns ensaios de laboratório são utilizados para avaliar desempenho à deformação permanente de misturas asfálticas, como o ensaio *Hamburg Wheel Test* (HWT), o *Asphalt Pavement Analyzer* (APA), fluência estática, fluência dinâmica (*Flow Number* - FN) e o ensaio *Repeated Load Permanent Deformation* (RLPD) (Zhang *et al.*, 2013). O *Report 465* (Wiczak *et al.*, 2002) após um extenso estudo que relacionou parâmetros de campo e laboratório, estabeleceu os ensaios de módulo dinâmico, fluência estática e fluência dinâmica para caracterizar de forma adequada a deformação permanente.

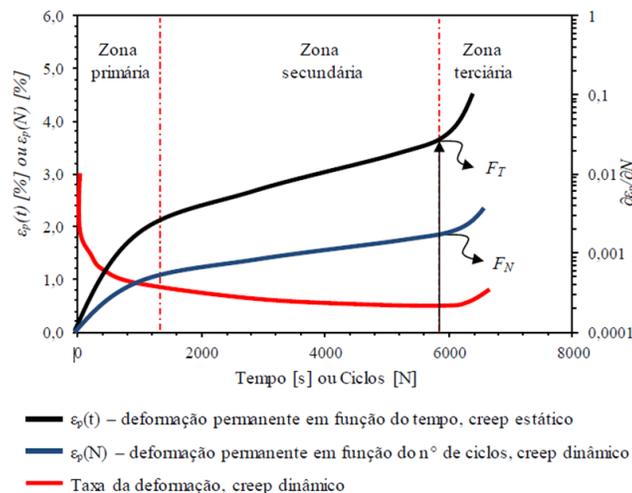
Beja (2020), citando Roberts *et al.* (1996), sumariza o comportamento da deformação permanente nos ensaios triaxiais. Segundo o autor, a fluência estática (ou *creep* estático) avalia a deformação permanente acumulada no tempo, com carga de ensaio similar à função fluência (*creep compliance*), ou tensão constante no tempo, com deformação incremental variando no tempo. Para a fluência dinâmica, a deformação permanente é acumulada por meio do número de ciclos aplicado no ensaio. As curvas de fluência estática e dinâmica expõem três zonas de deformação permanente no tempo ou número de ciclos. A zona primária trata-se da porção em que a taxa da deformação diminui com o tempo ou número de ciclos. A zona secundária ocorre com a taxa da deformação constante, enquanto a zona terciária é a porção onde a taxa cresce de modo assintótico com incremento de tempo ou do número de ciclos. Em ambos os ensaios, o início da zona terciária define um marcador de comportamento, denominado como *flow time* (FT)

e *flow number* (FN) quanto aos ensaios de fluência estática e dinâmica respectivamente (Figura 2.24).

Segundo Nascimento (2008) outra forma de determinação do comportamento de misturas asfálticas à deformação permanente é por meio do uso de simuladores de tráfego. Existem dois tipos de simuladores: (i) de laboratório; e (ii) de verdadeira grandeza. Sousa *et al.* (1991) e Yinfei *et al.* (2018) destacam que é bastante recomendável que os ensaios com uso de simuladores de tráfego sejam conduzidos de acordo com o espectro de carregamento e gradiente de temperatura de campo. Em caso de simuladores de tráfego, Beja (2020) explica que as normas francesas (AFNOR, 1991) limitam o uso de misturas para tráfego pesado caso apresentem deformação acumulada após 30.000 ciclos (passagens de um pneu) superior a 5%. Na Tabela 2.5 apresenta-se o resumo realizado por Beja (2020) que reúne parâmetros/índices passíveis de serem correlacionados com a deformação permanente de campo.

Faccin (2018) realizou um levantamento bibliográfico em que destaca os principais fatores de campo que afetam a resistência à deformação permanente, sintetizando nas características de temperatura, as repetições de carga, o estado de tensões e a ação da água.

Bastos (2016) comenta que o ensaio uniaxial de carga repetida vem sendo realizado por diversos grupos de pesquisa nacionais desde 1996, mas com configurações (número de ciclos, tensão axial e dimensões do CP) diferentes das que estão foram propostas por Witczak *et al.* (2002) além da utilização de diferentes equipamentos, e.g., prensa pneumática ou hidráulica, e metodologias de dosagem (Marshall ou Superpave). A autora reúne as especificações de ensaios uniaxiais realizados no Brasil conforme mostra-se na Tabela 2.6. Ainda segundo Bastos (2016) nessas pesquisas, verifica-se concordância quanto ao tempo de carregamento (0,1 s) e de repouso (0,9 s) similar ao proposto por Witczak *et al.* (2002).



**Figura 2.24** - Resultados dos ensaios de creep estático (FT) e creep dinâmico (FN) (Beja, 2020).

**Tabela 2.5** - Ensaios que estabelecem parâmetros índices para qualificar os materiais e correlacionar com a deformação permanente (Beja, 2020).

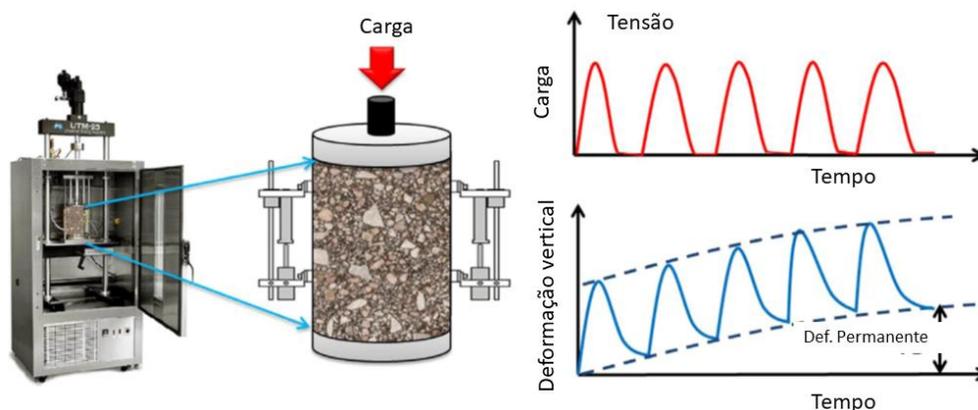
Ensaio	Característica	Descrição
Módulo dinâmico	$ E^* /\text{sen}\phi_{37,8^\circ\text{C}}$ $ E^* /\text{sen}\phi_{54,4^\circ\text{C}}$	$ E^* /\text{sen}\phi_{37,8^\circ\text{C}}$ - razão entre o módulo dinâmico e o seno do ângulo de fase a 37,8°C; $ E^* /\text{sen}\phi_{54,4^\circ\text{C}}$ - razão entre o módulo dinâmico e o seno do ângulo de fase a 54,4°C.
Creep estático	$\epsilon_p(t) = at^b$ $F_T$	$\epsilon_p(t)$ - deformação permanente acumulada no tempo t, devido à aplicação de carregamento estático; a e b - coeficientes de regressão do modelo, dependente das condições de contorno do ensaio; Ft - tempo relativo à indicação da zona terciária.
Creep dinâmico	$\epsilon_p(N) = AN^B + C(e^{DN} - 1)$ $\text{Índice } F_N = \frac{\epsilon_p(F_N)}{F_N}$	$\epsilon_p(N)$ - deformação permanente acumulada com o número de ciclos N, A, B e C - coeficientes de regressão do modelo; Índice $F_N$ - índice de flow number, relação entre a deformação permanente acumulada no ciclo $F_N$ e o próprio flow number dependente das condições de contorno do ensaio; $F_T$ - tempo relativo à indicação da zona terciária.
RLPD	$\epsilon_p(N) = aN^b$ $\alpha = 1 - b$ $\mu = \frac{ab}{\epsilon_p^{100}}$	Curva $\epsilon_p(N)$ vs. N plotada em escala log-log, ensaio conduzido até 10.000 ciclos; $\alpha$ e $\mu$ - parâmetro de deformação; $\epsilon_p^{100}$ - deformação permanente acumulada no 100º ciclo
SPST	$\gamma_s = \frac{d_{p\text{máx}}}{t}$ $G_s = \frac{\tau_s}{\gamma_s}$	$\tau_s$ e $\gamma_s$ - tensão de cisalhamento e distorção cisalhante por unidade de comprimento no plano cisalhado; $p^{\text{máx}}$ e $d_{p\text{máx}}$ - força e deslocamento de pico para promoção do cisalhamento; t e D - espessura e diâmetro do testemunho; $G_s$ - módulo cisalhante.

**Tabela 2.6** - Pesquisas no Brasil que realizaram ensaios uniaxiais com configurações diferentes da proposta de Witczak *et al.* (2002) (Bastos, 2016).

<b>Pesquisador (es)</b>	<b>Local</b>	<b>Tensão axial (kPa)</b>	<b>Temp. (°C)</b>	<b>Dimensão do CP (mm)</b>	<b>Prensa</b>	<b>Dosagem</b>
Motta <i>et al.</i> , 1996b	Rio de Janeiro	100	25 a 45	-		
Santanna-Greco, 2004	São Carlos	400	40	-	Pneumática	Marshall
Wesseling, 2005; Cezaro Junior, 2008	Porto Alegre	100, 400 e 700	45	d=101,6 e h=63,5		
Santos, 2007	Brasília	200	27	-		
D'Antona e Frota, 2011	Manaus	100	40	d=101,6 e h=63 a 70	Hidráulica	Superpave
Soares, 2014	São Carlos	400	40 e 50	-	-	

Specht (2004) avaliou a deformação permanente por meio do ensaio de *creep* dinâmico com aplicação de confinamento em misturas AB produzidas com diferentes metodologias (processo seco e úmido). As misturas também foram submetidas ao ensaio do simulador francês. Nas condições ensaiadas pelo autor, as misturas AB produzidas pelo processo úmido apresentaram o melhor desempenho com relação às misturas com ligante convencional e às misturas agregado-borracha (via seca).

No ensaio FN, as misturas são submetidas a um pré-carregamento de compressão, seguida de um carregamento cíclico de compressão, e a deformação permanente acumulada ( $\epsilon_p$ ) é obtida em função do número de ciclos. O ciclo consiste em um pulso semi-senoidal (*haversine*) de 0,1 s seguido por um repouso de 0,9 s, a uma temperatura especificada. Na Figura 2.25 ilustra-se as configurações do ensaio, aplicação da carga e reposta do corpo de prova. Witczak (2005) recomendou a realização do teste FN a uma temperatura efetiva do pavimento em modo não confinado com uma tensão vertical entre 68,9 e 206,8 kPa.



**Figura 2.25** - Configurações do ensaio FN (modificado-Zhang *et al.*, 2013).

Segundo Rodezno (2010), se os níveis de tensão forem muito baixos, o material geralmente exibe deformação permanente primária e secundária. Nesse caso, a taxa de deformação permanente pode se aproximar de zero quando a deformação total atinge um certo valor. Isso também indica que, em níveis de tensão muito baixos, a região de fluxo terciário pode nunca aparecer, pelo menos dentro de um período razoável.

Seguindo as recomendações do *Report 465* (Witczak *et al.* 2002), Nascimento (2008) fez a primeira pesquisa brasileira a usar ensaios conforme as especificações do documento e recomendar limites de FN para misturas asfálticas densas. Conforme resume Faccin (2018), existem diferentes metodologias adotadas nos ensaios de FN quanto à temperatura, tensão desvio e ao Vv das amostras. A Tabela 2.7 apresenta estes critérios de FN levantados por Faccin (2018).

**Tabela 2.7** - Critérios de FN para diferentes níveis de tráfego da literatura (Faccin, 2018).

Pesquisas/Níveis de Tráfego (número N USACE)	Vv (%)	Temp. (°C)	Tensão (kPa)	Leve	Médio	Pesado	Extremamente pesado
				$3 \times 10^6$	$[3 \times 10^6;$ $1 \times 10^7]$	$[1 \times 10^7;$ $3 \times 10^7]$	$> 3 \times 10^7$
AAT (2011)	4,7 a 8,2	31,3 a 54,3	600	-	53	190	740
Bonaquist (2012)	6,0 a 7,3	49,6	600	15	50	135	415
AASHTO TP 79-15	$7 \pm 0,5$	-	600	-	30	190	740
Nascimento (2008)	6,5 a 7,5	60	204	-	300	750	-
Bastos et al. (2017)	5,5 a 7,5	60	204	-	100	300	>1000

Em 2018 o DNIT lançou o normativo DNIT 184/2018 – ME, onde é descrito o procedimento de ensaio para a estimativa da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas na fase de projeto e construção a partir do ensaio uniaxial de carga repetida. A norma especifica o procedimento em uma temperatura de  $60,0 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , com carga máxima de  $204,0 \pm 4,0$  kPa, utilizando amostras produzidas no compactador giratório, nas dimensões de  $150,0 \pm 2,5$  mm de altura e o diâmetro de  $102,0 \pm 2,0$  mm, apresentando o grau de compactação de  $97,0 \pm 0,5\%$ .

Com relação à execução do ensaio de FN em misturas não convencionais, Barros (2017) e Dapper (2020) ensaiaram misturas do tipo descontínua com a utilização de um ligante AB comercial, conhecido pelo nome ECOFLEX AB-8. Os resultados mostraram que este tipo de combinação entre granulometria e ligante exibiram as menores resistências. Faccin (2018) também realizou ensaios de FN em misturas densas com ligante ECOFLEX AB-8. O autor comenta que apesar dos baixos valores de FN apresentados por estas misturas, os resultados do ensaio de Afundamento de Trilha de Roda (ATR) obtidos nas seções em campo com aplicação do ECOFLEX AB-8 demonstram que a mistura vem apresentando bom desempenho. Faccin (2018) destaca que muito provavelmente, o parâmetro de FN não seja adequado para avaliar as misturas AB. Shah (2018) realizou ensaios de FN em misturas asfálticas descontínuas modificadas com BMP e RAR e uma mistura de granulometria densa. Nas configurações ensaiadas pelo autor, as misturas descontínuas modificadas apresentaram melhor resultado com relação à mistura densa.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi planejada em três principais etapas:

- Na primeira etapa, a fase experimental, buscou-se obter os dados do comportamento das misturas asfálticas, submetidas a diferentes ensaios mecânicos em laboratório. Esta etapa envolveu a caracterização dos materiais e a produção de corpos de prova para execução de ensaios de desempenho mecânico;
- Na segunda etapa, aplica-se a teoria S-VECD, obtendo o comportamento mecânico das misturas e o nível de dano;
- Por fim, os dados experimentais foram utilizados para simular o desempenho de uma estrutura de pavimento real, aplicando as misturas estudadas como camada de revestimento, empregando o programa FlexPAVE™.

Neste capítulo é feita uma breve descrição dos procedimentos e métodos de caracterização dos materiais, do desenvolvimento das misturas asfálticas utilizadas, confecção dos corpos de prova e ensaios de desempenho. Todos os ensaios laboratoriais foram realizados pela autora no Laboratório de Infraestrutura (INFRALAB/FT/UnB), exceto os ensaios químicos na RAR que foram realizados no Instituto de Química (IQ/UnB).

#### 3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O fluxograma da Figura 3.1 apresenta o planejamento e a organização das atividades de cada etapa da pesquisa. A etapa experimental contempla a macro atividade de caracterização dos agregados, da RAR, do ligante CAP 50/70 e sua modificação com 30% de RAR (nomeado de asfalto-borracha com RAR, AB-R30). Estes materiais foram utilizados na segunda macro atividade, durante a produção dos corpos de prova (CPs) por amassamento no compactador giratório, que tiveram por finalidade a execução dos ensaios de desempenho.

O agregado, fornecido pela Pedreira Contagem LTDA, e a curva granulométrica empregados neste estudo são os mesmos utilizados na pesquisa de Nunes (2017). O ligante asfáltico CAP

50/70 também é de mesma origem do utilizado por Nunes (2017) e Nunes *et al.* (2020), da distribuidora Centro Oeste Asfaltos (COAL), recentemente alterada para Betunel, proveniente da REGAP Betim-MG. Devido à diferença dos lotes fornecidos, os ensaios no ligante convencional CAP 50/70, assim como no AB-R30, foram refeitos.

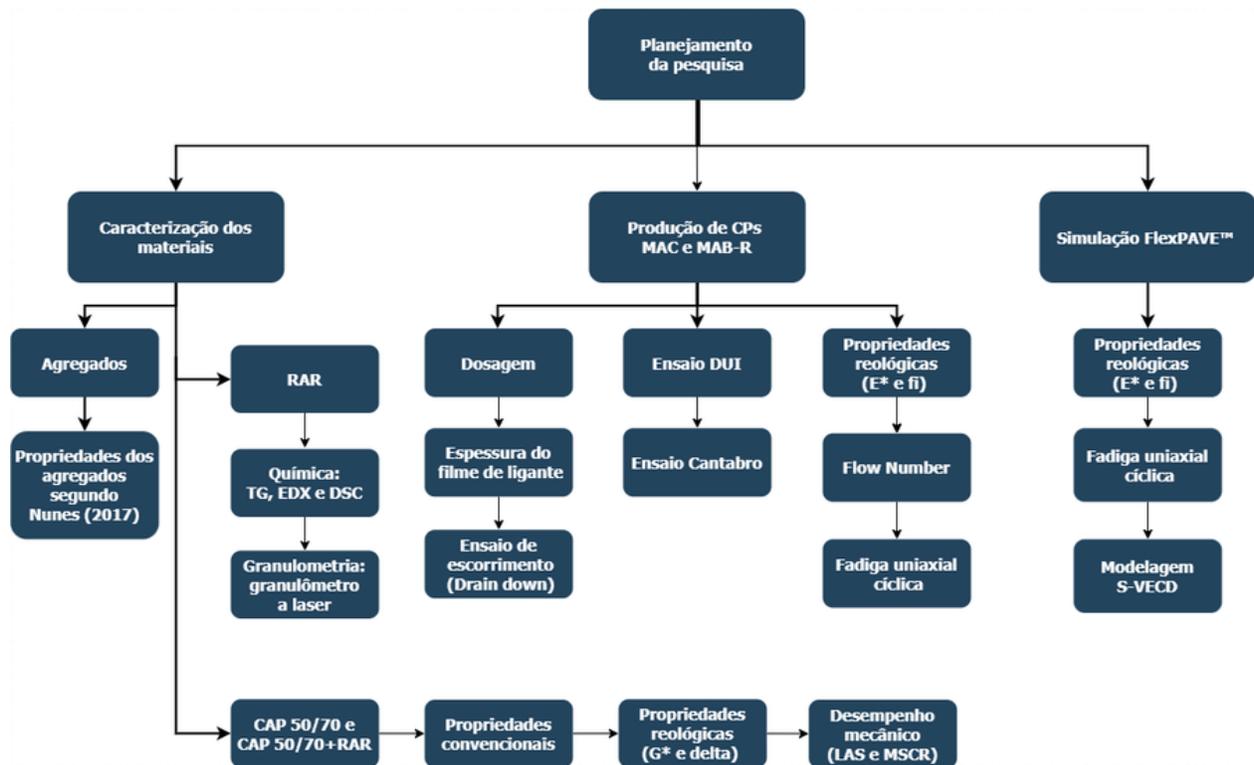


Figura 3.1- Planejamento da pesquisa.

A pesquisa de Nunes (2017) e Lopes *et al.* (2021) evidenciaram que para os materiais e condições ensaiadas, a modificação por RAR em 30% (em massa de ligante), tanto para as modificações realizadas no ligante base quanto na mistura asfáltica, apresentaram o melhor desempenho à fadiga. Desta forma, no presente estudo, adotou-se tal proporção de modificação, a fim de melhor caracterizar o comportamento de ligantes e misturas com adição de RAR, abrangendo outros tipos de ensaios. Para os ligantes foram realizados todos os ensaios descritos em Nunes (2017) e foi acrescentado o *Multiple Stress Creep and Recovery* (AASHTO T 350). Para as misturas asfálticas o módulo dinâmico foi obtido em amostras cilíndricas (AASHTO T 378), e foi realizado o ensaio de fadiga axial cíclica (AASHTO TP 107) e *Flow Number* (DNIT 184/2018 - ME).

Para fins de comparação, foi idealizada a produção de uma Mistura de Controle (MAC), adotando a granulometria *gap-graded* e ligante CAP 50/70 sem modificação, e uma Mistura Asfalto-Borracha com RAR (MAB-R30), com a mesma granulometria *gap-graded*, ligante CAP 50/70 e adição de RAR na proporção de 30% em massa de ligante. As misturas foram produzidas após o processo de dosagem no compactador giratório, considerando a aplicação da mistura asfáltica para um tráfego acima de 30 milhões de ESALs.

### 3.1.1 Matriz experimental

A matriz experimental da pesquisa é apresentada na Tabela 3.1 que mostra o número total de ensaios realizados para cada ligante, CAP 50/70 e AB-R30, e para cada mistura asfáltica, MAC e MAB-R30. As configurações empregadas durante a realização dos procedimentos serão discutidas neste capítulo.

**Tabela 3.1**-Número de ensaios conduzidos para cada ligante e para cada mistura asfáltica.

<b>LIGANTES</b>			
<b>Ensaio</b>	<b>Temperatura/Frequência/Carregamento/Níveis de deformação</b>	<b>Réplicas</b>	<b>Total de ensaios</b>
Grau PG	5 Temperaturas x 1 Frequência x 1 Nível de deformação	3	15
Módulo Dinâmico	6 Temperaturas x 11 Frequências x 1 Nível de deformação	3	18
LAS	1 Temperatura x 1 Frequência x 1 Nível de deformação	3	3
MSCR	4 Temperaturas x 1 Frequência x 2 Níveis de tensão	3	12
<b>MISTURAS</b>			
Dano por Umidade Induzida-DUI	1 Temperaturas x 2 configurações (amostras condicionadas e não condicionadas)	3	6
Cantabro	1 Temperaturas x 1 configuração	3	3
Módulo Dinâmico	5 Temperaturas x 6 Frequências	2	10
<i>Flow Number</i>	1 Temperatura x 1 Nível de tensão	3	3
Fadiga axial cíclica	1 Temperatura x 4 Níveis de deformação	1	4

## 3.2 ENSAIOS QUÍMICOS

A RAR consiste em cerca de 62 a 65% de borracha moída, 20 a 25% de asfalto convencional e 15 a 20% de *filler*. Por ser um produto comercializado e patenteado no mercado da pavimentação, o processo físico-químico que envolve a sua obtenção não é totalmente claro na literatura. Buscando por melhores informações sobre sua composição química de modo a

compreender a ação do material quanto agente modificador de ligantes e misturas asfálticas, foram realizados alguns ensaios químicos no Instituto de Química da UnB.

### **3.2.1 Fluorescência de Raio X por Energia Dispersiva (XRF/EDX)**

A espectrometria de fluorescência de raios X (XRF/EDX) é uma técnica analítica não-destrutiva utilizada para obter informações elementares a partir de diferentes tipos de materiais. Nesta técnica as radiações características de todos os elementos de uma amostra são registradas por um detector, produzindo um pulso eletrônico cuja amplitude é proporcional à energia da radiação emitida pela amostra. Com o auxílio de um sistema analisador multicanal é possível separar os pulsos pela sua amplitude, obtendo-se assim um espectro em função da energia de radiação incidente no detector (Asfora, 2010).

Para a análise dos elementos a partir do 3º período da tabela periódica presentes na RAR, utilizou-se um espectrômetro de fluorescência de raios X (tubo de ródio) por energia dispersiva (XRF/EDX) da Central Analítica do Instituto de Química da UnB da marca Shimadzu, modelo EDX 720 HS, a vácuo com colimador de 5 mm e feixe variando de 50 keV (canal Ti-U, passo de 0,02) a 15 keV (canal Na-Sc, passo de 0,01) com 2048 pontos. Este equipamento permite a análise da faixa de elementos que abrange do sódio ( $^{11}\text{Na}$ ) ao urânio ( $^{92}\text{U}$ ).

### **3.2.2 Análise Térmica Gravimétrica**

A termogravimetria (TG) é uma técnica poderosa de caracterização composicional em elastômeros, permitindo obter com exatidão a quantidade de materiais presentes em um composto, desde que eles tenham comportamentos de volatilização diferentes (Williams e Besler, 1995; Kleps *et al.*, 2000). É uma das técnicas de análises térmicas de tipo quantitativo, na qual uma propriedade do polímero é avaliada em função de condições de temperatura controlada. A técnica TG registra as mudanças da massa da amostra em função da temperatura. As variações na massa do corpo de prova são verificadas pela balança interna de alta precisão do instrumento, à medida que ocorre a queima do produto pelo aumento da temperatura.

Neste trabalho foi estudada a estabilidade térmica da RAR por meio da Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Derivada (DTG). As curvas termogravimétricas e as análises foram obtidas por meio de analisador termogravimétrico da Central Analítica do Instituto de Química da UnB da Shimadzu, modelo DTG-60H, em atmosfera de ar inerte, massa da amostra de

aproximadamente 10 mg, com variação da temperatura ambiente até 600°C, razão de aquecimento de 10°C min<sup>-1</sup> e uma vazão do gás nitrogênio de 30 mL min<sup>-1</sup>. A manipulação das curvas de análise térmica foi feita com os programas Universal Analysis (TA Instruments, versão 3.1E) e Origin versão 8.0.

### **3.2.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)**

A Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) é uma técnica termoanalítica na qual mede-se a diferença de energia fornecida à substância e a um material de referência, em função da temperatura enquanto a substância e o material referência são submetidos a uma propagação controlada de temperatura. De acordo com o método utilizado há duas modalidades: calorimetria exploratória diferencial com compensação de potência e calorimetria exploratória diferencial com fluxo de calor. A partir da técnica, podem-se acompanhar os efeitos do calor associados com as alterações físicas ou químicas da amostra, tais como transições de fase (fusão ebulição, sublimação, congelamento, inversões de estruturas cristalinas) ou reações de desidratação, de dissociação, de decomposição, de redução, etc. capazes de causar variações de calor. Em geral transições de fase, desidratações, reduções e certas reações de decomposição produzem efeitos endotérmicos, enquanto que cristalizações, oxidações, algumas reações de decomposição produzem efeitos exotérmicos (Ionashiro *et al.*, 2005).

A curva DSC da RAR foi obtida em uma faixa de temperatura de -100°C a 150°C, com duas varreduras e taxa de aquecimento de 10 °C.min<sup>-1</sup>, sendo a segunda varredura usada para análise. A massa de amostra de aproximadamente 5 mg foi colocada em cela de alumínio selada. O calorímetro utilizado foi um DSC-60/Shimadzu da Central Analítica do Instituto de Química da UnB.

## **3.3 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MINERAL**

Os agregados provenientes de jazidas de rochas calcárias foram doados pela Pedreira Contagem LTDA, localizada na Rodovia DF-205, km 61, na Fazenda Palmeira na Região administrativa de Sobradinho. Na caracterização dos agregados foram adotados procedimentos convencionais preconizados pelo DNIT além de testes da especificação SUPERPAVE.

Segundo os dados presente em Nunes (2017), os índices do material granular e a respectiva norma utilizada são apresentados na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2-** Propriedades ensaiadas nos agregados, normativas, especificações e valores (Nunes, 2017).

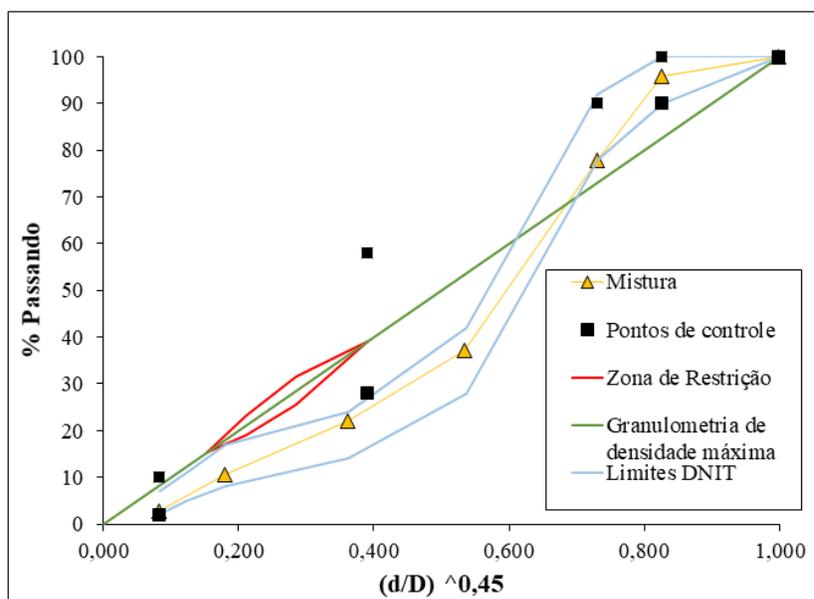
Ensaio	Método	Especificação	Valor
<b>AGREGADOS GRAÚDOS</b>			
Abrasão Los Angeles (%)	DNER ME 078	máx 30	16
Índice de forma	DNER ME 086	mín 0,5	0,9
Chatos e alongados, 3/4"-1/2" (%) 5 para 1	ASTM D 4791	máx 10	1,6
Chatos e alongados, 1/2"-3/8" (%) 5 para 1		máx 10	2,3
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )			
Real			2,758
Aparente	ASTM C 127		2,710
Aparente SSS			2,727
Absorção (%)			0,65
<b>AGREGADOS MIÚDOS</b>			
Angularidade (%)			
N10-N40	ASTM C 1252 (método B)	mín 45	49
N40-N200		mín 45	55
Teor de argila (%)	ASTM D 2419	mín 55	75
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )			
Real			2,775
Aparente	ASTM C 128		2,830
Aparente SSS			2,794
Absorção (%)			0,94
<b>FÍLER</b>			
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	DNER ME 085		2,752

Para a fabricação das misturas optou-se pela composição granulométrica *gap-graded*, comumente empregada nos estudos referentes à produção de misturas asfalto-borracha. Esta granulometria se caracteriza pela distribuição de forma descontínua dos agregados contendo pouca ou nenhuma quantidade de uma ou duas frações miúdas, promovendo maior contato entre os agregados graúdos (Caltrans, 2003). ARPG (1989) *apud* Sousa *et al.* (2006) afirma que uma vez que o asfalto-borracha possui valores de viscosidade elevada quando comparado a um asfalto convencional, esse apresenta melhor desempenho quando incorporado a uma mistura de granulometria graúda, com maiores valores de VAM.

A composição granulométrica da mistura respeitou os limites mínimos e máximos da faixa descontínua recomendados pelo ADOT e pelo DNIT (especificação de serviço DNIT 112/09), como é apresentado na Tabela 3.3 e na Figura 3.2.

**Tabela 3.3-** Distribuição granulométrica da mistura e faixas de limite do ADOT e DNIT.

Tamanho da malha (")	(mm)	d/D <sup>0,45</sup>	Porcentagem passando (%)			Retida (%)
			Limites DNIT		Mistura	
3/4"	19,1	1,00	100	100	100	-
1/2"	12,5	0,83	90	100	95,9	4,1
3/8"	9,5	0,73	78	92	77,9	18
N° 4	4,75	0,54	28	42	37,2	40,7
N° 10	2	0,36	14	24	22,1	15,1
N° 40	0,425	0,18	8	17	10,6	11,5
N° 80	0,18	0,12	5	11	-	7,8
N° 200	0,075	0,08	2	7	2,8	2,8



**Figura 3.2-** Curva granulométrica adotada, limites máximo e mínimo segundo a faixa do DNIT, plotados juntamente com a curva de densidade máxima, pontos de controle e zona de restrição para o TNM de 12,5mm.

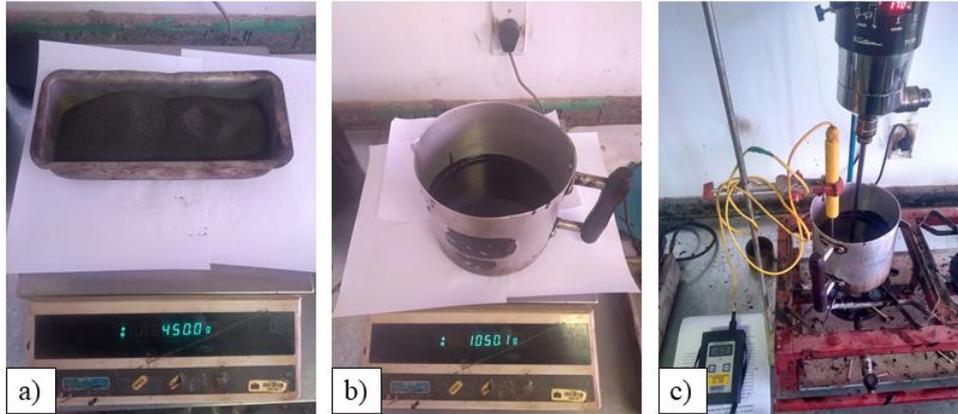
Na Figura 3.2 é apresentada a curva granulométrica adotada para a mistura com base nos princípios da graduação dos agregados na metodologia Superpave. Segundo a metodologia, a granulometria de uma mistura é baseada em quatro peneiras de controle: a peneira máxima, a

peneira máxima nominal, a peneira de 2,36 mm e a peneira de 0,075 mm de abertura, que formam os pontos de controle. Estes funcionam como pontos mestres onde a curva granulométrica deve passar. A peneira de tamanho máximo nominal (TMN) é uma peneira de tamanho imediatamente acima da primeira peneira que reter mais de 10% do agregado combinado e a dimensão máxima é um tamanho acima da peneira de tamanho máximo nominal. A composição granulométrica deste trabalho apresenta tamanho máximo nominal de 12,5 mm e dimensão máxima de 19,1 mm. Segundo o livro publicado pela *Westrack Forensic Team (US)* (2001), em geral, é recomendado (mas não obrigatório) que conforme o nível de tráfego aumenta, a granulometria do agregado passe pelos pontos de controle mínimos, abaixo da zona de restrição, produzindo granulometrias graúdas que proporcionem uma estrutura resistente de agregados.

Observando a Tabela 3.3 e a Figura 3.2, percebe-se que existe uma descontinuidade da curva granulométrica entre as peneiras de abertura 12,5 mm e 4,75 mm, representada pela parte da curva com maior inclinação, indicando pouca presença de materiais desta faixa granulométrica. A porcentagem de agregado retido na malha de 4,75 mm é de 40,7% do material, sendo esta a dimensão predominante na mistura descontínua densa (*gap-graded*). Entre as malhas com aberturas de 4,75 mm e 0,075 mm, a mistura apresenta distribuição contínua, mas retendo menores porcentagens de agregado nesta faixa granulométrica quando comparada a curva de densidade máxima, indicada na Figura 3.2. Essas características, buscam garantir à mistura asfáltica valor elevado de VAM, como discutido no item 2.2.3.

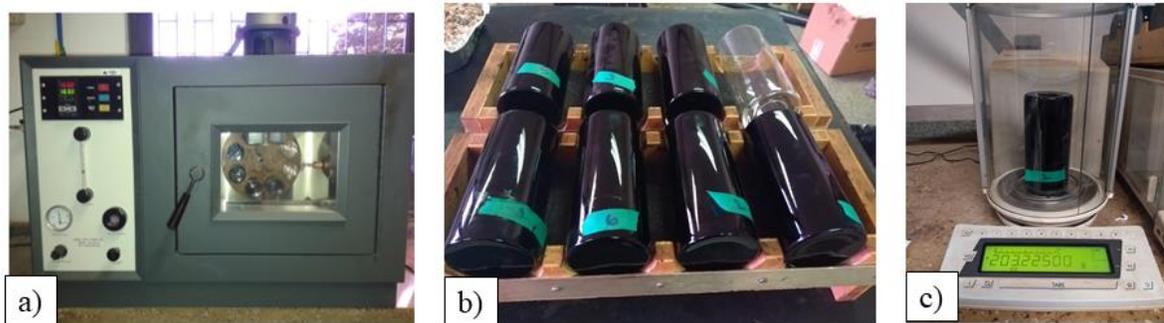
### **3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS**

No preparo das amostras foi utilizado como ligante asfáltico base o CAP 50/70 fornecido pela Centro Oeste Asfaltos, pertencente ao grupo Betunel, localizada no Setor de Inflamáveis Brasília – DF. A fim de garantir maior uniformidade nos resultados esperados, foi produzido um 1,5 kg de ligante modificado AB-R30, sob agitação mecânica por 10 minutos em temperatura de 160°C. No ligante AB-R30 buscou-se atender os parâmetros normatizados pela ASTM D 6114 que estipula os valores mínimos e máximos para a classificação do ligante produzido como ligante asfalto-borracha. A Figura 3.3 apresenta as etapas de produção do AB-R30.



**Figura 3.3-**Produção de 1,5 Kg de AB-R30: a) Massa de RAR; b) Massa de ligante CAP 50/70 e c) Agitação por 10 minutos a 160°C.

Tanto no ligante base CAP 50/70 quanto no ligante modificado AB-R30, foram realizados os ensaios de caracterização física para as condições virgem e envelhecida, sendo este último procedido segundo a ASTM D 2872/12 metodologia do ensaio *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT).



**Figura 3.4-**Etapas do ensaio RTFO: a) tempo de envelhecimento em forno específico; b) condição dos frascos após o ensaio; c) conferência da perda de massa durante o ensaio.

O CAP 50/70 foi envelhecido à temperatura de 163°C, porém, os ligantes modificados foram envelhecidos a 175°C, uma vez que a 163°C o ligante não se espalhava uniformemente no frasco de ensaio. Situação similar é relatada no Projeto 9-10 do NCHRP (Bahia *et al.*, 2001) e no estudo de Camargo (2016).

### 3.4.1 Caracterização convencional

Nos ligantes CAP 50/70 e AB-R30, para a condição virgem foram realizados os ensaios de penetração (DNIT ME 155/10), ponto de amolecimento (DNIT ME 131/10), viscosidade rotacional (ASTM D 4402/15), ponto de fulgor (DNER ME 148/94) e densidade (DNER ME 193/96). Para a condição envelhecida, foram repetidos os ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional. A Tabela 3.4 apresenta os ensaios realizados e condições aplicadas em cada um dos ligantes.

**Tabela 3.4-**Ensaio de caracterização convencional dos ligantes asfálticos

Ensaio	Norma	Condição
Penetração	DNIT ME 155/10	Virgem e envelhecida
Ponto de Amolecimento	DNIT ME 131/10	Virgem e envelhecida
Viscosidade rotacional	ASTM D 4402/15	Virgem e envelhecida
Ponto de fulgor	DNER ME 148/94	Virgem
Densidade relativa e massa específica	DNER ME 193/96	Virgem

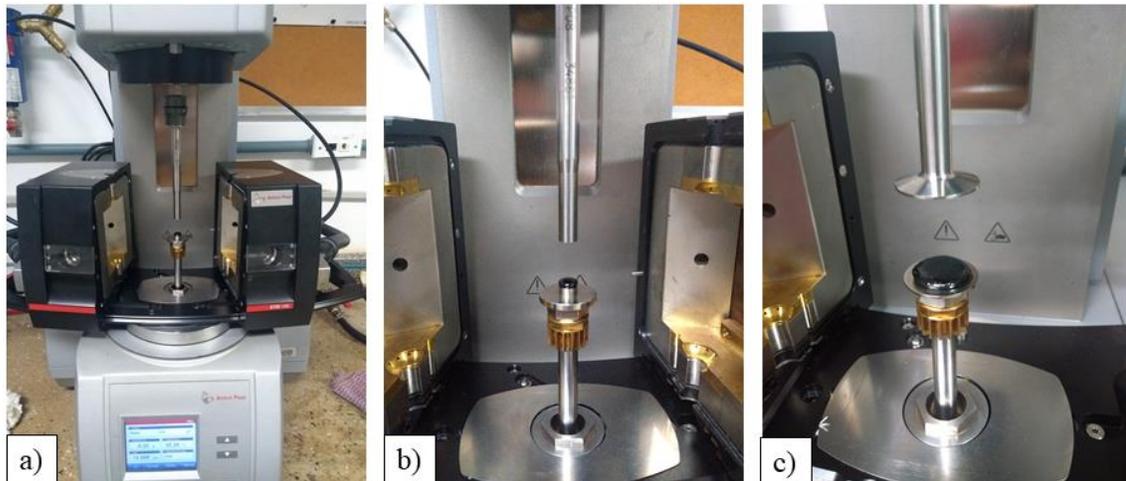
### 3.4.2 Caracterização reológica de ligantes asfálticos

O reômetro de cisalhamento dinâmico ou *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) é um aparelho que permite a caracterização reológica de vários materiais viscoelásticos. O DSR permite a obtenção de diversas propriedades reológicas, mais precisamente valores de módulo dinâmico e ângulo de fase, sob diferentes condições de deformação, tensão, frequência e temperatura. Desta forma o equipamento é uma ferramenta bastante utilizada para avaliar as propriedades dos ligantes asfálticos e mais recentemente vem sendo empregado para o estudo de resistência à fadiga e à deformação permanente.

Para ensaios em ligantes asfálticos no DSR, uma amostra cilíndrica é posicionada entre duas placas paralelas como mostra a Figura 3.5. A placa superior gira enquanto a placa inferior é fixa e assim é possível aplicar e medir o torque (T) e o ângulo de deflexão ( $\varphi_{DSR}$ ). A deformação cisalhante ( $\gamma$ ) segundo a Equação 3.1 e a tensão cisalhante ( $\tau$ ) segundo a Equação 3.2 são calculadas e reportados pelo instrumento.

$$\gamma = \frac{\varphi_{DSR} \cdot r}{h} \quad (3.1)$$

$$\tau = \frac{2 \cdot T}{\pi \cdot r^3} \quad (3.2)$$



**Figura 3.5-** a) Visão geral do DSR instalado no Infralab b) Montagem de ensaio com placas paralelas de 8 mm de diâmetro, posicionamento da amostra para ensaio e c) Montagem de ensaio com placas paralelas de 25 mm de diâmetro, posicionamento da amostra para ensaio.

Os ligantes CAP 50/70 e AB-R30 foram ensaiados no reômetro de cisalhamento dinâmico do INFRALAB da marca Anton Paar, modelo MCR 102. Foram conduzidos os ensaios de classificação do grau PG, caracterização das propriedades reológicas para construção da curva mestra, ensaios acelerados de fadiga (LAS) e ensaio de deformação permanente (MSCR).

#### 3.4.2.1 Classificação de desempenho PG

Para os ligantes asfálticos em estudo foi determinado o grau PG para a temperatura mais elevada, objetivando o atendimento aos limites especificados na norma AASHTO T 315-12. Uma vez que o INFRALAB não possui o equipamento de envelhecimento a longo prazo instalado, considerou-se as condições virgem e envelhecida em RTFOT.

As amostras virgens e envelhecidas no RTFOT foram testadas em temperaturas superiores a 46°C, com geometria de 25 mm de diâmetro e com espaçamento entre placas de 1 mm de altura para o CAP 50/70 e espaçamento de 2 mm de altura para o ABR-30.

A especificação AASHTO M 315 - 12 emprega o parâmetro  $|G^*|/\sin \delta$  para temperaturas elevadas ( $\geq 46^\circ\text{C}$ ) para controlar a rigidez dos ligantes asfálticos. Para este estudo, os testes

foram conduzidos à deformação controlada com valores de 12% e 10%, em amostras virgens e envelhecidas em RTFOT, respectivamente.

A norma preconiza valores de  $|G^*|/\text{sen } \delta$  maiores ou igual a 1,0 kPa para a condição virgem e maiores ou igual a 2,2 kPa para condição pós RTFO. A análise do grau PG consiste em determinar qual o valor de temperatura obedece aos critérios mencionados. Durante o ensaio também é verificado a temperatura *pass/fail* chamada neste trabalho de temperatura limite do ligante asfáltico. Esta temperatura representa o valor exato da máxima temperatura em que o ligante resiste aos valores específicos de  $|G^*|/\text{sen } \delta$ , sem adotar o intervalo de 6 em 6°C estabelecido pela metodologia Superpave.

### 3.4.2.2 Módulo dinâmico e ângulo de fase

Para esta caracterização foram utilizadas geometrias de placas paralelas de 25 mm e 8 mm de diâmetro. Recomenda-se o espaçamento de 1 mm entre as placas superior e inferior quando utilizado o diâmetro de 25 mm, porém no caso dos ligantes modificados devido a influência dos grânulos de borracha, o espaçamento adotado foi de 2 mm. Pela mesma razão, Camargo (2016) também utilizou o distanciamento de 2 mm em seus ensaios com asfalto-borracha.

Para a obtenção de valores do módulo cisalhante dinâmico  $|G^*|$  e ângulo de fase  $\delta$  foram conduzidos ensaios de varredura de frequência e temperatura no modo de deformação controlada. Os ensaios foram executados em um mínimo de três amostras por ligante. A caracterização reológica foi realizada conforme o modelo sigmoidal e as equações apresentadas no item 2.4 do Capítulo 2. Segue as configurações realizadas durante os ensaios:

- Modo de carregamento: deformação controlada;
- Temperaturas: 10°C a 75°C, em intervalos de 5 ou 10°C;
- Frequências: 0,10; 0,16; 0,25; 0,40; 0,63; 1; 1,16; 2,5; 4; 6,3 e 10 Hz;
- Geometrias da placa: 8 mm com espaçamento entre placas de 2 mm (de 10 a 45°C), 25 mm com espaçamento entre placas de 1 mm e de 2 mm (de 25 a 75°C).
- Amplitude de deformação (dentro do limite de viscoelasticidade linear dependente de  $G^*$ ): de 0,1 até 2% com placas de 8 mm, de 2 a 12% com placas de 25 mm.

### 3.4.2.3 *Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)*

Pesquisas anteriores (Bahia *et al.*, 2001; Shenoy, 2001; Shenoy, 2002) provaram a inadequação dos parâmetros  $G^*/\text{sen}\delta$  e  $G^*\text{sen}\delta$  relacionados a deformação permanente e fadiga, respectivamente, estabelecidos pela especificação Superpave. A ineficácia destes é devido aos baixos níveis de deformação aplicados durante os ensaios, que se delimitam à região da viscoelasticidade linear quando na verdade o fenômeno ocorre sob grandes deformações, sob domínio da viscoelasticidade não-linear.

Desta forma, pesquisas realizadas por D'Angelo *et al.* (2007) culminaram na criação do ensaio *Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)*, que estabeleceu novas condições de teste e parâmetros, que melhor representam o comportamento do ligante asfáltico quanto à deformação permanente. O ensaio é realizado no DSR e procede segundo a normativa da AASHTO TP70/T350 ou ASTM D7405.

O MSCR seguiu o protocolo da AASHTO T350-14. Neste ensaio a amostra é submetida a tensão cisalhante constante durante 1 s e posteriormente é permitida a recuperação por 9 s. São aplicados dez ciclos de fluência e recuperação a tensão constante de 0,1 kPa seguidos por dez ciclos a tensão constante de 3,2 kPa. Foram testadas amostras na geometria de placas de 25 mm e espaçamento de 1 mm entre placas para CAP 50/70 e a mesma geometria, com espaçamento de 2 mm para as amostras de AB-R30, evitando a influência dos grânulos de borracha nos resultados. Foram ensaiadas no mínimo duas réplicas para cada ligante nas temperaturas de 52, 58, 64 e 70°C. Do ensaio MSCR obtém-se parâmetros de percentual de recuperação (R) para cada estágio de fluência, da compliância não-recuperável ( $J_{nr}$ ) e a diferença percentual entre as compliâncias não-recuperáveis ( $J_{nr,diff}$ ), apresentadas nas equações 3.3, 3.4 e 3.5, respectivamente:

$$R = \frac{\gamma_R}{\gamma_p} \times 100 \quad (3.3)$$

$$J_{nr} = \frac{\gamma_u}{\tau} \quad (3.4)$$

$$J_{nr,diff} = \frac{J_{nr,3200} - J_{nr,100}}{J_{nr,100}} \times 100 \quad (3.5)$$

onde  $R$  é o percentual de recuperação,  $y_R$  é a deformação recuperável,  $y_p$  é a deformação de pico,  $J_{nr}$  é a compliância não-recuperável,  $y_u$  é a deformação não-recuperável,  $\tau$  é a tensão aplicada durante o ciclo,  $J_{nr100}$  é a compliância não-recuperável a 100 Pa e  $J_{nr3200}$  é a compliância não recuperável a 3200 Pa.

$J_{nr}$  é definido como a deformação residual em uma amostra após um ciclo de fluência e recuperação dividida pela tensão aplicada e assim é considerado um indicador de resistência do ligante asfáltico à deformação permanente sob carga repetida. A recuperação percentual destina-se a fornecer um meio para determinar a presença de resposta elástica e dependência de tensão de ligantes asfálticos modificados e não modificados durante o ensaio.

#### **3.4.2.4 Linear Amplitude Sweep (LAS)**

O ensaio de varredura de amplitude linear (AASHTO TP 101) foi proposto para especificações de fadiga de ligantes asfálticos. O ensaio consiste na solicitação de cargas cíclicas repetidas DSR e utiliza amplitudes de tensão sistematicamente crescentes para acelerar o crescimento dos danos. O procedimento de teste demora aproximadamente 30 min, incluindo o tempo para o equilíbrio térmico. O modelo S-VECD demonstrou ser aplicável para a análise dos resultados do ensaio LAS, permitindo assim a previsão da evolução dos danos em condições variáveis de carga (Hintz *et al.*, 2011; Safaei *et al.*, 2014).

O ensaio de varredura de amplitude linear, LAS, foi realizado para os ligantes envelhecidos a curto prazo segundo as determinações da AASHTO TP101 (2014). A amostra foi testada utilizando a geometria de placas paralelas de 8 mm de diâmetro com espaçamento de 2 mm entre as placas. O ensaio é dividido em duas etapas: (1) é realizada uma varredura de frequência entre 0,1 e 30 Hz para determinar as propriedades reológicas na região de viscoelasticidade linear utilizando a amplitude de deformação de 0,1% e (2) uma amplitude de deformação entre 0,1 e 30% é realizada a uma frequência fixa de 10 Hz. Foram ensaiadas no mínimo três réplicas por ligante. Os resultados do ensaio são utilizados para ajustar um modelo de fadiga dos ligantes asfálticos, utilizando o modelo S-VECD, a fim de calcular as constantes A e B da lei de fadiga, mostrados na Equação 3.6, a partir dos parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\alpha$ ,  $m$ ,  $k$  e  $D_f$  como mostra nas equações de 3.7 a 3.15:

$$N_f = A \cdot \gamma^B \quad (3.6)$$

onde os parâmetros A e B são característicos do material e  $\gamma$  é a deformação máxima esperada para uma dada estrutura do pavimento. A seguir é descrito a metodologia de cálculo para os parâmetros.

Primeiramente, os dados do módulo dinâmico cisalhante ( $|G^*|$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ) obtidos pela varredura de frequências, são convertidos em módulo de armazenamento,  $G'$ , para cada frequência como mostra a Equação 3.7:

$$G'(\omega) = |G^*|(\omega) \cdot \cos\delta(\omega) \quad (3.7)$$

Um ajuste linear é aplicado para plotar em um gráfico log-log o módulo de armazenamento versus a frequência, conforme a Equação 3.8:

$$\log G'(\omega) = m(\log\omega) + b \quad (3.8)$$

onde  $m$  é a inclinação da reta do gráfico. Assim  $\alpha$  é dado pela Equação 3.9:

$$\alpha = \frac{1}{m} \quad (3.9)$$

Com os resultados do ensaio LAS, o dano acumulado na amostra é calculado pela soma formulada segundo a Equação 3.10:

$$D(t) = \sum_{i=1}^N [\pi\gamma_0^2 (C_{i-1} - C_i)]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad 3.10$$

onde:

$D(t)$  = Dano acumulado em determinado número de ciclos,

$C(t) = \frac{|G^*|(t)}{|G^*|_{inicial}}$ ,  $|G^*|$  no tempo, dividido pelo valor inicial de  $|G^*|$ , representa a integridade do material,

$|G^*|$  = Módulo complexo cisalhante, em MPa,

$N$  = Número de ciclos,

$\gamma_0$  = Deformação cisalhante inicial,

$t$  = tempo de ensaio, em segundos.

Para cada ponto em um dado tempo  $t$ , os valores de  $C(t)$  e  $D(t)$  são armazenados (é assumido que  $C$  em  $D(0)$  é igual a 1, e que  $D(0)$  é igual a zero). A relação entre  $C(t)$  e  $D(t)$  pode ser ajustada pela Equação 3.11:

$$C_{(t)} = C_0 - C_1(D)^{C_2} \quad (3.11)$$

onde  $C_0$  é igual a 1, o valor inicial de  $C$ , e  $C_1$  e  $C_2$  são coeficientes da curva ajustada obtidos pela linearização relação adaptada de Hinzt *et al.* (2011) mostrada na Equação 3.12:

$$\log(C_0 - C(t)) = \log(C_1) + C_2 \cdot \log(D(t)) \quad (3.12)$$

Usando a (3.12),  $C_1$  é calculado como o anti-log da interseção e  $C_2$  é calculado como a inclinação da linha formada por  $\log(C_0 - C(t))$  versus  $\log(D(t))$ . Para o cálculo de ambos  $C_1$  e  $C_2$ , os dados que correspondem a valores de dano menores que 10 são ignorados.

O valor de  $D(t)$  na ruptura,  $D_f$ , é definido como o valor de  $D(t)$  que corresponde à redução do valor inicial de  $|G^*|$ , que ocorre na tensão cisalhante de pico. O valor de  $D_f$  é calculado pela Equação 3.13:

$$D_f = \left( \frac{C_0 - C_{Tensão\ de\ Pico}}{C_1} \right)^{\frac{1}{C_2}} \quad (3.13)$$

Assim, o parâmetro A da lei de fadiga segundo a Equação é definido pela Equação 3.14:

$$D_f = \left( \frac{C_0 - C_{Tensão\ de\ Pico}}{C_1} \right)^{\frac{1}{C_2}} \quad (3.14)$$

onde:

$f$  = frequência de carregamento (10 Hz) e

$$k = 1 + (1 - C_2)\alpha,$$

e o parâmetro B da lei de fadiga, também segundo a Equação, é definido pela Equação 3.15:

$$B = 2\alpha \quad (3.15)$$

O programa do reômetro Anton Paar indica um endereço eletrônico no qual pode ser obtida a planilha para a avaliação da lei de fadiga segundo o modelo viscoelástico de dano contínuo simplificado. Esta planilha em *Excel*, utilizada na etapa de processamento dos resultados deste trabalho, utiliza as equações aqui apresentadas.

### 3.4.3 Programa experimental e configurações utilizadas nos ensaios dos ligantes

Foram produzidas amostras dos ligantes asfálticos nas condições virgem e envelhecida, em moldes de silicone, segundo as especificações de norma para cada ensaio. A Tabela 3.5 apresenta as configurações adotadas durante a realização dos ensaios no CAP 50/70 e no AB-R30. Os procedimentos, normas e geometrias utilizadas em cada ensaio são abordados em detalhe nos itens seguintes do capítulo.

**Tabela 3.5-**Resumo das configurações adotadas para cada ensaio realizado nos ligantes CAP 50/70 e AB-R30.

<b>Ligantes</b>			
<b>Grau PG</b>	De 46°C a 70°C (intervalos de 6°C)	Frequências	1,59 Hz
		Deformação de ensaio	12%
		Modo de carregamento	Deformação controlada
<b>Módulo Dinâmico e Ângulo de fase</b>	10°C a 75°C (intervalos de 5°C a 10°C)	Frequências	0,1; 0,16; 0,25; 0,40; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3 e 10 Hz
		Deformação de ensaio	0,1 – 2,0% e 2,0 -12%
		Modo de carregamento	Deformação controlada
<b>MSCR</b>	52°C a 70°C (intervalos de 6°C)	Frequências	0,1; 0,16; 0,25; 0,40; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3 e 10 Hz
		Deformação de ensaio	0,1 – 2,0% e 2,0 -12%
		Modo de carregamento	Tensão controlada
<b>LAS</b>	20°C	Frequência	10 Hz
		Deformação de ensaio	0,1%
		Modo de carregamento	Deformação controlada

### 3.5 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS POR COMPACTAÇÃO GIRATÓRIA

A compactação da mistura foi realizada por amassamento (giros) no compactador giratório do INFRALAB - UnB, um Troxler modelo 5850, como pode ser visto na Figura 3.6. O compactador giratório utilizado foi configurado nas seguintes características: ângulo de giro de  $1,25 \pm 0,2^\circ$ ; rotação de 30 giros por minuto e pressão vertical durante os giros de 600 kPa.



**Figura 3.6-** Compactador giratório SUPERPAVE.

Os valores de número de giros inicial, de projeto e máximo,  $N_{inicial}$ ,  $N_{projeto}$  e  $N_{máximo}$ , respectivamente, são definidos de acordo com o volume de tráfego. O esforço de compactação  $N_{projeto}$  é utilizado para selecionar o teor de asfalto. (Asphalt Institute, 2007). A Tabela 3.6 mostra a definição do número de giros para tráfego o qual se destina a aplicação da mistura asfáltica.

Foi realizada a dosagem com relação aos parâmetros volumétricos, conforme é previsto para o Nível 1, da metodologia de dosagem Superpave. A partir de experiências de dosagens anteriores com a utilização de asfalto-borracha (Nunes, 2017) e da granulometria estabelecida, foram definidos os teores a serem testados para a determinação do teor de projeto. Uma vez que a mistura é projetada com finalidade estrutural, o número de giros foi definido para alto tráfego (>30 milhões de ESALs). Sendo assim, 9 giros para  $N_{inicial}$ , 125 giros para  $N_{projeto}$  e 205 giros para  $N_{máximo}$ .

**Tabela 3.6-** Seleção do número de giros para o compactador SUPERPAVE (Asphalt Institute, 2007).

Tráfego, ESALs ( $10^6$ )	Parâmetros de compactação		
	$N_{inicial}$	$N_{projeto}$	$N_{máximo}$
<0,3	6	50	75
0,3 a 3	7	75	115
3 a 30	8	100	160
>30	9	125	205

Para a mistura de controle, MAC, foram testadas as porcentagens de teor de projeto de 5,0; 6,5; 7,0 e 8,0 % de ligante. Para a mistura modificada com RAR, MAB-R30, foram testadas as

porcentagens de teor de ligante de 6,0; 6,5; 7,0 e 8,0 %. A mistura depois de pronta foi mantida em estufa, a fim de simular o envelhecimento a curto prazo, por 2 horas, utilizando a mesma temperatura em que seria posteriormente compactada. Os moldes da compactação também foram inseridos na estufa à mesma temperatura. Foram produzidos no mínimo dois corpos de prova para cada teor, de cada mistura estudada, utilizando-se o molde de 150 mm de diâmetro. A Tabela 3.7 apresenta a configuração de temperaturas utilizada no processo de dosagem das misturas MAC e MAB-R30.

**Tabela 3.7-** Temperaturas de mistura e compactação para MAC e MAB-R

Temperaturas (°)	MAC	MAB-R30
Agregado	165	190
Ligante	155	165
Mistura e Compactação	140-150	150-165

A cada ciclo de produção de mistura, a massa de CAP 50/70 a ser adicionada foi corrigida em relação à massa de agregado pesada pós estufa. Para a mistura MAB-R30, a massa de CAP 50/70 a ser adicionada foi corrigida em relação a substituição por RAR em 30% de massa de ligante. A exemplo: considerando 100 % em massa de mistura, no teor de 8,0 % de ligante, para a adição de 30% de RAR neste teor (2,4 %), a massa de ligante foi corrigida para 5,6 %.

A adição de RAR foi feita diretamente no ato da mistura, após o envolvimento de todos os agregados pelo ligante, respeitando um intervalo de 2 a 3 minutos de duração do tempo total da mistura. A metodologia de adição de RAR à mistura é divergente nas pesquisas encontradas. Sousa *et al.*, (2012) recomenda o procedimento conforme realizado nesta pesquisa e em Nunes (2017). Shah *et al.*, (2018) relatam a adição de RAR primeiramente aos agregados e posterior adição do ligante asfáltico à mistura.

Para a seleção do teor de projeto de ligante das misturas asfálticas, foi estabelecido o alcance do Volume de Vazios (Vv) em 4,5 %, e demais propriedades volumétricas dentro da faixa estipulada, conforme apresenta a Tabela 3.8. A Especificação de Serviço DNIT ES 112/09 regulamenta a produção de concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo *terminal blending*.

**Tabela 3.8-**Propriedades volumétricas para misturas asfalto-borracha segundo DNIT ES 112/09.

<b>Propriedade</b>	<b>Limites (DNIT 112/09)</b>
Vv (%)	4-6
Teor de projeto (%)	5-8
VAM (%)	>14
RBV (%)	65-78

Cabe mencionar que em virtude da massa necessária para a compactação da dosagem (4700 g), o início do processo de mistura foi realizado em um misturador do tipo cuba com aquecimento, e pá giratória. Porém, devido a constantes falhas do equipamento, houve a necessidade de realizar o processo de mistura a mão, utilizando fogareiro e termômetros para controle de temperatura do CAP 50/70 e da mistura. Assim, parte da dosagem ocorreu com confecção de misturas de 1500 g até o total de 7500 g, sendo 5000 g destinados à moldagem do corpo de prova e 1500 g para o ensaio de densidade máxima medida (Densidade *Rice*) método ASTM D 2041. Os corpos de prova produzidos foram pesados segundo a AASHTO T 166 para a determinação da densidade aparente e obtenção dos dados de volumetria.

### **3.5.1 Parâmetros de densificação das misturas utilizando o compactador giratório**

Durante a etapa de dosagem as curvas de densificação obtidas na compactação giratória que correlaciona a densidade aparente da mistura (expressa em percentual da densidade máxima teórica - Gmm) a cada giro de compactação com o respectivo número de giro, foram utilizadas para determinar as propriedades volumétricas da mistura. Além disso, Bahia *et al.* (1998) propuseram que, dessa curva, poderiam ser obtidos parâmetros relativos à estabilidade das misturas dosadas e compactadas segundo a metodologia Superpave. Esses parâmetros são denominados *Construction Densification Index* (CDI) e *Traffic Densification Index* (TDI).

Faheem e Bahia (2004) determinam CDI como o valor da área sob a curva de densificação, desde a densidade a 8 giros até à densidade de 92% Gmm, representa o trabalho realizado durante o período de construção para alcançar 8 % de vazios de ar. O TDI, que é o valor da área sob a curva de densificação de 92% de densidade para 98% densidade, representa o trabalho necessário para resistir à carga do tráfego durante a vida útil do pavimento. Os autores conduziram estudo paramétrico alterando propriedades como o tipo de ligante, granulometria e teor de projeto, procurando correlacionar o desempenho dos parâmetros de CDI e TDI aos resultados dos ensaios

de creep dinâmico (FN). Estes indicam um aumento aproximadamente linear do CDI e TDI com os dados FN. Os critérios de aceitação propostos pelos autores, que permitem a seleção de misturas que tenham adequada trabalhabilidade e resistência à deformação permanente são apresentados na Tabela 3.9, com base no  $N_{ESAL}$ .

**Tabela 3.9** - Parâmetros CDI e TDI segundo Faheem & Bahia (2004).

Tráfego, $N_{ESAL}$	CDI (máximo)	TDI (mínimo)
$N_{ESAL} < 3.10^6$	100	400
$3.10^6 < N_{ESAL} < 1.10^7$	200	800
$N_{ESAL} > 3.10^7$	300	1200

Nascimento (2008) verificou, utilizando 22 misturas asfálticas, correlações entre os resultados dos ensaios de simulação de tráfego em laboratório e do uniaxial de carga repetida com os valores dos parâmetros CDI e TDI. Os resultados obtidos pelo autor apresentaram boa correlação com os ensaios de deformação permanente por simulação de tráfego e por ensaio uniaxial de carga repetida, sendo sensíveis ao intertravamento do esqueleto pétreo. Onofre *et al.* (2011), avaliaram as respostas de misturas asfálticas convencionais e com resíduos aos parâmetros CDI e TDI, concluindo que estes podem ser utilizados para a previsão da deformação permanente nestas misturas. Beja *et al.* (2015) e Beja (2020) avaliaram o comportamento dos parâmetros de densificação de misturas com diferentes granulometrias no processo de dosagem.

Em setembro de 2020 o DNIT publicou a normativa de instrução de ensaio DNIT 426/2020, em que estabelece os procedimentos para obtenção dos parâmetros CDI e TDI durante a dosagem de uma mistura asfáltica densa pelo método de compactação giratória. Na Tabela 3.10 são indicados os limites para CDI e TDI e na Equação 3.16 os cálculos necessários para a obtenção das respectivas áreas.

**Tabela 3.10** - Limites da curva de densificação para o cálculo dos índices CDI e TDI (DNIT 426/2020).

Índices	Limite inicial	Limite Final
CDI	Giro 8 ( $N_8$ )	92% da $G_{mm}$
TDI	92% da $G_{mm}$	98% da $G_{mm}$

$$A_N = \left[ \left( \frac{\%G_{mm}@N + \%G_{mm}@(N + 1)}{2} \right) - \%G_{mm}@LI \right] \quad (3.16)$$

onde  $AN$  é área de um retângulo  $N$  qualquer,  $\%Gmm@N$  é a porcentagem da  $Gmm$  em um giro  $N$ ,  $\%Gmm@(N + 1)$  é a porcentagem da  $Gmm$  em um giro  $(N+1)$ ,  $\%Gmm@LI$  é a porcentagem da  $Gmm$  no Limite Inicial. No caso do CDI é a  $\%Gmm@N8$ ; no caso do TDI é 92%.

### 3.5.2 Produção das amostras após o processo de dosagem das misturas asfálticas

Após a definição do teor de ligante das duas misturas asfálticas, iniciou-se o processo de reprodução dos corpos de prova para os ensaios mecânicos. O processo de produção ocorreu sob as mesmas configurações de temperaturas, tempo de mistura e condição de envelhecimento da dosagem descrita no item 3.5.

Buscando a homogeneidade de produção das amostras das misturas MAC e MAB-R30 para os ensaios de módulo dinâmico, *flow number* e fadiga uniaxial cíclica, optou-se por determinar uma metodologia de produção de forma a obter o número total de amostras necessárias aos ensaios, todas com 150 mm de diâmetro, entre 170 mm e 180 mm de altura, sendo produzidas conforme a altura final configurada no compactador giratório, com os necessários ajustes de massa, buscando-se atingir o  $V_v$  estabelecidos para cada ensaio conforme a Tabela 3.11. Cabe ressaltar que para se atingir este objetivo, a quantidade total de amostras moldadas durante o estudo foi bastante superior ao apresentado, consequência de perdas que ocorreram por diversos motivos.

**Tabela 3.11** - Corpos de provas produzidos para cada ensaio mecânico realizado.

Quantidade de corpos de prova					
Mistura	Dano por umidade induzida	Cântabro	Módulo Dinâmico	<i>Flow Number</i>	Fadiga Uniaxial Cíclica
$V_v$	$7,0 \pm 0,5\%$	$4,5 \pm 0,5\%$	$5,5 \pm 0,5\%$	$7,0 \pm 0,5\%$	$5,5 \pm 0,5\%$
MAC	6	3	2	3	4
MAB	6	3	2	3	4
<b>Total</b>			<b>36</b>		

A massa de mistura asfáltica necessária para a moldagem de amostras para os ensaios de módulo dinâmico, *flow number* e fadiga uniaxial cíclica, obedecendo aos critérios estabelecidos, foi de aproximadamente 7,5 kg de material. Desta forma, a produção ocorreu em ciclos de 6 kg e 3 kg, em um misturador de laboratório horizontal com temperatura controlada e capacidade para até 7 kg de material. Os corpos de prova produzidos foram submetidos ao corte por extratora serra copo e

posterior corte de topo e base para a adequação ao diâmetro e altura requerida no ensaio. Para cada corpo de prova foi realizado o ensaio de densidade máxima medida e a volumetria antes e depois do processo de corte, sendo estabelecido como critério o Vv conforme apresentado na Tabela 3.11.



**Figura 3.7-**Produção dos corpos de prova: a) Corpos de prova após desmoldagem; b) Corte de topo e base do CP para a altura final de 150 mm; c) Coreamento dos CPs em serra copo diâmetro de 100 mm; d) CPs após a retirada no núcleo na serra copo; e) CPs após retirada de topo e base nas dimensões adequadas aos ensaios.

No que se refere aos dados apresentados pela Tabela 3.11 apenas as amostras para o ensaio Cantabro foram produzidas utilizando a compactação por impacto no compactador mecânico Marshall, aplicando 75 golpes em cada face do corpo de prova com massa de mistura de 1.200 gramas. Caso a produção destas amostras ocorresse no compactador giratório, em que se tem disponível apenas moldes de 150 mm, seria necessário a extração do núcleo para a adequação das dimensões das amostras submetidas ao ensaio (100 mm de diâmetro e 60 mm de altura). Tal procedimento expõe a superfície do agregado, eliminando o filme de ligante, o que não se torna interessante na aferição da medida de coesividade possibilitada no ensaio Cantabro.

### 3.6 ESPESSURA DO FILME DE LIGANTE

Foi reconhecido que misturas produzidas com filmes de ligante asfáltico mais espessos resultam em pavimentos flexíveis e duráveis, enquanto as misturas de filmes finos tendem a trincar, reduzindo a vida útil dos pavimentos (Campen *et al.*, 1959). Convencionalmente, a espessura do filme de ligante é definida como uma razão entre o volume de asfalto que não foi absorvido pelas partículas do agregado e a área de superfície do agregado, sendo considerada uniforme para todas as partículas. A Equação 3.17 mostra como o cálculo é feito (Radovskiy, 2003):

$$TF = \frac{V_{asp}}{SA * W_{agg}} \quad (3.17)$$

onde  $TF$  é a espessura do filme (m),  $V_{asp}$  é o volume efetivo de ligante (m<sup>3</sup>),  $SA$  representa a área de superfície (m<sup>2</sup>/kg) e  $W_{agg}$  a massa do agregado (kg).

O conceito de espessura de filme de ligante asfáltico foi validado experimentalmente usando análises microscópicas. Elseifi *et al.* (2008) relataram que os filmes de ligante para grandes partículas de agregado são de forma irregular e consistem em uma mistura do ligante com agregado fino e fíler. Os mesmos autores também verificaram que a espessura do filme pode ser superior a 100 µm para agregados mais graúdos e menor que 2 µm para pequenas partículas de agregado. É improvável que as partículas de uma mistura tenham espessuras de filme de ligantes uniformes. Para fins práticos, tem-se admitido que partículas muito pequenas (fíler) estão incorporadas ao filme, formando uma argamassa asfáltica (Kandhal e Chakraborty, 1996).

A RAR atua como um fíler seco e muito áspero, portanto, torna-se extremamente importante verificar a espessura do filme de ligante quando ocorre a sua utilização. Em sua pesquisa utilizando RAR, Shah (2018) relata que o fabricante, tendo por experiências projetos anteriores, recomenda uma espessura mínima de filme de 10 µm, e um fator de superfície de 10 para RAR, evitando assim aparecimento de trincas e desagregação na mistura asfáltica. Nanjegowda *et al.* (2019) estudaram resultados de espessura de filme de ligante em 18 misturas de diferentes granulometrias, sem modificação e modificadas com RAR e recomendam que o valor mínimo de  $TF$  seja de 12 µm.

A metodologia utilizada para obter  $TF$  foi a mesma utilizada por Shah (2018) e descrita com detalhe no trabalho de Nanjgowda *et al.*, (2020). Segundo os autores, a RAR pode ser considerada interagindo como agregado ou como ligante, dentro da mistura asfáltica e tais considerações resultarão em diferentes  $TF$ . A seguir é descrito um passo a passo sobre o ajuste granulométrico e obtenção da  $SA$ :

- Obter as porcentagens de asfalto e agregado que compõem a mistura asfáltica, com a correção do valor efetivo de ligante asfáltico a partir da adição de RAR (nesta pesquisa, em 8 % de ligante, sendo 2,40 % de RAR e 5,60 % de CAP 50/70 e 92 % de agregados);
- Ajustar a distribuição granulométrica dos agregados, considerando a correção da porcentagem de RAR;
- O fator área de superfície  $SA_{Fi}$  específico para cada peneira, foi ajustado pela Equação 3.18:

$$SA_{Fi} = 1,93 \cdot p^{-1,0221} \quad 3.18$$

considerando os valores tabelados, fornecido pelo MS-2 (*Asphalt Institute*, 2014), onde  $SA_{Fi}$  é o fator área de superfície de cada peneira,  $p$  é a porcentagem de agregado que passa na peneira, e 1,93 e -1,0221 são constantes;

- O valor de  $SA_{Agregados}$  é obtido pela Equação 3.19:

$$SA_{Agregados} = \sum p_i \cdot \frac{SA_{Fi}}{100} \quad (3.19)$$

onde  $SA_{Agregados}$  é a área de superfície total dos agregados,  $p_i$  é a porcentagem passando em cada peneira e  $SA_{Fi}$  é o fator da área de superfície específica de cada peneira;

Após a obtenção de  $SA$  em função dos agregados, é necessário obter o valor de  $SA$  para o material RAR. Para isso, são realizados os mesmos passos anteriores, considerando o valor em porcentagem de RAR presente na mistura (2,40 %), a distribuição granulométrica da RAR e o seu fator de área de superfície  $SA_{FiRAR}$  específico de cada peneira e dado pela Equação 3.20:

$$SA_{FiRAR} = 10 \cdot SA_{Fi} \quad (3.20)$$

O valor de  $SA$  final, para a RAR interagindo como agregado na mistura é dado pela Equação 3.21:

$$SA_{RAR-Agregado} = \sum p_i \cdot \frac{SA_{Fi}}{100} + \left( cp_i \cdot \frac{SA_{Fi}}{100} + ap_i \cdot \frac{SA_{FiRAR}}{100} \right) \quad (3.21)$$

onde  $SA_{RAR-Agregado}$  é a área de superfície total do agregado combinado com a RAR,  $cp_i$  é o valor corrigido da porcentagem de agregado que passa em cada peneira,  $ap_i$  é o valor ajustado de RAR que passa em cada peneira e  $SA_{FiRAR}$  é o fator área de superfície da RAR como agregado passando em cada peneira.

Para a obtenção da  $SA$  da RAR combinada com o ligante, são realizados os seguintes passos:

- Considerar a distribuição granulométrica da RAR (obtida em Nanjegowda *et al.*, 2020);
- O fator área de superfície  $SA_{FRAR}$  específico para cada peneira, foi ajustado pela Equação 3.22:

$$SA_{FRAR} = 19,44 \cdot p_{RAR}^{-1,0616} \quad (3.22)$$

considerando os valores tabelados, fornecido pela MS-2 (*Asphalt Institute*, 2014), onde  $SA_{FRAR}$  é o fator área de superfície para os grãos de RAR,  $p_{RAR}$  é porcentagem de RAR que passa na peneira e  $19,44$  e  $-1,0616$  são constantes.

- O valor de  $SA_{RAR}$  é dado pela Equação 3.23:

$$SA_{RAR} = \sum SA_{FRAR} \cdot \frac{\text{Porcentagem de RAR na mistura}}{100} \quad (3.23)$$

O valor de  $SA$  final, para a RAR combinada interagindo como ligante na mistura é dado pela Equação 3.24:

$$SA_{RAR-Ligante} = SA_{Agregado} + SA_{RAR} \quad (3.24)$$

E assim a espessura do filme de ligante,  $TF$ , pode ser calculada de duas formas, combinando a ação da RAR como agregado (Equação 3.25) e como ligante (Equação 3.26):

$$TF = \frac{V_{asp}}{SA_{RAR-Agregado} \cdot W_{agg}} \quad (3.25)$$

$$TF = \frac{V_{asp}}{SA_{RAR-Ligante} \cdot W_{agg}} \quad (3.26)$$

onde  $TF$  é a espessura do filme (m),  $V_{asp}$  é o volume efetivo de ligante ( $m^3$ ),  $SA_{RAR-Agregado}$  representa a área de superfície da RAR combinada com o agregado na mistura ( $m^2/kg$ ),  $SA_{RAR-Ligante}$  representa a área de superfície da RAR combinada com o ligante na mistura ( $m^2/kg$ ) e  $W_{agg}$  a massa do agregado (kg).

### 3.6.1 Análise granulométrica da RAR por meio do granulômetro a laser

A RAR em seu estado físico antes da inclusão em misturas asfálticas é uma substância seca cinzenta/preta com uma densidade aparente de aproximadamente  $0,6 \text{ g/cm}^3$ . Apresenta tamanhos de partículas individuais abaixo  $600 \mu\text{m}$ , concentrando grande parte destas na faixa de  $250-600 \mu\text{m}$  (Plati e Cliatt, 2021).

A distribuição granulométrica da RAR pode ser encontrada no trabalho de Nanjegowda *et al.* (2019) em que os autores desenvolveram considerações sobre a forma de cálculo da espessura do filme de ligante ao se utilizar RAR em uma mistura. Esta abordagem foi explanada no item 3.6.

Uma vez que a RAR é composta por BMP, ligante asfáltico e fíler, materiais heterogêneos e que assumem diferentes dimensões após o processo de fabricação, a fim de se verificar a sua distribuição granulométrica, foi utilizado o granulômetro a laser do INFRALAB. Este equipamento, fabricado pela MICROTRAC, possui um sistema de análise de partículas da série 5000 SYNC que é uma combinação de tecnologias que integra duas técnicas de medição ótica

bem estabelecidas num único instrumento: análise de Difração a Laser (LD) e Imagem Dinâmica (DI), que permitem obter o tamanho e forma das partículas.

Segundo o manual de operação e manutenção que acompanha o instrumento, na análise por LD, a luz dispersa de múltiplos feixes de laser projetados por meio de um fluxo de partículas é medido por matrizes de detetores óticos. E na análise DI, a luz obscurecida por um LED intermitente é posicionada atrás de um fluxo de partículas é detectado por uma câmera de alta velocidade / alta resolução.

O analisador SYNC capta estas duas medições utilizando uma técnica patenteada que integra e sincroniza a coleção de luz das duas tecnologias simultaneamente por meio de uma única célula de medição. Então é utilizado um software, instalado junto ao equipamento, para analisar os resultados de cada técnica e apresentar os dados. Os dados podem ser analisados independentemente por tecnologia ou misturados num único dado de apresentação. O procedimento poderá ser realizado em meio seco ou úmido, dependendo das características da amostra e da configuração do sistema. Mostra-se na Figura 3.8 o equipamento granulômetro onde foram realizados os ensaios.



**Figura 3.8** - a) Visão geral do equipamento granulômetro a laser da Microtrac; b) Carregamento da amostra no equipamento para a análise das partículas de RAR.

Para se analisar as partículas de RAR foram realizados testes preliminares visando estabelecer as configurações do ensaio, segundo a aplicação de adequada taxa de fluxo no meio aquoso e aplicação de ultrassom, o que mantém o fluxo de partículas em meio aquoso e dispersa

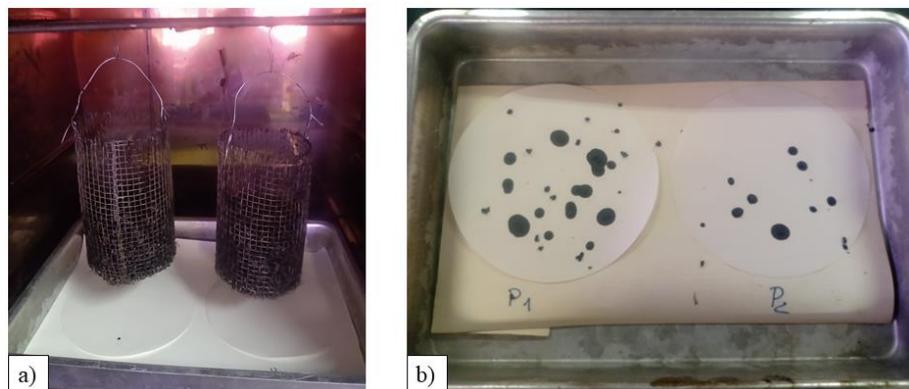
possíveis conglomerados de partículas (espécie de defloculante com ação física), respectivamente, melhorando a identificação dos tamanhos e formas.

Neste estudo, foram investigados os tamanhos de partículas na faixa de valores entre 2000  $\mu\text{m}$  e 0,02  $\mu\text{m}$  com a configuração LD de três lasers vermelhos em meio úmido. Foi aplicado a taxa de fluxo de 80% e aplicação de ultrassom.

### 3.7 ENSAIO DE ESCORRIMENTO DA MISTURA ASFÁLTICA (*DRAIN DOWN*)

Uma vez que o uso de ligantes asfálticos modificados é comum em misturas descontínuas pois reduzem ou evitam o escoamento do ligante devido à falta de finos, foi realizado o ensaio de sensibilidade ao escoamento de ligante para as misturas estudadas.

O ensaio é especificado pela norma AASHTO T 305 (2002) e consiste em inserir uma amostra de no mínimo 1.200 g da mistura usinada, utilizando a faixa granulométrica e teor de ligante, em um cesto cilíndrico confeccionado com tela metálica de abertura 6,3 mm, com fundo suspenso, afastado do fundo. Pesa-se e insere-se o conjunto apoiado em um papel-filtro, dentro de uma estufa regulada, sendo a primeira temperatura de produção da mistura e a segunda a mais 15 °C por 1h  $\pm$  1min. Transcorrido o tempo, retira-se o conjunto da estufa e pesa-se a folha de papel-filtro novamente que poderá conter ligante escoado da mistura. Mostra-se na Figura 3.9 o esquema do ensaio.



**Figura 3.9** - a) Início do ensaio, massa de mistura asfáltica na cesta de ensaio no interior da estufa; b) Fim do ensaio, escoamento de duas amostras da mesma mistura no papel filtro.

O percentual em peso de todo material que passa pela abertura da cesta é considerado como material escorrido. Esta porcentagem não deve exceder a 0,3 % para ser considerada satisfatória, sendo desejável que seja inferior ou igual a 0,2 %.

### **3.8 CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

Neste capítulo serão abordadas as metodologias e configurações empregadas durante a execução dos ensaios de desempenho mecânico realizados nas amostras de misturas asfálticas.

#### **3.8.1 Dano por umidade induzida**

O ensaio de Dano por Umidade Induzida é descrito pela norma DNIT 180/2018 – ME como um procedimento de verificação da sensibilidade à água de corpos de prova de misturas asfálticas, moldados em laboratório, em que é avaliada a adesividade agregado-ligante e a coesão da mistura em condições resultantes de saturação e de condicionamento acelerado em presença de água. O comprometimento das propriedades mecânicas da mistura asfáltica é denominado dano por umidade induzida e se refere à relação entre a resistência à tração das amostras condicionadas e a resistência à tração das amostras em condições normais. Terrel (1994) identificou três mecanismos de danos por umidade no (a) perda de coesão e rigidez do filme de ligante asfáltico; b) falha de adesividade entre o agregado e o ligante; e (c) degradação ou fratura do agregado, particularmente quando a mistura é submetida ao congelamento.

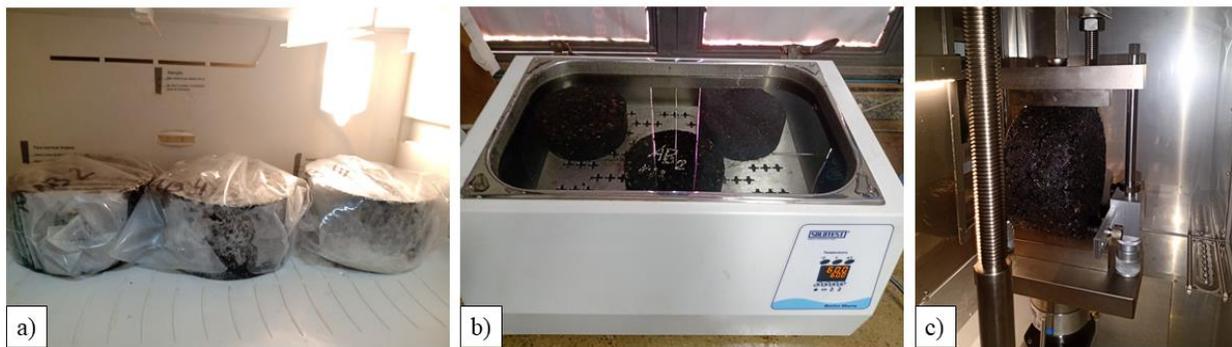
Foram produzidos de seis corpos de prova similares de cada mistura asfáltica, MAC e MAB, e subdivididos dois conjuntos de três corpos de prova, sendo condicionados e não condicionados. Os corpos de prova devem ter uma porcentagem de vazios com ar de  $7 \% \pm 1 \%$ . Os corpos de prova foram obtidos por amassamento no compactador giratório, variando-se a massa e número de giros necessários para a obtenção da faixa de vazios indicada. Foram ensaiados CPs com 150 mm de diâmetro e altura entre 75 e 90 mm.

O condicionamento térmico foi realizado nos CPs parcialmente saturados, entre 55 e 80 %, colocados em um plástico com 10 ml de água destilada e levados a um ciclo de congelamento a uma temperatura de  $-18^{\circ} \text{C}$  por 16 horas. Em seguida, os CPs são submetidos a um banho a  $60^{\circ} \text{C}$  por 24 horas. A apresenta o condicionamento dos CPs e ensaio de RT. Após o período de condicionamento os CPs foram levados a banho para equilíbrio de temperatura a  $25^{\circ} \text{C}$  e levados

à ruptura no ensaio de tração por compressão diametral. A relação de resistência à tração é obtida conforme a Equação 3.27:

$$RRT = \frac{RT_c}{RT} \cdot 100 \quad (3.27)$$

onde  $RRT$  é a razão de resistência à tração (%),  $RT_c$  é a média da resistência à tração do grupo condicionado e  $RT$  é a média da resistência à tração a do grupo de controle. A Figura 3.10 apresenta as etapas de preparação dos CPs condicionados para o ensaio.



**Figura 3.10**-Preparação dos CPs para o ensaio de dano por umidade induzida: a) Ciclo de congelamento; b) Ciclo de aquecimento e c) Posicionamento do CP para ensaio de RT.

O valor de  $RRT$  é um indicador da suscetibilidade da mistura ao dano por umidade. A norma DNIT 180/2018 – ME não indica o valor limite da  $RRT$ , preconizando que o valor deve estar de acordo com o estabelecido em projeto. Neste trabalho o valor de referência será conforme as normas ASTM D 4867 e AASHTO T 283, que estabelecem valores de  $RRT$  em 70 % e 80 %, respectivamente.

### 3.8.2 Ensaio Cantabro

O ensaio Cantabro é descrito pela norma DNER-ME 383/99 -ME como o método pelo qual se determina o desgaste, por abrasão, de uma mistura com asfalto-polímero, com emprego da máquina Los Angeles. Os corpos de prova com 60 mm de altura e 100 mm de diâmetro são inseridos no interior da máquina Los Angeles, que deve estar previamente limpa, sem a respectiva carga abrasiva. O ensaio consiste na realização de 300 revoluções do tambor, a uma

velocidade de 30 r.p.m. a 33 r.p.m., à temperatura de 25 °C. Na Figura 3.11 apresenta-se as amostras antes e após o ensaio.



**Figura 3.11** - Amostras compactadas no compactador Marshall submetidas ao ensaio Cantabro: a) Amostras antes do ensaio; b) Amostras após o ensaio; c) Nítida diferença do desgaste entre as misturas MAB-R30 (superior) e MAC (inferior), esta última com topo e base mais arredondados.

As amostras são pesadas antes e após completadas as 300 revoluções do ensaio. O desgaste da mistura asfáltica por abrasão em porcentagem e com aproximação de 1%, é dado pela fórmula da Equação 3.28:

$$A = \frac{P - P'}{P} \cdot 100 \quad (3.28)$$

onde  $A$  é o desgaste da mistura betuminosa com asfalto-polímero, com aproximação de 1%;  $P$  é peso do corpo-de-prova, antes do ensaio e  $P'$  o peso do corpo-de-prova após o ensaio.

O desgaste por abrasão final é a da média aritmética de três ensaios realizados para um mesmo teor de ligante. Os valores individuais não devem diferir de  $\pm 20\%$  do valor médio.

### 3.8.3 Módulo dinâmico e ângulo de fase

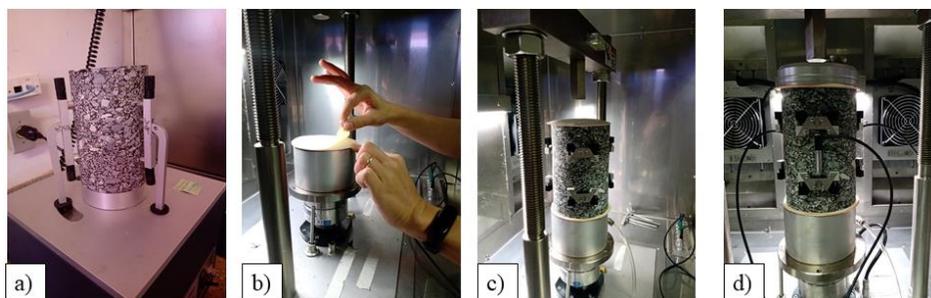
O módulo dinâmico é facilmente obtido por meio de ensaios em laboratório. Aplicando-se a teoria da viscoelasticidade linear, todas estas propriedades se relacionam e podem ser previstas a

partir da obtenção de apenas uma. Geralmente, testes de compliância ou de varredura de frequência são realizados (Kim, 2009).

O procedimento para o ensaio de módulo dinâmico e ângulo de fase foi realizado conforme a norma AASHTO T 378 (2017), configurada no *software* UTS006 do equipamento *AsphaltQube*, ambos desenvolvidos pela IPC Global. Este equipamento consiste em uma prensa com atuador eletromecânico capaz de aplicar carregamentos estáticos e dinâmicos, permitindo a montagem de diferentes ensaios. O princípio da atuação do *AsphaltQube* se baseia no conceito do AMPT. Segundo a *Federal Highway Administration* (FHWA) o AMPT baseia-se em esforços anteriores para desenvolver um dispositivo de teste para determinar as propriedades fundamentais de desempenho da mistura asfáltica. Os equipamentos e métodos de teste atuais foram desenvolvidos para otimizar o tempo e o custo dos testes. O AMPT também é conhecido como *Simple Performance Tester* (SPT) em trabalhos de pesquisa anteriores (NCHRP 9-19, NCHRP 9-29, NCHRP Report 629) e normas da AASHTO.

Os ensaios foram conduzidos em seis frequências (25,0 Hz; 10,0 Hz; 5,0 Hz; 1,0 Hz; 0,5 Hz; 0,1 Hz), da maior para a menor, e em cinco temperaturas (5°C; 15°C; 20°C; 25°C; 35°C), da menor para a maior. O carregamento cíclico aplicado foi ajustado para cada combinação de frequência e temperatura com a finalidade de se atingirem deformações na região central da amostra da ordem de 50  $\mu\epsilon$  a 75  $\mu\epsilon$ . O condicionamento das amostras variou de acordo com a temperatura utilizada, sendo recomendado um período maior para temperaturas mais baixas. Na Figura 3.12 apresenta-se o esquema de preparação da amostra e montagem do ensaio.

As amostras foram fabricadas no compactador giratório no molde de 150 mm de diâmetro com altura de 180 mm. Após o processo de corte as dimensões foram ajustadas para 102 mm  $\pm$  2 mm de diâmetro e 150 mm  $\pm$  2,5 mm de altura. A massa de mistura utilizada e número de giros configurado no compactador para a produção das amostras foram adequados para atingir o  $V_v$  estabelecido de 5,0  $\pm$  0,5%. De posse dos valores de módulo dinâmico, obtidos pela média de dois ensaios em amostras distintas, para cada uma das combinações de frequência e temperatura, utilizou-se o princípio de superposição tempo-temperatura para a elaboração de curvas mestras representativas de cada mistura, na temperatura referência de 20°C.



**Figura 3.12** - Montagem do ensaio de módulo dinâmico e ângulo de fase: a) Colagem dos *targets* com Araldite para fixação dos LVDTs axiais no CP; b) Colocação da placa inferior e duas membrans de látex lubrificadas com vaselina para diminuição do atrito na base do CP; c) CP posicionado com outras duas membranas no topo; d) Placa de aplicação da carga posicionada no topo do CP e LVDTs axiais posicionados.

Foi utilizada a função de ajuste sigmoidal conforme Pellinen (2001) para a construção da curva mestre do módulo dinâmico e do ângulo de fase utilizando-se planilhas do *Excel* e a função *Solver* que é uma ferramenta para realizar regressão não linear de mínimos quadrados no *Excel*. A função minimiza o erro entre os dados experimentais e a previsão do modelo sigmoidal variando os parâmetros da função e os coeficientes do deslocamento das isotérmicas.

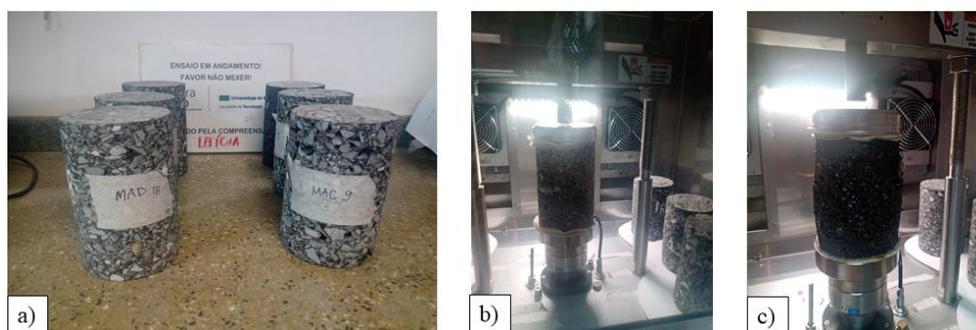
#### **3.8.4 Ensaio uniaxial de carga repetida – *flow number***

O ensaio uniaxial de carga repetida para obtenção do FN foi realizado no INFRALAB no equipamento *AsphaltQube*, utilizando o software UTS005, ambos desenvolvidos pela IPC Global. O passo a passo do ensaio, como o condicionamento das amostras e as configurações de carga ocorreram conforme a normativa DNIT 184/2018 - ME.

Antes de iniciar o ensaio, foi imposto à amostra um período de 60 s de carga condicionante. O pulso de carga foi controlado de forma a produzir a tensão no formato *haversine* durante 0,1 s atingindo um pico de 204 kPa. Uma tensão de contato equivalente a 5 % do pico de tensão, ou seja, 10,2 kPa, foi adotada para o período de descanso de 0,9 s. Os testes foram conduzidos a  $60 \pm 0,5^\circ\text{C}$ . A deformação permanente total foi avaliada juntamente com sua taxa em relação ao número de ciclos. As amostras foram ensaiadas até a obtenção da taxa mínima de deformação plástica de 5%, onde é obtido o FN.

A média e o coeficiente de variação dos valores de FN foram obtidos dos resultados dos ensaios para 3 amostras. As amostras foram fabricadas no compactador giratório no molde de 150

mm de diâmetro com altura de 180 mm. Após o processo de corte as dimensões foram ajustadas para  $102 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$  de diâmetro e  $150 \text{ mm} \pm 2,5 \text{ mm}$  de altura. A massa de mistura utilizada e número de giros configurado no compactador para a produção das amostras foram adequados para atingir o  $V_v$  estabelecido de  $7,0\% \pm 0,5\%$ . Na Figura 3.13 apresenta-se o esquema de preparação da amostra e montagem do ensaio.



**Figura 3.13** - Ensaio de FN: a) Amostras destinadas ao ensaio; b) CP posicionado no equipamento antes do início do ensaio; c) CP apresentando deformações plásticas após o ensaio.

Na montagem da amostra no equipamento, em cada extremidade do contato com os pratos de aplicação de carga e reação, são utilizadas duas membranas de látex, com uma fina camada de vaselina entre elas, para evitar atrito e conseqüente de tensões de cisalhamento que possam ser geradas na parte inferior e superior. A vaselina reduz o atrito e permiti que o efeito de Poisson durante a compressão das amostras. (Babadopulos, 2014).

Em 1977 foi proposto por Francken um modelo de deformação permanente baseado em ensaios de carga repetida para diferentes temperaturas, frequências de carregamento e níveis de tensão, conforme mostra a Equação 3.29.

$$\epsilon_p = A \cdot N^B + C \cdot (e^{D \cdot N} - 1) \quad (3.29)$$

onde  $N$  é o número de ciclos e  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  são constantes do modelo de Francken determinadas para cada amostra. Este modelo também é indicado na norma DNIT 184/2018 - ME para a análise dos resultados.

Para a obtenção das constantes A, B, C e D é utilizada uma otimização numérica em planilha eletrônica, método dos mínimos quadrados, de forma a se obter uma curva de deformação permanente vertical semelhante à obtida experimentalmente. Além do ajuste, são calculadas as derivadas primeira e segunda da curva de deformação permanente, segundo a Equação 3.30 e a Equação 3.31, respectivamente.

$$\frac{d\varepsilon_p}{dN^2} = A.B.N^{B-1} + C.D.e^{D.N} \quad (3.30)$$

$$\frac{d^2\varepsilon_p}{dN^2} = A.B.(B-1)N^{B-2} + C.D^2e^{D.N} \quad (3.31)$$

O FN é definido como o ciclo no qual a segunda derivada ((3.31) é igual a zero, ou o valor da derivada segunda muda de positivo para negativo.

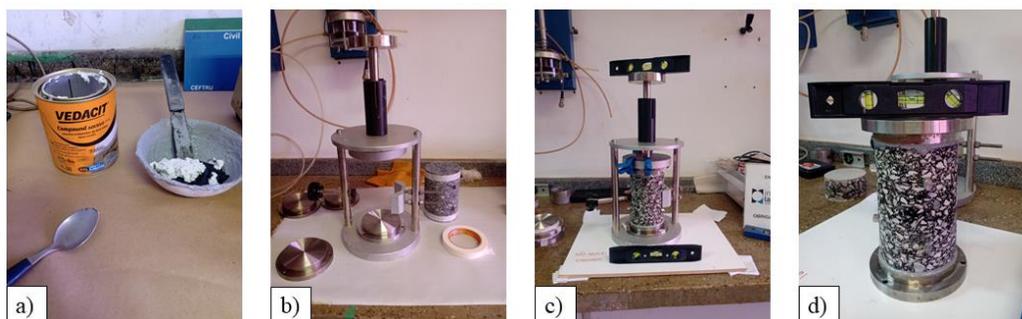
Biligri *et al.* (2007) recomendam o uso do modelo de Francken uma vez que este considera todos os estágios de deformação permanente. O modelo combina a lei de potência, que caracteriza os estágios primário e secundário de deformação, e o modelo exponencial que ajusta o estágio terciário.

### 3.8.5 Fadiga uniaxial cíclica (Tração/Compressão)

A caracterização do dano por fadiga consiste em submeter as amostras a uma amplitude constante de deformação cíclica, com formato senoidal, o ensaio é conduzido até que haja o pico do ângulo de fase. Na pesquisa o ensaio ocorreu com a utilização do *software* UTS032 instalado no equipamento *AsphaltQube*, ambos desenvolvidos pela IPC Global. A configuração do ensaio ocorreu segundo as prescrições da AASHTO TP 107 (2014).

Apesar da crescente utilização desta metodologia de ensaio para a caracterização da fadiga em misturas asfálticas brasileiras, ainda não há uma normativa nacional para sua realização. Desta forma, alguns detalhes mencionados na norma AASHTO T 107 (2014) no que se refere aos acessórios necessários para o ensaio merecem atenção. A referida norma destaca a necessidade de câmara climática, sistema de obtenção de medidas de carga e deslocamento, centralizador de

carga, medidores de deformação axial e pratos de carregamento. O equipamento instalado no INFRALAB foi adquirido com todos os acessórios necessários à execução do ensaio de fadiga uniaxial cíclica definidos pela referida norma. Na Figura 3.14 mostra-se os pratos de topo e base, a cola utilizada, o processo de colagem e o gabarito para colagem das amostras.



**Figura 3.14** - Preparo das amostras para o ensaio de fadiga: a) Cola Vedacit Tix utilizada para a fixação da amostra entre os pratos de topo e base; b) Gabarito centralizador da amostra para a cura da cola; c) Processo de colagem ocorrendo, níveis de bolha para verificação do paralelismo das faces; d) CP fora do gabarito, após a cura da cola.

As amostras foram fabricadas no compactador giratório no molde de 150 mm de diâmetro com altura de 170 mm. Após o processo de corte as dimensões foram ajustadas para  $102 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$  de diâmetro e  $130 \text{ mm} \pm 2,5 \text{ mm}$  de altura. A massa de mistura utilizada e número de giros configurado no compactador para a produção das amostras foram adequados para atingir o  $V_v$  estabelecido de  $5,0\% \pm 0,5\%$ .

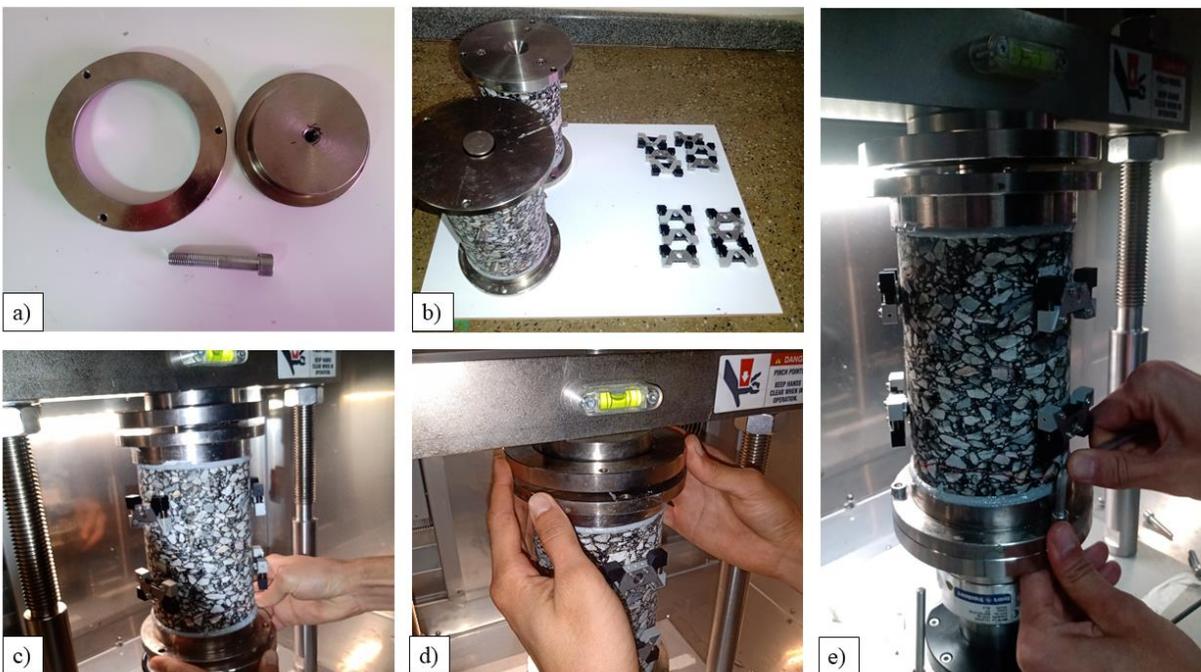
É necessário dizer que foram realizados vários testes até a condução correta do ensaio de fadiga uniaxial cíclica. Houve muitos erros no processo de preparação da amostra para o ensaio, como uso de cola inadequada, quantidade inadequada de cola nos pratos, tempo de cura inapropriado para a cola utilizada e ausência de paralelismo entre as faces da amostra. Em incontáveis ensaios de teste a amostra rompeu na cola ou soltou completamente do prato, o que indica erros sucessivos no processo de montagem do ensaio. Além disso, os testes iniciais foram realizados em amostras com 150 mm de altura, em que mesmo após a finalização do ensaio e observação do corpo de prova não foi possível detectar o aparecimento de trincas na parte central, entre as posições dos LVDTs.

A cola selecionada para a colagem das placas de topo e base foi a Vedacit Tixotrópica, que possui processo de cura atingindo a resistência inicial em 24 horas e a máxima em 7 dias. Foi

necessário realizar ajustes na altura das amostras, passando de 150 mm para 130 mm. O ajuste da altura em 130 mm é recomendado pela norma AASTHO TP 107 e está em acordo com os trabalhos de Mocelin (2018), Boeira (2018) e Schuster (2018).

A autora realizou uma visita acadêmica ao laboratório da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) para trocar informações sobre a realização do ensaio e possíveis erros nas metodologias de montagem.

Os ensaios de T/C foram realizados a fim de obter os resultados utilizados na caracterização da vida de fadiga das misturas asfálticas em termos do modelo S-VECD. O ensaio consiste em duas etapas: (i) caracterização das propriedades de LVE, e (ii) caracterização das propriedades de dano, ou seja, ensaios de módulo dinâmico e fadiga uniaxial cíclica, respectivamente. Na Figura 3.15 é apresentada as etapas de montagem do ensaio no equipamento.



**Figura 3.15** - Etapas de montagem do ensaio de fadiga uniaxial cíclica: a) Aparato utilizado no *AsphaltQube* na acoplagem do prato de topo na prensa; b) Amostras coladas nas placas de topo e base, notar presença do centralizador de carga; c) Colocação da amostra no equipamento, ajuste e parafusamento da parte inferior; d) Ajuste da parte superior após posicionamento do atuador (aplicação de carga constante de 0,09kN) até a placa fixada na prensa; e) Aperto dos parafusos na parte inferior da amostra.

O ensaio foi configurado na frequência de 10Hz e temperatura de 20°C variando-se a amplitude de deformação (de 150 a 275  $\mu\text{m}$ ). Foram ensaiadas uma amostra para cada deformação imposta, totalizando quatro níveis de deformação e quatro amostras por mistura. A caracterização das propriedades de LVE foi realizada na mesma frequência (10Hz) em pequenas amplitudes de deformação (entre 50 e 75  $\mu\text{m}$ ). Esta etapa também é chamada de *fingerprint* e o valor obtido é utilizado no modelo S-VECD para corrigir a diferença entre a rigidez obtida no ensaio de módulo dinâmico e das amostras produzidas da mesma mistura, agora ensaiadas à fadiga.

Conforme alerta Schuster (2018) o colapso da amostra não coincide necessariamente com a fratura visível do material, sendo a ruptura definida como o ponto em que ocorre o pico do ângulo de fase durante o ensaio. Isto porque com a evolução do dano, na forma de micro trincas, a elasticidade do material deve diminuir, o que numericamente faz com que o ângulo de fase aumente. Quando a amostra para de acumular dano, provavelmente devido ao surgimento de uma macro trinca, o ângulo de fase diminui e este ponto de reversão é definido como o ponto de ruptura (Zhang *et al.*, 2013).

Sabouri e Kim (2014) propuseram um critério de ruptura independente do modo de carregamento, combinando a queda do ângulo de fase com a pseudo-energia liberada no ensaio. A capacidade que o material possui de acumular energia é representada pela quantidade máxima de energia de pseudo-deformação ( $W_{máx}^R$ ), que é calculada de forma cumulativa, sendo que para cada ciclo o  $W_{máx}^R$  é calculado conforme a Equação 3.32:

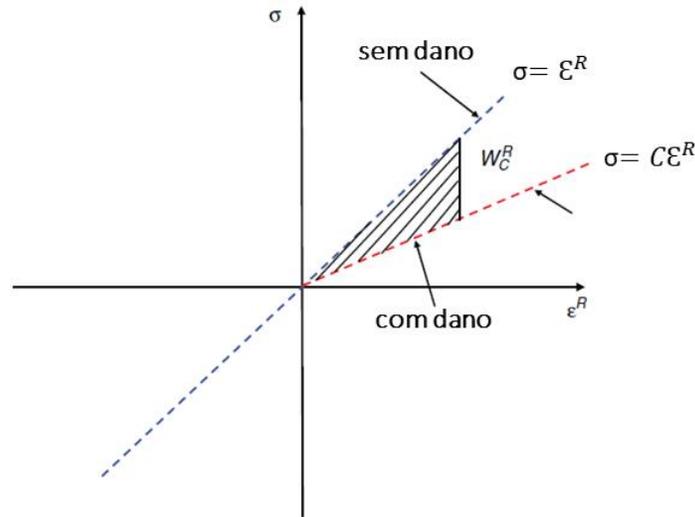
$$W_{máx}^R = \frac{1}{2} C (\varepsilon_{0,ta}^R)^2 \quad (3.32)$$

onde C é pseudo-rigidez (integridade) e  $\varepsilon_{0,ta}^R$  é a pseudo-deformação na condição de tração.

A perda de energia acumulada a cada ciclo devido à evolução do dano é chamada de energia de pseudo-deformação total dissipada ( $W_C^R$ ). Zhang *et al.* (2013) explicam que para o cálculo de ( $W_C^R$ ), assume-se que o *loop* de pseudo-histerese pode ser aproximado por uma reta de inclinação correspondente à pseudo-rigidez no ciclo atual, assim, a área triangular formada pelas três retas: (i) a reta inicial sem dano ( $\sigma = \varepsilon^R$ ); (ii) a reta atual de dano ( $\sigma = C\varepsilon^R$ ); (iii) linha da

pseudo-deformação máxima ( $\varepsilon^R = \varepsilon_{máx}^R$ ), corresponde ao valor de  $W_C^R$  (Figura 3.16) que pode ser calculado pela Equação 3.33:

$$W_C^R = \frac{1}{2} (\varepsilon_{0,ta}^R)^2 (1 - C) \quad (3.33)$$



**Figura 3.16** - Representação esquemática da energia de pseudo-deformação total dissipada no gráfico de tensão-pseudo deformação (modificado-Zhang *et al.*, 2013).

Foi proposta por Sabouri e Kim (2014) uma nova variável relacionada com a energia, o  $G^R$ , definido como a taxa de mudança média de pseudo-energia acumulada liberada. A relação desta variável com o número de ciclos até a ruptura de uma determinada mistura asfáltica foi demonstrada como sendo linear na escala log-log, em diferentes tipos de ensaio, com controle de tensão, deformação e deslocamento do atuador. O parâmetro é calculado segundo a Equação 3.34:

$$G^R = \frac{W_C^R}{N_f} = \frac{\int_0^{N_f} W_C^R}{(N_f)^2} \quad (3.34)$$

Sabouri e Kim (2014) comentam que a relação entre  $G^R$  e  $N_f$  é uma propriedade fundamental das misturas. Em contraste com os critérios de ruptura existentes que geralmente exigem testes de

caracterização em várias temperaturas, o critério de ruptura proposto requer testes de caracterização em apenas uma temperatura e um único modo de carregamento, reduzindo significativamente os custos associados aos testes. Os autores destacam ainda que usando o critério de ruptura proposto a fadiga pode ser prevista pela regressão linear utilizando pelo menos três amostras, em escala log-log. A Equação 3.35 apresenta o formato linear na escala logarítmica, com o  $G^R$  correlacionando com o  $N_f$ .

$$G^R = Y \cdot N_f^\Delta \quad (3.35)$$

onde  $Y$  e  $\Delta$  são os coeficientes de ajuste.

Vencidos todos os detalhes da preparação da amostra para o ensaio de fadiga uniaxial cíclica, nesta metodologia, a realização do ensaio em si não é um problema. De forma geral, o ensaio é de curta duração sendo que no protocolo realizado no INFRALAB foi possível ensaiar até 3 amostras em um dia. Uma limitação da metodologia aqui realizada está na questão da colagem das amostras nas placas de topo e base, pois a disponibilidade de apenas um gabarito para este processo, associado ao tempo de 24 horas de cura, são detalhes que prejudicam o rendimento na obtenção de resultados.

### 3.9 APLICAÇÃO DO MODELO S-VECD

O modelo S-VECD faz uso das mesmas equações de pseudo-deformação ( $\epsilon^R$ ), de pseudo rigidez ( $C$ ), e do parâmetro de evolução do dano ( $dS$ ) do modelo VECD, deduzidas no item 2.6. Foi visto que em razão das atualizações realizadas por Underwood *et al.* (2010) e Underwood *et al.* (2012) em que o método de cálculo para o primeiro ciclo é diferente dos ciclos subsequentes por uma questão de acurácia das simplificações adotadas, acrescenta-se mais três equações, sendo uma para cada variável nas condições mostradas na Equação 2.35. Nesta seção serão apresentadas as equações que formulam o cálculo das demais variáveis necessárias para a etapa cíclica do ensaio.

No cálculo cíclico o procedimento simplificado é utilizado para obter um tempo reduzido pelo tempo em que cada ciclo ocorreu, conforme é mostrado na Equação 3.36:

$$\xi = \frac{1}{a_T} \left[ \frac{t_{pico} + t_{vale}}{2} \right] \quad (3.36)$$

Schuster (2018) *apud* Hou (2010) explica que o processo de cálculo da pseudo-deformação ( $\varepsilon^R$ ) pela integral de convolução ( (2.13) é extremamente rigoroso e de grande precisão. O autor comenta que quando aplicado em ensaios cíclicos, torna-se um método computacionalmente caro, demandando muito tempo de análise, visto que os ensaios produzem facilmente 10 milhões de pontos de dados. Assim o método de cálculo simplificado aplicado na etapa cíclica do ensaio reduz drasticamente a quantidade de dados para análise sem a introdução de erros significantes. É assumido que o acúmulo de dano por fadiga acontece somente em condições de carregamento de tração, sendo que a pseudo-deformação de amplitude de tração ( $\varepsilon_{0,ta}^R$ ) é calculada pela Equação 3.37:

$$(\varepsilon_{0,ta}^R) = \frac{1}{E_R} \cdot \frac{\beta+1}{2} \left( (\varepsilon_{0,pp}) \cdot |E^*|_{LVE} \right) \quad (3.37)$$

onde  $\varepsilon_{0,pp}$  é a amplitude de deformação de pico a pico,  $|E^*|_{LVE}$  o módulo dinâmico, o parâmetro  $\beta$  conhecido como fator de forma do carregamento é o fator que permite a quantificação do esforço de tração dentro do histórico de carregamento e é obtido como mostra a Equação 3.38:

$$\beta = \frac{\sigma_{pico} + \sigma_{vale}}{|\sigma_{pico}| + |\sigma_{vale}|} \quad (3.38)$$

Nota-se que quando  $\beta = 1$ , toda história de tensão é tração, quando  $\beta = 0$ , metade da história é tração e quando  $\beta = -1$ , toda a história é compressão.

A Equação 2.39 é utilizada para o cálculo da pseudo-rigidez no estado cíclico e será representada novamente na Equação 3.39 para a discussão dos parâmetros considerados.

$$C^* = \frac{(\beta + 1)}{2} \cdot \frac{(\sigma_{0,pp})}{(\varepsilon_{0,ta}^R) \cdot DMR} \quad (3.39)$$

Conforme explica Schuster (2018) verifica-se que a (3.39) utiliza o fator de carregamento ( $\beta$ ), e a variáveis de tensão de pico a pico ( $\sigma_{0,pp}$ ), e pseudo-deformação de amplitude de tração ( $\varepsilon_{0,ta}^R$ ). O autor, citando Hou (2010), mostra que estas variáveis podem ser visualizadas em um gráfico conforme a que mostra o comportamento destas em ensaios de controle de deslocamento do atuador.

A variável  $DMR$  é calculada conforme a Equação 3.40. Ou seja, representa a normalização entre o módulo dinâmico obtido na caracterização de LVE e o *fingerprint* realizado no ensaio de fadiga. Segundo Nascimento (2015), o  $DMR$  mostra a variabilidade das amostras ensaiadas e comenta que valores típicos estão na faixa de 1,1 e 0,9.

$$DMR = \frac{|E^*|_{fingerprint}}{|E^*|_{LVE}} \quad (3.40)$$

O cálculo cíclico do parâmetro de evolução de dano ( $dS$ ) apresentado no item 2.e e semelhante à Equação 3.41:

$$dS_{ciclo\ i} = \left( -\frac{DMR}{2} (\varepsilon_{0,ta}^R)^2 \Delta C_i \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (\Delta N_i \cdot \xi_p \cdot x.)^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (3.41)$$

onde  $\Delta N_i$  é a variação do número de ciclos;  $\xi_p$  é o tempo reduzido de pulso, e  $K_1$  é o fator de ajuste de carga. O tempo reduzido de pulso ( $\xi_p$ ) é dado pela razão entre o tempo de pulso ( $t_p$ ) e o coeficiente de translação ( $a_T$ ):  $\xi_p = t_p/a_T$ . O coeficiente  $K_1$  depende de toda a história de carregamento e é calculado pela Equação 3.42:

$$K_1 = \frac{1}{\xi_f - \xi_i} \left[ \frac{1}{\beta + 1} \int_{\xi_i}^{\xi_f} (\beta - \cos(2\pi \cdot f \cdot t))^{2\alpha} d\xi \right] \quad (3.42)$$

onde as constantes  $\xi_i$  e  $\xi_f$  são os tempos reduzidos de início e fim do intervalo de tração de cada ciclo calculadas conforme a Equação 3.43 e a Equação 3.44:

$$\xi_i = \frac{\cos^{-1}(\beta)}{2\pi f} \quad (3.43)$$

$$\xi_f = \frac{2\pi - \cos^{-1}(\beta)}{2\pi f} \quad (3.44)$$

As curvas características de dano resultantes podem ser modeladas por funções potência ou exponencial como mostra-se na Equação 3.45 e na Equação 3.46. Desta forma, obtendo-se a curva  $C$  vs  $S$  para um determinado material.

$$C(S) = 1 - C_{11}S^{C_{12}} \quad (3.45)$$

onde  $C_{11}$  e  $C_{12}$  são constantes do ajuste

$$C(S) = e^{aS^b} \quad (3.46)$$

onde  $a$  e  $b$  são constantes do ajuste.

Para a calibração do modelo S-VECD foi utilizada uma planilha em *Excel* nomeada como FlexMAT fornecida juntamente ao programa. Uma versão desta planilha pode ser acessada no endereço eletrônico <https://highways.dot.gov/research/infrastructure/pavements/flexmat>. A própria planilha possui uma aba de instrução que indica o passo a passo para o seu preenchimento e utilização. Mocelin (2018) resumiu em poucos passos a utilização da ferramenta que neste trabalho está adaptada às formulações anteriores:

a) Inicialmente, são necessários os dados de módulo dinâmico das misturas, com os quais plotaram-se curvas mestras para a temperatura de 20°C, conforme descrito no item 2.4.1.

b) Os dados do módulo de armazenamento ( $E'$ ) são descritos por uma série de Prony e então interconvertidos em módulo de relaxação, conforme descrito no item 2.4.2, Equação 2.13.

c) Com o ensaio *fingerprint* calcula-se o *Dynamic Modulus Ratio* (*DMR*) (Equação 3.40).

d) Com os resultados do módulo de relaxação, calculam-se as pseudo-deformações para todo o histórico de carregamento. Para o primeiro ciclo do ensaio (período transiente) calcula-se pela (2.36 e para os demais ciclos pela Equação 2.37.

e) A pseudo-deformação é então utilizada para o cálculo da integridade ( $C$ ) ao longo do ensaio, por meio da Equação 2.24. O *DMR* deve ser utilizado neste cálculo.

f) Para o cálculo da evolução do dano ( $S$ ), é necessário também o cálculo da taxa de evolução do dano ( $\alpha$ ), definida como a máxima inclinação da curva do módulo de relaxação em função do tempo reduzido.

g) O dano é então calculado, de forma incremental, por meio da Equação 2.40 para o primeiro ciclo, e por meio da Equação 2.41 para os demais ciclos.

h) Após o cálculo dos parâmetros  $C$  e  $S$  e construção das curvas características de dano, é utilizado um modelo para ajuste destas curvas por funções potências conforme a Equação 3.45 e a Equação 3.46.

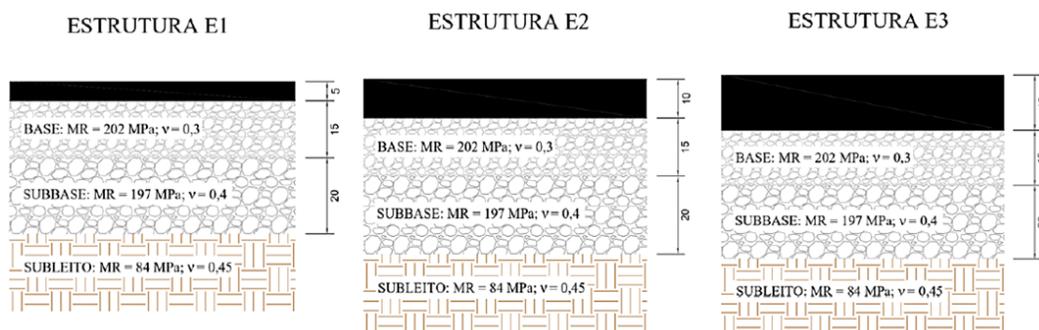
### **3.10 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PAVIMENTO UTILIZANDO O PROGRAMA FlexPAVE 1.1**

A licença para a utilização do programa FlexPAVE™ 1.1 foi fornecida pelo professor Richard Kim em contato pessoal da autora da tese com o referido professor. Além licença do programa, foi fornecida a planilha FlexMAT™ e o manual do usuário. O seu desenvolvimento sucede ao programa LVECD, realizado no trabalho de Eslaminia *et al.* (2012). Schuster (2018) destaca os pressupostos os quais baseiam o funcionamento do programa:

- i) A estrutura do pavimento é considerada como um sistema de camadas infinitas onde as propriedades do material mudam ao longo da profundidade do pavimento. Esta suposição deve-se ao fato de que as dimensões do pavimento são muito grandes em comparação com o tamanho do pneu e a espessura do pavimento;
- ii) A variação da temperatura horária geralmente é lenta, enquanto o carregamento do tráfego muda em poucos segundos. Portanto a análise do desempenho do pavimento é realizada no perfil de temperatura fixa;
- iii) A temperatura muda ao longo do perfil do pavimento em função da profundidade. Sua variação é considerada insignificante em um nível específico, portanto, a temperatura é constante em todos os pontos em uma determinada profundidade e as propriedades do material são assumidas como isotrópicas no plano perpendicular à direção da profundidade;

- iv) O perfil da temperatura é simulado como função cíclica por um período de um ano. Portanto, os cálculos de tensão e de deformação podem ser reduzidos a um ano representativo;
- v) A carga de tráfego é idealizada como uma carga cíclica com forma constante (área de contato do pneu) e velocidade constante;
- vi) Apesar da natureza não-linear das camadas de base, elas são idealizadas como materiais elásticos lineares, porque os efeitos da não-linearidade não são significativos em comparação com as aproximações inerentes à modelagem das variações de tráfego e temperatura.

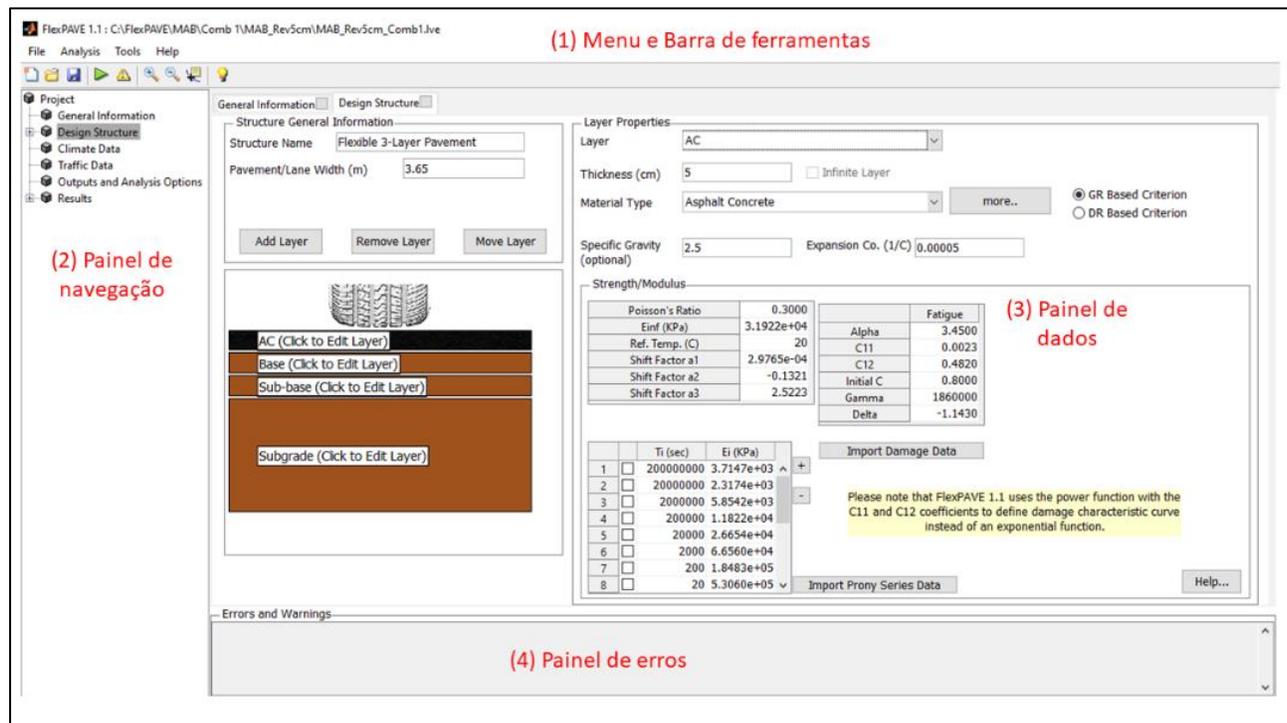
Foram configuradas e testadas as estruturas propostas no trabalho de Schuster (2018), conforme é mostrado na Figura 3.17, sendo que para a camada de revestimento foram inseridos os dados do modelo S-VECD obtidos para as misturas MAC e MAB-R30. Além disso, os dados de tráfego e clima foram os mesmos utilizados do referido trabalho.



**Figura 3.17** - Estruturas de pavimento analisadas no FlexPAVE™ conforme Schuster (2018).

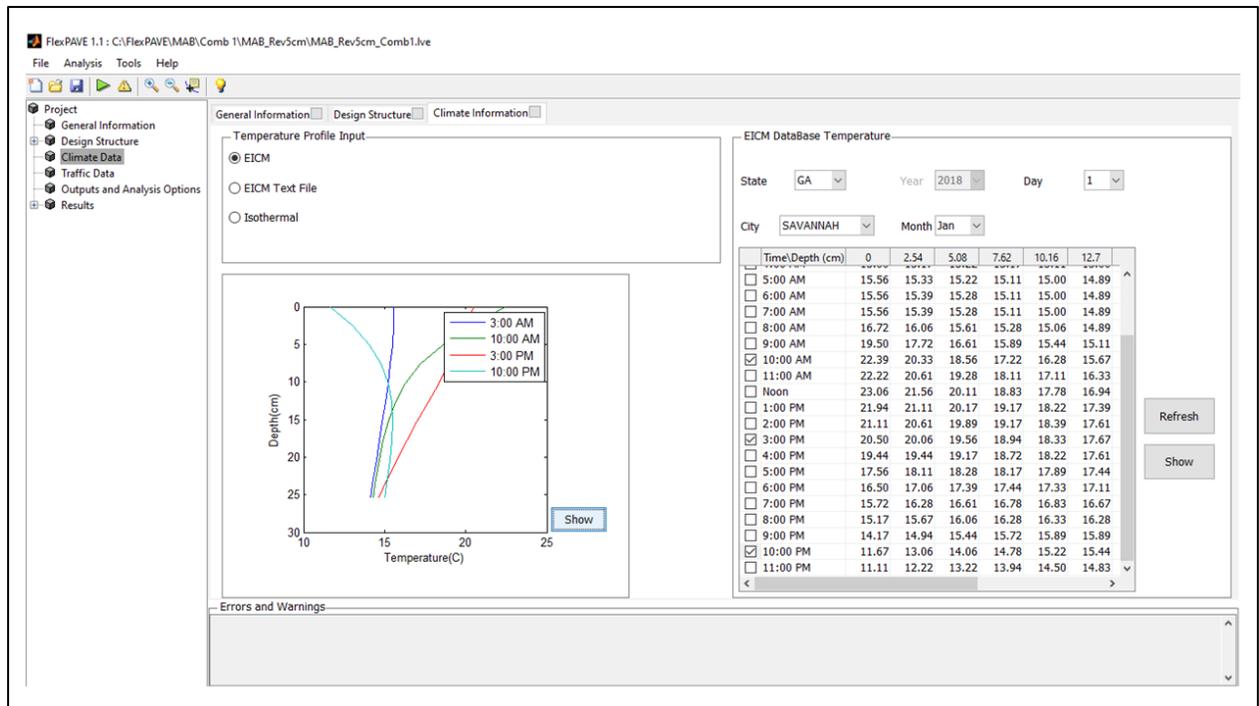
O FlexPAVE™ é um programa baseado no MATLAB e requer componentes específicas incluídas no *MATLAB Compiler Runtimes* (MCR) para ser instalado no computador do usuário. A interface gráfica do usuário é composta por quatro principais seções: (1) menu e barra de ferramentas; (2) painel de navegação; (3) painel de dados; (4) e painel de erros, um exemplo é mostrado na Figura 3.18. Na seção mostrada, os dados que devem ser preenchidos na aba da estrutura, na camada de revestimento de concreto asfáltico, são a caracterização linear

viscoelástica (LVE), com os termos da série de Prony ajustada, e os dados de dano da mistura obtidas nos ensaios, com os parâmetros  $C_{11}$  e  $C_{12}$  do ajuste das curvas  $C \times S$  por uma função potência Equação (3.45).



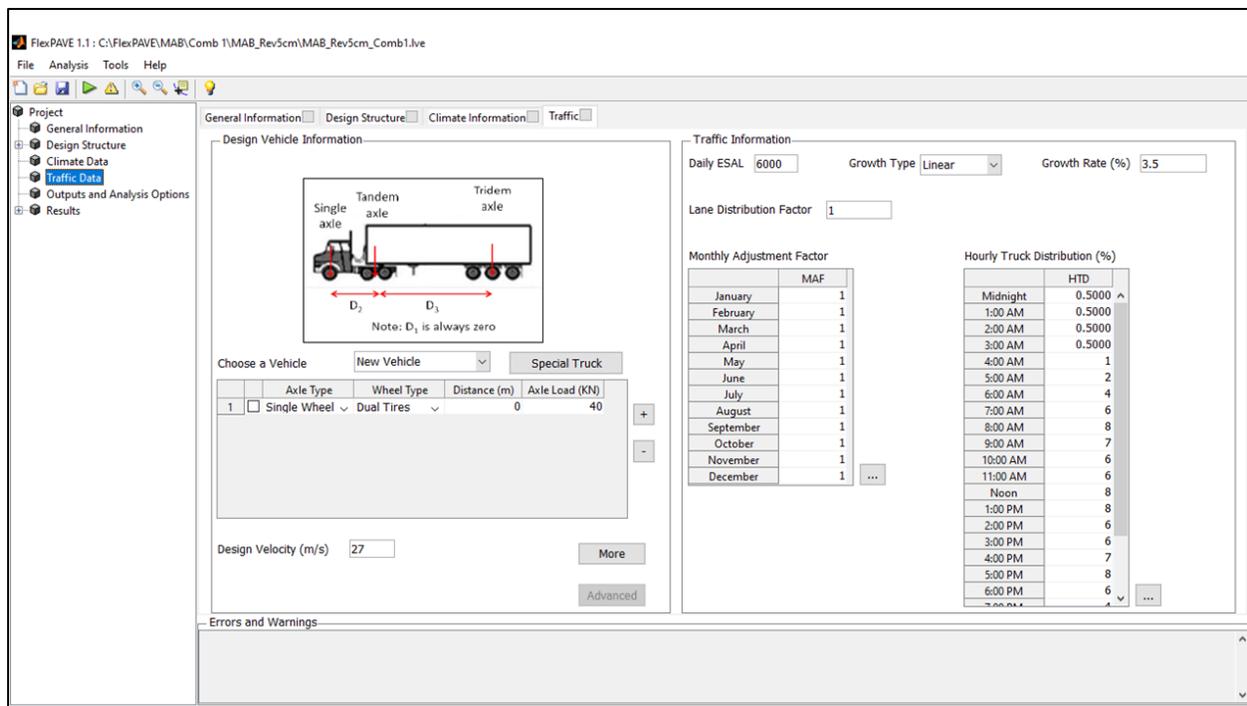
**Figura 3.18-** Interface gráfica do FlexPAVE™ 1.1 aba *Desing Structure*.

Na segunda aba são definidos os dados climáticos de onde a região está localizada. O programa precisa ser informado de forma horária as temperaturas em diversas profundidades do pavimento. Não há séries históricas disponíveis para o Brasil e desta forma foi adotada no banco de dados do modelo *Enchanted Integrated Climate Model* (EICM) a série existente para a cidade de Savannah no estado da Geórgia. Esta série possui a maior semelhança com a região do Rio Grande do Sul e foi adotada por Mocelin (2018) e Schuster (2018). Esta aba é ilustrada na Figura 3.19



**Figura 3.19 - Configuração da aba *Climate information*.**

Posteriormente, são carregadas as informações do tráfego atuante na estrutura. Foi determinado um número de 3500 passagens diárias, com uma taxa de crescimento de 3%, resultando em um N de  $1,5 \times 10^7$  repetições em 10 anos de projeto. O carregamento considerou inflação de pneus 800 KPa, área de contato retangular com relação comprimento/largura de 1,5714 e velocidade de passagem de 80 km/h.

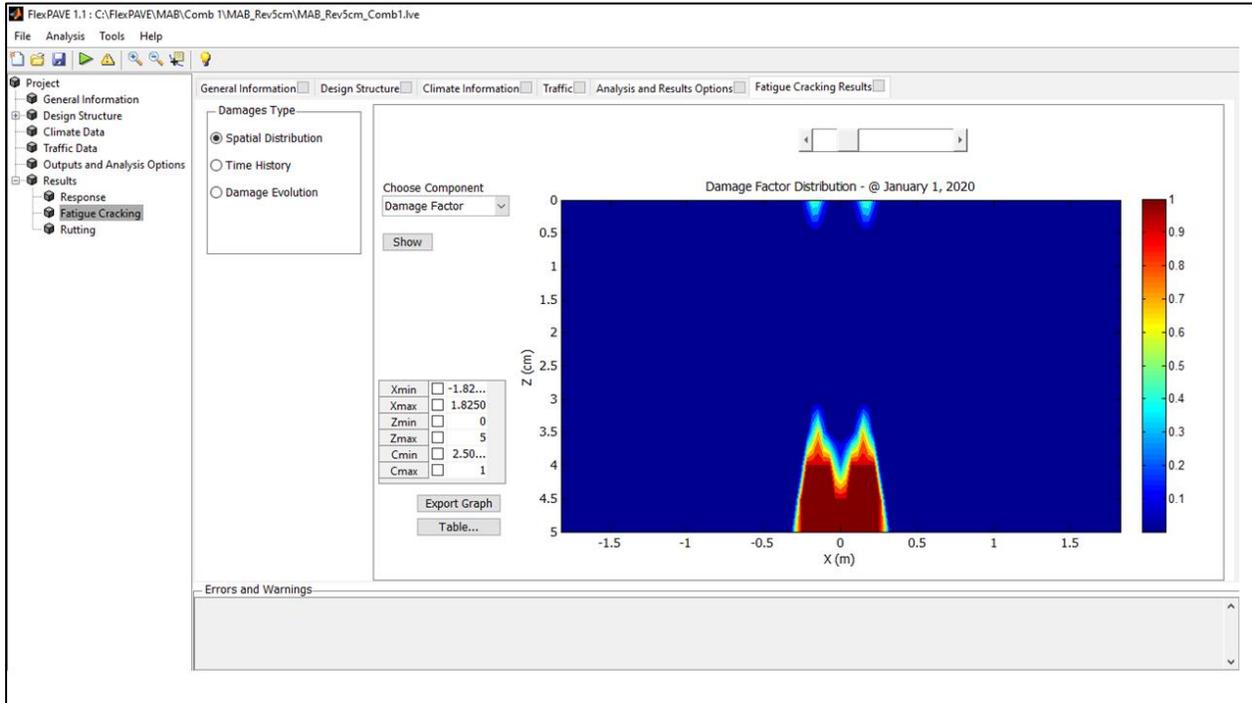


**Figura 3.20** - Configuração da aba *Traffic data*.

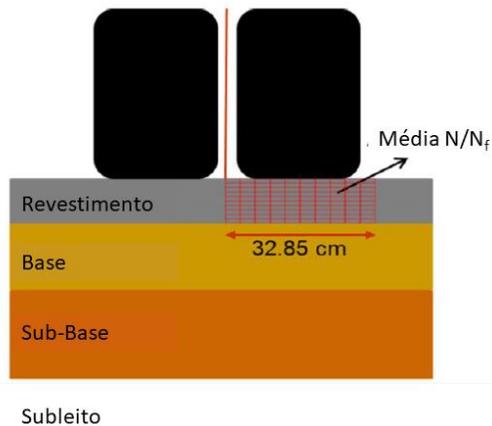
Ao longo do tempo de simulação, tanto a pseudo rigidez ( $C$ ) quanto o dano médio ( $N/N_f$ ) são obtidos para diferentes pontos da camada asfáltica. A razão  $N/N_f$  é obtida a partir do critério de ruptura  $G^R$  critério usando a lei de Miner, cujos valores variam de 0 a 1, para a condição sem dano e totalmente danificado, respectivamente. A partir de  $N/N_f$ , o programa calcula a evolução do dano de fadiga nas camadas asfálticas, também gerando gráficos de contorno para os meses avaliados, ao longo do período de projeto. As cores mais quentes representam área mais próximas de 1, enquanto as mais frias, áreas sem danificação, como ilustra a Figura 3.21.

Os pontos de interesse foram dispostos segundo a metodologia proposta por Nascimento (2015). Sendo assim, os valores da razão  $N/N_f$  abaixo da área carregada foram calculados para uma grade de 110 pontos, com 10 pontos igualmente distribuídos na direção horizontal a partir do centro de carregamento (0 cm) a 32,85 cm, e 11 pontos na direção vertical, a partir do fundo da camada asfáltica para a superfície (Figura 3.22). O autor realizou a calibração e validação de uma função de transferência campo/laboratório de dano médio acumulado para área trincada para as misturas brasileiras. O procedimento calibrado pelo autor consiste em verificar em quantos meses

a estrutura atinge nível de dano médio ( $N/N_f$ ) de 0,35, verificado como início do processo de trincamento por fadiga.



**Figura 3.21-** *Aba Results - Fatigue cracking.*



**Figura 3.22-** Malha de pontos utilizada para a determinação do dano médio acumulado na camada do revestimento (modificado-Nascimento, 2015).

### 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios laboratoriais realizados na RAR, nos ligantes e nas misturas asfálticas produzidas.

Com relação ao ligante e a RAR são apresentados os resultados de cada material, quanto às propriedades químicas da RAR, propriedades físicas do ligante convencional e após a adição da RAR. Nos ligantes são apresentados os resultados da caracterização LVE e o desempenho quanto à deformação permanente e fadiga.

Nas misturas são apresentados e discutidos os ensaios de dosagem e dano por umidade induzida. Também são apresentados e discutidos os resultados do ensaio de deformação permanente para o modelo de Francken e os resultados da fadiga uniaxial cíclica para o modelo S-VECD. Com os dados obtidos na caracterização LVE e o ensaio de fadiga das misturas, é mostrada a análise realizada no FlexPAVE™, aplicando os dados obtidos em uma estrutura de pavimento.

#### 4.1 ENSAIOS QUÍMICOS

Neste item são apresentados os resultados obtidos a partir da caracterização química da RAR por meio das técnicas de Fluorescência de Raio X por Energia de Dispersiva, Análise Térmica Gravimétrica e Calorimetria Exploratória Diferencial.

##### 4.1.1 Fluorescência de Raio X por Energia Dispersiva (XRF/EDX)

Por meio da análise de fluorescência de raios X por energia dispersiva foi possível determinar os elementos inorgânicos presentes na RAR. Os resultados podem ser apresentados no formato de óxidos ou do próprio elemento. O elemento majoritário foi o cálcio (91%), seguido de zinco (5%), enxofre (2%), ferro (0,85%), silício (0,52%), potássio (0,29%), bromo (0,15%) e em proporções inferiores a 0,1% havia a presença de cobre, estrôncio e rubídio.

Uma vez que o ligante asfáltico e a borracha que compõem a RAR são constituídos por elementos orgânicos, será necessário a correção dos valores dos elementos determinados no

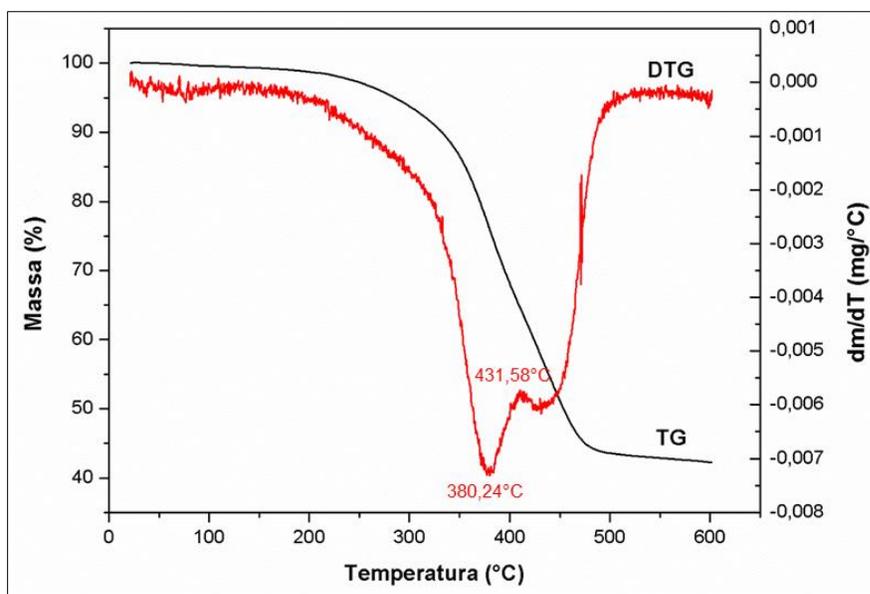
ensaio XRF/EDX citados acima, a partir do ensaio para a determinação dos elementos carbono, hidrogênio e nitrogênio (CHN), chamado de análise elementar de CHN. Até o momento de análises dos resultados apresentados o equipamento do IQ estava fora de operação, com impossibilidade de uso.

Ainda assim, os resultados quantitativos apresentados para a RAR mostram que grande parte do material que a compõem é o cálcio ou óxido de cálcio (CaO), comumente conhecido como cal, desta forma, muito provavelmente, este material é o principal componente do *filler* da RAR.

#### **4.1.2 Análise Térmica Gravimétrica**

A Termogravimetria (TG) e a Termogravimetria Derivada (DTG) proporcionam o estudo dos processos de decomposição térmica das amostras. As curvas de TG e DTG podem ser visualizadas na Figura 4.1, e mostram os eventos de perdas de massa que ocorrem com as mudanças de temperatura na amostra de RAR. O material ensaiado apresentou perda total de 56,44% de compostos voláteis (visualizado na curva TG), sendo a parte não volátil representada por cinzas. Como é possível observar, a curva DTG apresentou valores de decomposição que estão associadas com as cadeias, ou materiais que compõem a RAR. O vale mais intenso (mais fechado) é representativo de perda de material homogêneo como por exemplo a borracha natural (NR) e outro pico menos intenso (mais aberto) é representativo de perda de material heterogêneo.

Considerando a curva DTG, a amostra possui estabilidade térmica próximo a 200°C e apresentou dois eventos referentes a perda de massa. Pode-se observar um declínio onde se inicia em uma temperatura de 333,93°C, terminando em 380,24°C, com uma perda de massa em 35,23%. Este vale, pode ser atribuído à presença da borracha natural (NR), que apresenta uma temperatura de degradação que ocorre em ~365°C (Sacher *et al.*, 1985). O segundo evento que acontece entre 380,24°C e 452,28°C, sendo o pico em 431,58°C, com perda de massa de 20,66% é atribuído a degradação dos elastômeros BR e SBR (Menezes, 2005).



**Figura 4.1**-Curvas de Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Derivada (DTG) mostrando o comportamento da amostra de RAR.

Desta forma, ainda que a RAR seja composta por ligante asfáltico e fíleres, é possível concluir na análise TG e DTG que o principal componente do material é a a borracha, não sendo possível estabelecer com precisão demais composições poliméricas.

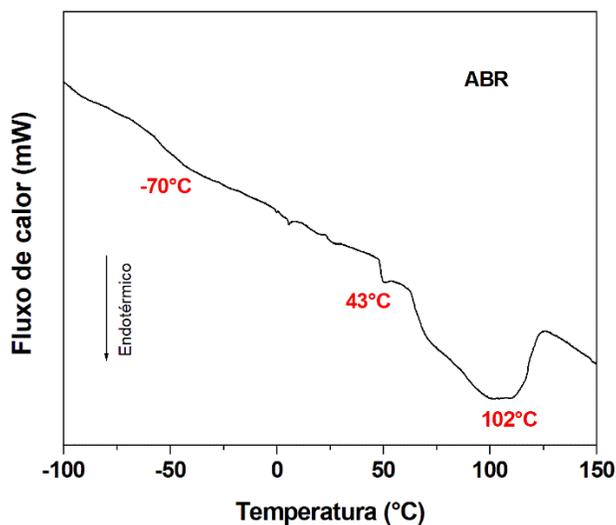
#### 4.1.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Na Figura 4.2 encontra-se o termograma de DSC obtido. Chough *et al.* (1996) estudaram o processo de vulcanização com enxofre de NR, BR e SBR e explicam que um termograma DSC é o resultado líquido de todas as reações que ocorrem dentro da faixa de temperatura de interesse. Os autores comentam ainda que, quando um composto de borracha é aquecido, muitas reações ocorrem competitivamente, assim, é muito difícil medir a entalpia para uma reação específica. Diante disto e da heterogeneidade da RAR a seguir são feitas algumas considerações possíveis sobre a resposta do material no intervalo de temperaturas ensaiadas.

Na análise calorimétrica por DSC da RAR é possível destacar três transições endotérmicas mais importantes. A primeira bastante alargada e com um pico em  $-70^{\circ}\text{C}$ , que pode ser associada à transição vítrea ( $T_g$ ) da borracha natural (Galiani *et al.*, 2007). O fato dela estar alargada, de uma forma bem diferente da  $T_g$  da borracha, pode ser em função de interações intermoleculares com os outros componentes da amostra. Em torno de  $43^{\circ}\text{C}$ , percebe-se uma  $T_g$ , com mudança nítida da linha de base, seguida de um pico bastante acentuado e alargado, entre  $60^{\circ}\text{C}$  e  $125^{\circ}\text{C}$ ,

referente à temperatura de fusão ( $T_m$ ). A  $T_g$  em  $43^\circ\text{C}$  pode estar associada ao CAP e a algum polímero usado como aditivo na RAR, tanto pela sua forma como pelo seu valor. A transição termodinâmica referente à fusão apresenta um pico disforme e alargado, sugerindo a fusão de mais de uma componente da amostra e que se sobrepõem. Rios *et al.* (2014) comentam que o CAP 50/70 puro, utilizado como referência na pesquisa dos autores, apresenta uma transição endotérmica entre  $30^\circ\text{C}$  e  $50^\circ\text{C}$  e ponto de fusão compreendido entre  $26$  e  $107^\circ\text{C}$ . Ainda segundo os autores, percebe-se um pico em  $103^\circ\text{C}$  referente à degradação do material. Neste sentido, as transições nesta faixa da curva DSC sugerem o comportamento do CAP 50/70.

Considerando que a borracha de pneu (composta de borracha sintética e natural) e os fíleres (por exemplo, carbonato de cálcio que possui  $T_m = 825^\circ\text{C}$ ) presentes na RAR não apresentarão fusão na faixa de temperatura testada, a transição termodinâmica observada na curva DSC se refere ao CAP e deve estar relacionada à presença de outros aditivos poliméricos. Pode-se ainda inferir, pela forma do pico de fusão, que os aditivos poliméricos têm cadeias com tamanhos bem diferentes, ou seja, são polidispersos, e que são materiais semicristalinos.



**Figura 4.2** - Termograma de DSC para a amostra de RAR.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO CONVENCIONAL E GRAU PG DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

A Tabela 4.1 apresenta os resultados de valores médios de três réplicas em cada ensaio da caracterização convencional e do grau PG, segundo as normativas utilizadas, para o CAP 50/70 e AB-R30.

Os resultados de CAP 50/70 apresentados na Tabela 4.1 atendem às especificações da norma DNIT EM 095/06. No ligante modificado AB-R30 os valores reforçam resultados encontrados em bibliografias que utilizaram os mesmos tipos de ensaios em ligantes base modificados com RAR (Sousa *et al.*, 2012; Medina, 2014 e Alsaad *et al.*, 2018).

**Tabela 4.1-**Resultados da caracterização convencional dos ligantes asfálticos.

Composição	PG	PG Contínuo	Penetração (0,1 mm)	Ponto de amolecimento (°C)	Viscosidade Rotacional a 175°C (mPa.s)	Ponto de fulgor (°C)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
CAP 50/70	58-XX	63,6	50	52	73	322°C	1,017
CAP 50/70 (Pós RTFOT)			30	54,5	96	-	-
AB-R30	70-XX	75,4	40	60	1597	-	1,065
AB-R30 (Pós RTFOT)			23	73,3	2543	-	-
ASTM D 6114	-	-	25-75	54	1500-5000	mín 232	-

Cabe mencionar que exceto a classificação PG e viscosidade rotacional para o AB-R30, os demais resultados obtidos nos ensaios reproduzidos para a condição virgem também reforçam os valores publicados em Lopes *et al.* (2021). Uma vez que buscou-se adotar os mesmos procedimentos realizados em Lopes *et.al.* (2021) durante a incorporação de RAR ao ligante base, as diferenças encontradas entre os ensaios mencionados e apresentados na Tabela 4.1 e na referida pesquisa podem estar atribuídos aos procedimentos de leitura e ajuste da amostra no reômetro. Os ensaios de grau PG e viscosidade foram repetidos em mais uma amostra e reforçaram os valores apresentados na Tabela 4.1.

De forma geral as modificações do CAP 50/70 resultaram em aumento do ponto de amolecimento, da viscosidade rotacional e da densidade, além de redução da penetração. As alterações destas propriedades nos asfaltos-borracha podem indicar melhorias no comportamento à fadiga e às deformações permanentes. Elevadas viscosidades apresentadas pelos ligantes asfálticos modificados podem refletir posteriormente no aumento na espessura do filme de ligante

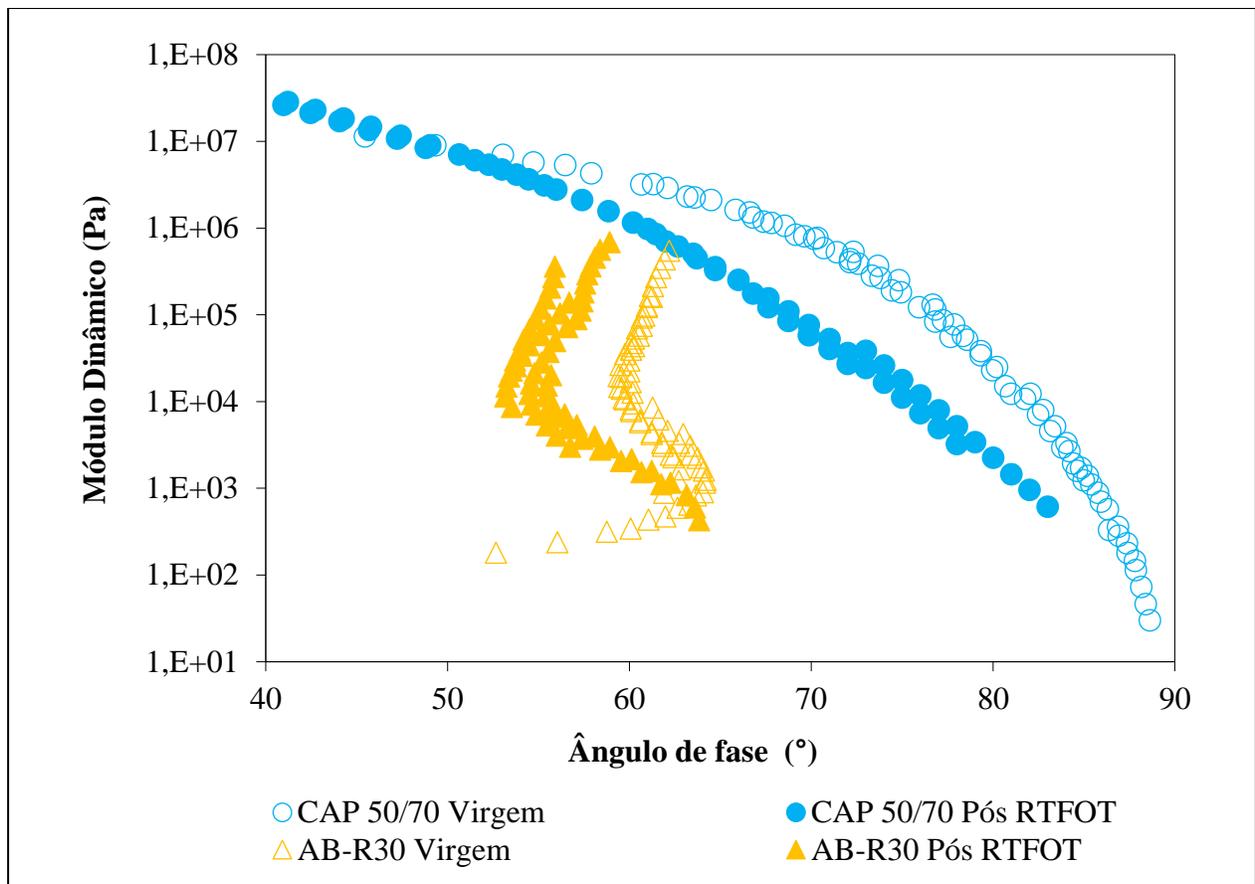
necessário para haver o recobrimento completo das partículas de agregado nas misturas. Este fato ocasiona o aumento da porcentagem de ligante empregada na confecção das misturas asfálticas confeccionadas com asfalto-borracha.

### **4.3 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA E ENSAIOS DE DESEMPENHO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS**

Neste item serão apresentados os resultados obtidos por ensaios realizados no reômetro de cisalhamento dinâmico. Primeiramente são apresentados os resultados das características de comportamento reológico e posteriormente o desempenho dos ligantes em ensaios de fadiga e deformação permanente.

#### **4.3.1 Diagrama de espaço black**

N Figura 4.3 são apresentados os dados reológicos do CAP 50/70 e AB-R30 em diagrama de espaço black para as condições virgem e envelhecida. Observa-se que os dados de módulo dinâmico produzem curvas suaves com ligeira dispersão, indicando que os ligantes de asfalto podem ser considerados como materiais termoreologicamente simples. A adição de RAR resulta em um deslocamento dos dados em direção a menores valores de ângulo de fase (esquerda do diagrama), o que significa comportamentos mais elásticos. A representação em diagrama de espaço black de todos os ligantes modificados mostram um padrão "S" inverso, que é tipicamente encontrado em ligantes modificados com borracha (Celauro *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2018; Nunes *et al.*, 2020).



**Figura 4.3-** Diagrama de espaço black dos ligantes CAP 50/70 e AB-R30 nas condições virgem e envelhecido.

#### 4.3.2 Módulo dinâmico e ângulo de fase

Existem diferentes modelos analíticos para descrever curvas mestras de ligantes e misturas asfálticas. Os modelos apresentam pontos positivos e negativos a depender do tipo de curva mestra do tipo de ligante a ser modelada. Yusoff (2012) observa que a equação log-linear superestima os valores de  $a_T$ . O autor comenta que em geral, observa-se que todos os modelos sofrem uma desvantagem, sendo incapazes de descrever  $a_T$ . Para mástiques envelhecidos e ligantes modificados com polímeros pode ser atribuído o aumento da complexidade da resposta reológica dos materiais após a oxidação e maior estruturação. Ainda segundo o autor, a maior parte das equações (funções) são empíricas e incapazes de explicar as mudanças nas propriedades físicas e químicas dos materiais após o envelhecimento.

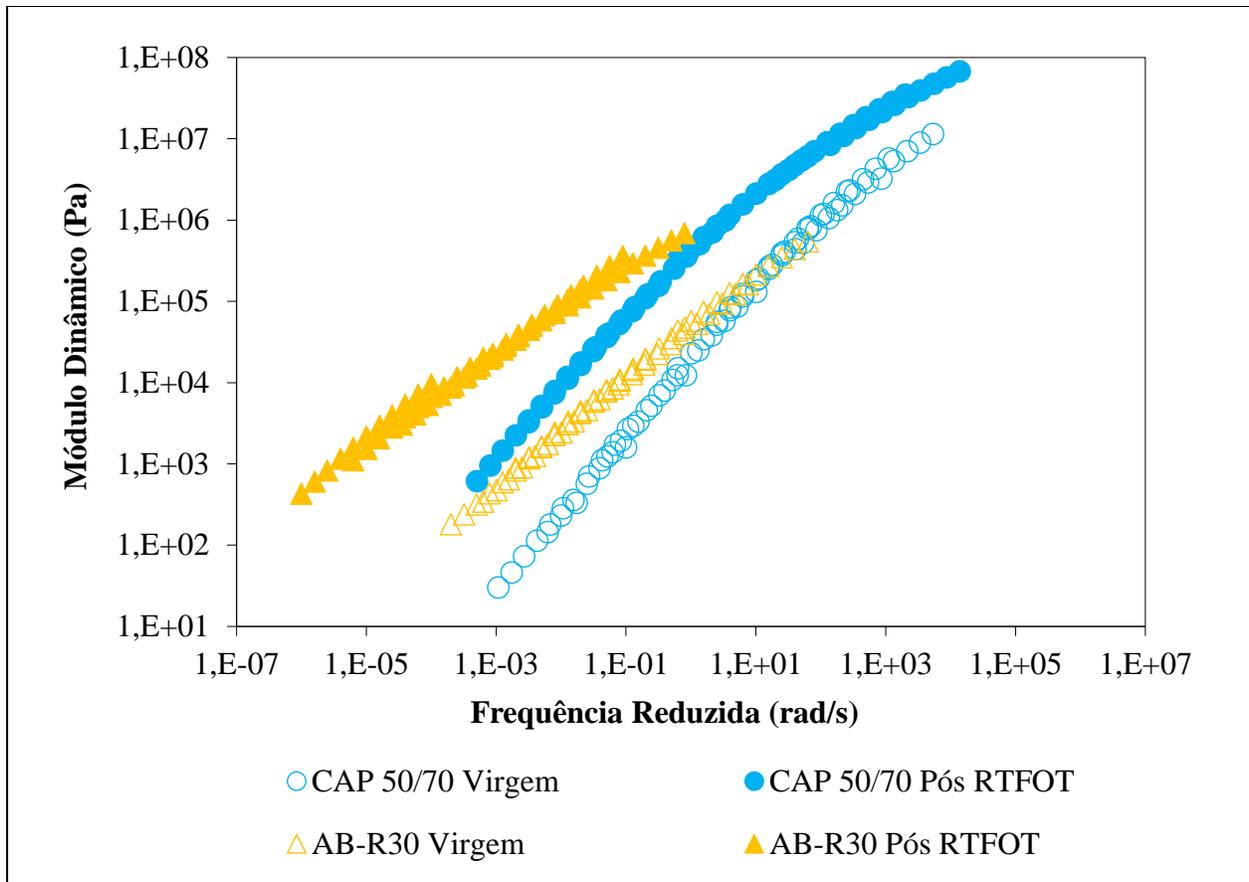
A metodologia adotada para a construção da curva mestra e obtenção da caracterização LVE foi a mesma utilizada por Lopes *et al.* (2021), tendo por base a metodologia aplicada por Pellinen

(2001), com o auxílio da função *Solver* do Excel™. Esta função é utilizada para realizar a otimização de dados com técnicas de regressão de mínimos quadrados não lineares. O procedimento consiste em minimizar a soma do erro quadrático entre o  $|G^*|$  medido durante o ensaio e o valor de  $|G^*|$  modelado. Os coeficientes  $\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\alpha_T$  são ajustados durante o processo de minimização.

Nos ensaios de Lopes *et al.* (2021) os autores explicam que, ao plotar os dados de  $|G^*|$  e  $\delta$  perceberam que as temperaturas adotadas durante os ensaios eram exageradamente altas, isso foi demonstrado por variações e erros de leitura do DSR, uma vez que em altas temperaturas o ligante se encontra em um estado bastante fluido, e o equipamento por vezes atingiu o valor mínimo de leitura. Tentando corrigir esse procedimento, os ensaios desta pesquisa buscaram investigar o comportamento em faixas de temperaturas e incrementos de temperatura menores. Para o CAP 50/70 os ensaios foram realizados entre temperaturas de 10 e 55°C e para o AB-R30 os ensaios foram realizados entre 25 e 75°C. Neste último caso, a adição de RAR tornou o ligante altamente rígido, de forma que nos procedimentos em temperaturas abaixo de 25°C no DSR foram notados erros de leitura em proximidade do torque máximo (230 mN.m).

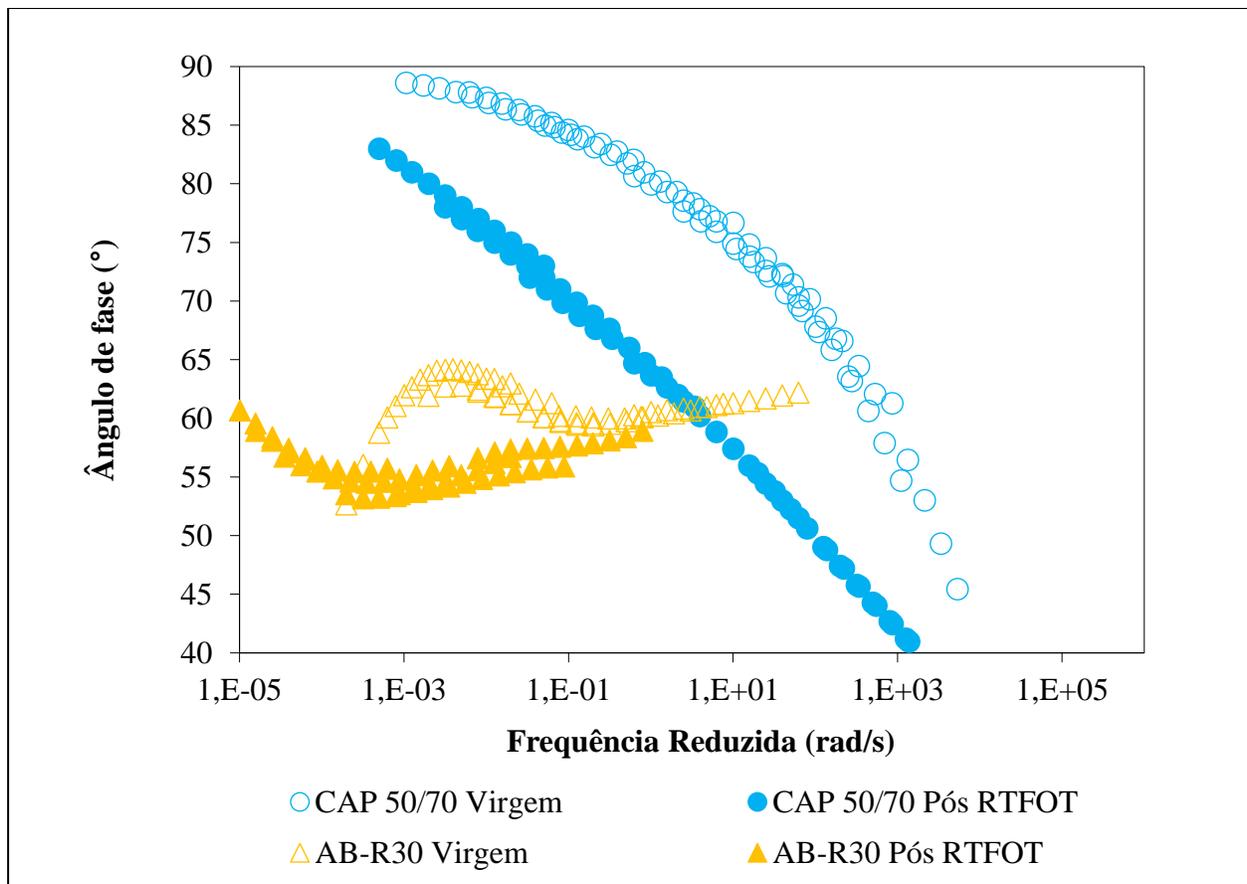
Assim, tendo por base o princípio da sobreposição t-T foram construídas as curvas mestras do módulo dinâmico e do ângulo de fase dos ligantes ensaiados, a uma temperatura de referência de 25°C. Baixas frequências representam altas temperaturas e baixas velocidades de carregamento, enquanto frequências altas representam baixas temperaturas e velocidades altas, englobando toda a faixa de serviço do asfalto no pavimento. Observa-se experimentalmente que há uma importante mudança de comportamento devido ao envelhecimento do ligante principalmente em altas temperaturas e baixas frequências.

As curvas mestras para módulo dinâmico ( $|G^*|$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ) dos ligantes CAP 50/70 e AB-R30 são apresentadas na Figura 4.4 e Figura 4.5, respectivamente, para as condições virgem e envelhecida pós RTFOT na temperatura de referência de 25°C.



**Figura 4.4-** Curva mestra para o módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) a temperatura de 25°C para os ligantes CAP 50/70 e AB-R30 nas condições virgem e envelhecido.

Como esperado, os ligantes envelhecidos apresentam maior  $|G^*|$  do que os ligantes virgens, tanto para o CAP 50/70 quanto para o AB-R30 (Figura 4.4). No entanto, este aumento de  $|G^*|$  é mais proeminente em frequências mais baixas (altas temperaturas). Além disso, há uma diminuição na inclinação da curva mestre do AB-R30, ou menor dependência frequência/temperatura, em decorrência da modificação por RAR. Por outro lado, os ligantes envelhecidos apresentam um  $\delta$  menor do que os ligantes virgens (Figura 4.5), este fato sinaliza que os ligantes estão experimentando ganhos de componente elástica após o envelhecimento. Pode-se afirmar que o ligante a modificação por RAR tornou o ligante resultante mais rígido e mais elástico. Além disso, nota-se as mudanças nas inclinações das curvas, o que indica menor sensibilidade térmica e às solicitações cíclicas para o AB-R30 (ligante mais elástico).



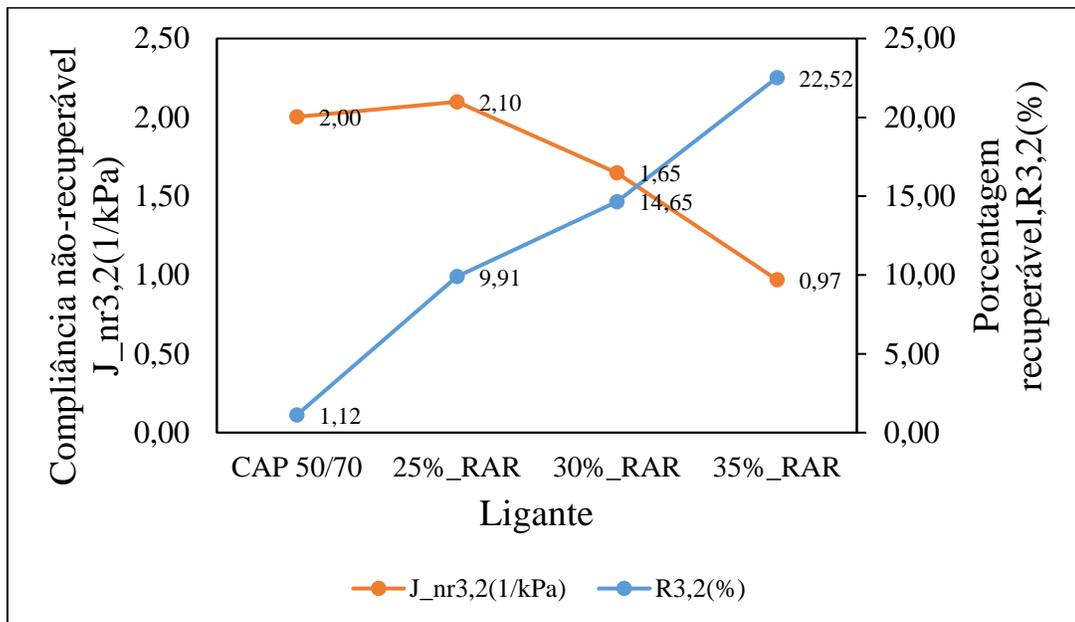
**Figura 4.5-** Curva mestra para o ângulo de fase ( $\delta$ ) a temperatura de 25°C para os ligantes CAP 50/70 e AB-R30 nas condições virgem e envelhecido.

O resultado da modificação por RAR corrobora as pesquisas em ligantes modificados com asfalto-borracha de Celauro *et al.* (2012), Camargo (2016), Wang *et al.* (2018) e Lopes *et al.* (2021).

#### 4.3.3 *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR)

O ensaio MSCR mede a capacidade do ligante asfáltico em manter uma resposta elástica ao ser submetido a dez ciclos de tensão e recuperação em dois níveis diferentes de tensão. A fim de testar a resposta do CAP 50/70 a diferentes modificações por RAR, foram conduzidos ensaios MSCR em amostras do ligante convencional modificadas por diferentes porcentagens de RAR, sem inclusão do processo de ativação da RAR. Isso significa que o MSCR foi realizado nestas modificações com os ligantes na condição não envelhecida, sem o ensaio RTFOT. Os resultados

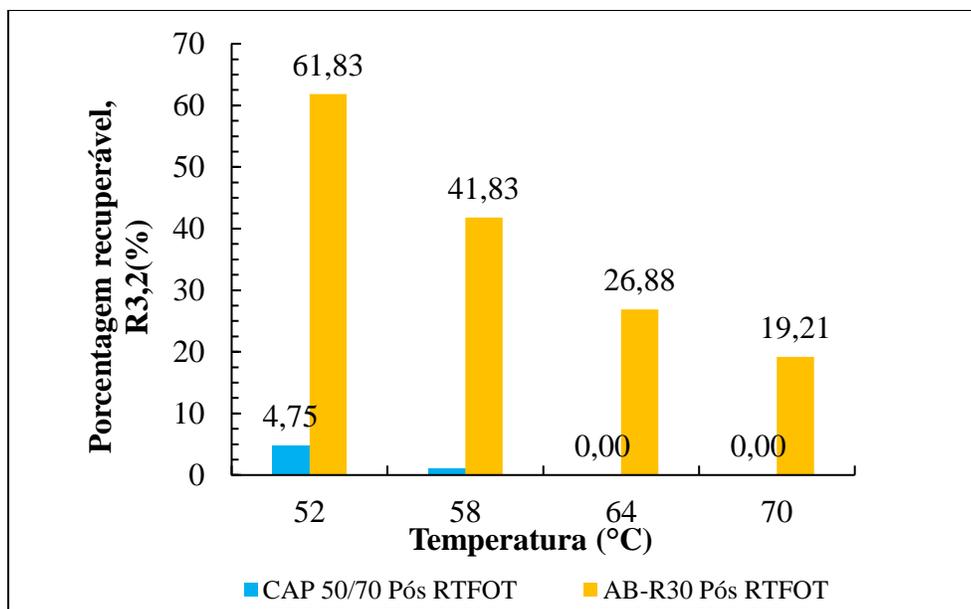
obtidos em termos de recuperação e compliância não recuperável na temperatura de 58°C para os ligantes testados são apresentados na Figura 4.6.



**Figura 4.6** - Resultados de testes do ensaio MSCR para a modificação do CAP 50/70 com RAR.

Como pode ser observado na Figura 4.6 a adição de 35% de RAR indicava os melhores índices de deformação permanente segundo o MSCR. Porém, a autora obteve muita dificuldade na produção do ligante modificado com esta proporção de RAR. Devido à alta viscosidade, não se obteve homogeneidade na mistura da RAR durante a produção do ligante em laboratório. Além disso, mesmo em temperaturas mais elevadas para o ensaio RTFOT (175°C no ligante modificado com RAR), o ligante não formou um filme de espessura fina em toda a superfície do frasco. Desta forma, a adição de 30% de RAR ao CAP 50/70 foi escolhida.

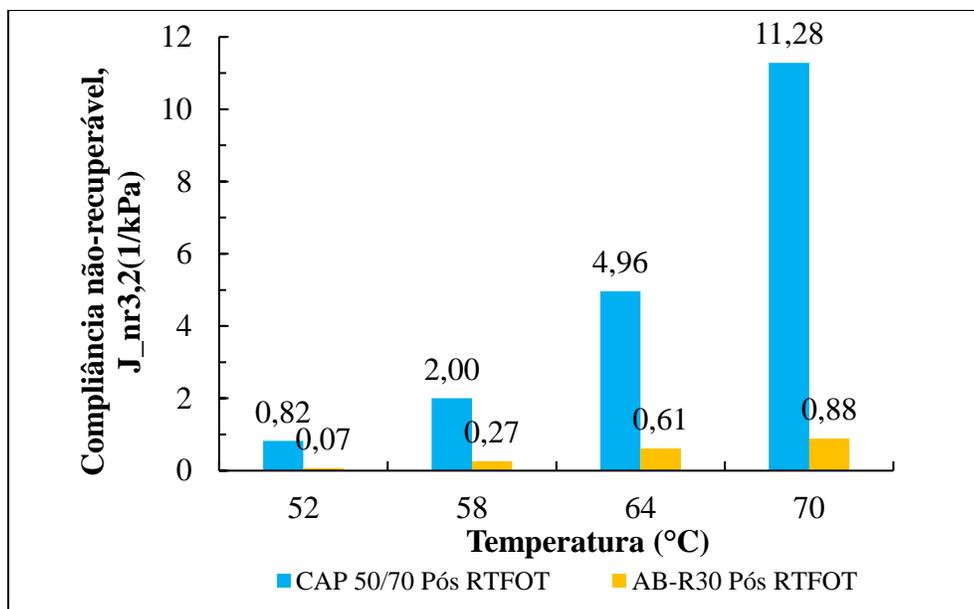
Os ensaios foram conduzidos no CAP 50/70 e no AB-R30, visando encontrar os parâmetros de porcentagem de recuperação (R) e compliância não recuperável ( $J_{nr}$ ), com a finalidade de verificar a tendência das amostras de resistirem ao acúmulo de deformações permanentes. Foram conduzidos ensaios de MSCR nos ligantes nas temperaturas entre 52 e 70° C com incremento de 6° C. A Figura 4.7 apresenta os resultados dos parâmetros R encontrados para a tensão de teste de 3,2 kPa.



**Figura 4.7-**Valores de R3,2 kPa com a temperatura para o CAP 50/70 e AB-R30.

Como é possível observar na Figura 4.7, a recuperação percentual do AB-R30 é maior do que a recuperação do CAP 50/70 em todas as temperaturas ensaiadas. O percentual de recuperação para ambos diminuiu com o aumento da temperatura, sendo que o CAP 50/70 não apresenta recuperação nas temperaturas de 64 e 70° C. Este fato condiz com a temperatura elevada do grau PG, conforme classificado anteriormente, além disso, também corrobora os valores encontrados para o ponto de amolecimento dos ligantes. Os valores de recuperação para AB-R30 validam a presença do material RAR como um modificante que melhora a característica elástica do ligante CAP 50/70. Considerando a temperatura alta do grau PG, o CAP 50/70 (PG 58-XX) apresenta recuperação de 1,12 %, enquanto o AB-R30 (PG 70-XX) apresenta recuperação de 19,21 %. Isto representa um ganho de 16% de recuperação elástica ao CAP 50/70 quando da adição de 30 % de RAR.

A Figura 4.8 apresenta os valores da compliância não recuperável ( $J_{nr}$ ) para a tensão de teste de 3,2 kPa.



**Figura 4.8-** Valores de  $J_{nr}$  3,2 kPa com a temperatura para o CAP 50/70 e AB-R30.

$J_{nr}$  é a medida da deformação permanente acumulada, portanto, menores valores deste parâmetro indicam ligantes asfálticos menos propensos à deformação permanente. A compliância não recuperável para ambos os ligantes aumenta com o aumento da temperatura e dentro do intervalo de temperaturas ensaiadas, o AB-R30 apresenta menores valores de  $J_{nr}$  do que o CAP 50/70. Isso indica que a adição de RAR tem uma melhor resistência à deformação permanente. Mais precisamente, considerando a temperatura alta do grau PG, o CAP 50/70 (PG 58-XX) apresenta  $J_{nr}$  de 2,0 %, enquanto o AB-R30 (PG 70-XX) apresenta recuperação de 0,88 %. Isto representa uma redução de 56% do valor de  $J_{nr}$ , ou seja, aumento da resistência ao acúmulo de deformações permanente quando da adição de 30 % de RAR no ligante CAP 50/70.

Segundo os valores obtidos para  $J_{nr}$  é possível obter a classificação dos níveis de tráfego. A Tabela 4.2 apresenta a classificação para o CAP 50/70 e o ligante AB-R30 para todas as faixas de temperaturas ensaiadas. Observa-se que a modificação por RAR proporcionou a melhoria da classificação do ligante puro, CAP 50/70 para todas as temperaturas, principalmente nas mais altas. Os resultados encontrados para as modificações corroboram os estudos de Domingos e Faxina (2015), Camargo (2016) e Kedarisetty *et al.* (2016).

**Tabela 4.2**-Níveis adequados de tráfego para o CAP 50/70 e para o AB-R30 segundo a classificação da norma AASTHO T350-14.

Ligante	Níveis de tráfego AASTHO T350-14*			
	52°C	58°C	64°C	70°C
CAP 50/70	V	S	-	-
AB-R30	E	E	V	H

\*E = tráfego extremamente pesado ( $J_{nr} \leq 0,5 \text{ kPa}^{-1}$ ); V = tráfego muito pesado ( $0,5 < J_{nr} \leq 1,0 \text{ kPa}^{-1}$ ); H = tráfego pesado ( $1,0 < J_{nr} \leq 2,0 \text{ kPa}^{-1}$ ); S = tráfego padrão ( $2,0 < J_{nr} \leq 4,0 \text{ kPa}^{-1}$ )

Alsaad *et al.* (2018) conduziu ensaios MSCR em um ligante convencional com PG 64-22 e com adições de 17 e 23% de RAR, envelhecidos a curto prazo segundo o ensaio RTFOT. Os resultados do ensaio MSCR obtidos pelo autor, para a temperatura de 64°C são mostrados na Figura 4.9.



**Figura 4.9** - Resultados da recuperação e da compliância não recuperável para 17 e 23% de adição de RAR na temperatura de 64°C (modificado-Alsaad *et al.*, 2018).

Levando em consideração que Alsaad *et al.* (2018) utilizam um ligante com PG 64-22 enquanto esta pesquisa utiliza o CAP 50/70 classificado com o PG 58-XX, ao se observar os resultados de recuperação e compliância não recuperável obtidos pelos autores na tensão de 3,2kPa para a adição de 23% de RAR, pode-se afirmar que os resultados encontrados nesta pesquisa estão em acordo com o observado no referido trabalho. Além disso, pode-se afirmar que por mais que a adição de RAR melhore a qualidade da resposta do ligante à solicitação de deformação permanente, a resistência final é influenciada pela característica do ligante de base.

#### 4.3.4 Linear Amplitude Sweep (LAS)

Os resultados obtidos no ensaio LAS foram analisados conforme a teoria VECD e as equações apresentadas na seção 3.4.2.4 do Capítulo 3. A Tabela 4.3 e a Tabela 4.4 apresentam o resumo dos resultados do ensaio para os parâmetros  $m$ ,  $\alpha$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $D_f$  e os coeficientes  $A$  e  $B$  obtidos para a lei de fadiga para o CAP 50/70 e o AB-R30, respectivamente.

**Tabela 4.3-** Coeficientes obtidos do ensaio LAS para o CAP 50/70, resultados de 2 amostras.

CAP 50/70	$m$	$\alpha$	$C_1$	$C_2$	$D_f$	$A$	$B$
1	0,547	1,827	0,14335	0,446	17	2,73E+04	-3,654
2	0,536	1,866	0,17268	0,375	24	8,45E+04	-3,732
Média	0,542	1,846	0,15801	0,410	20	5,59E+04	-3,693
Desvio Padrão	0,0081	0,0275	0,02074	0,0501	5	4,04E+04	0,0550
CV	1,5	1,5	13,1	12,2	23,6	72,3	-1,5

**Tabela 4.4-** Coeficientes obtidos do ensaio LAS para o AB-R30, resultados de 2 amostras.

AB-R30	$m$	$\alpha$	$C_1$	$C_2$	$D_f$	$A$	$B$
2	0,466	2,147	0,20519	0,269	104	2,52E+07	-4,295
4	0,466	2,147	0,19639	0,279	84	1,36E+07	-4,295
Média	0,466	2,147	0,20079	0,274	94	1,94E+07	-4,295
Desvio Padrão	0,000	0,000	0,00622	0,007	14	8,14E+06	0,000
CV	0,00	0,00	3,10	2,50	14,97	41,96	0,00

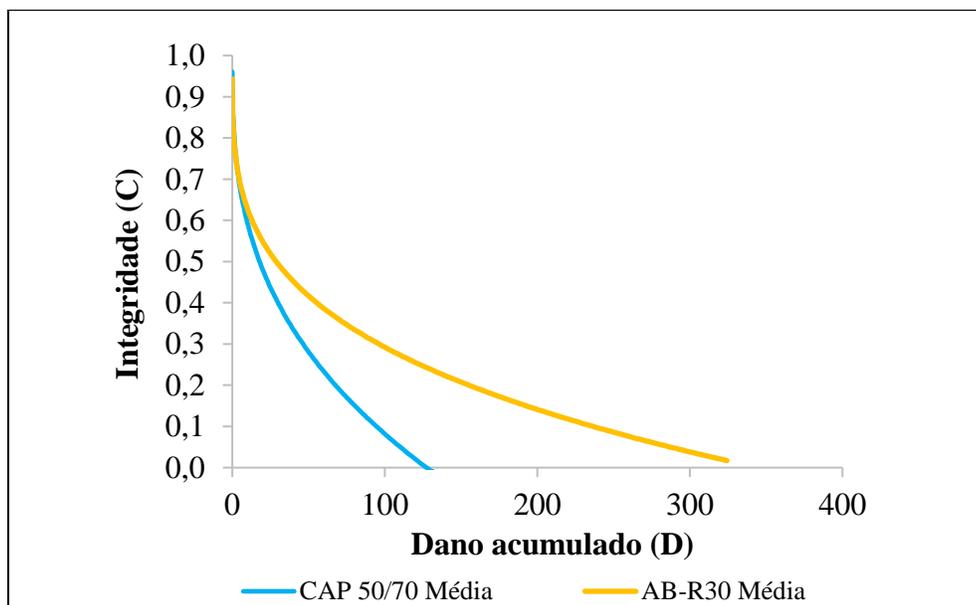
O parâmetro  $B$  depende unicamente do valor de  $\alpha$  determinado a partir do ajuste linear entre o módulo de armazenamento versus a frequência. Uma vez que o valor de  $\alpha$  é calculado segundo a inclinação da reta ( $m$ ), o valor do parâmetro  $B$  está associado à suscetibilidade do ligante à frequência/temperatura. Assim os menores valores de  $m$  obtidos para o AB-R30 indicam que o ligante será menos sensível à amplitude de deformação imposta do que os ligantes CAP 50/70.

Pode-se afirmar que os resultados obtidos na primeira etapa do ensaio LAS estão em conformidade com a caracterização viscoelástica dos ligantes apresentada no item 4.3.2. As análises destes resultados também mostraram que os ligante AB-R30 é menos suscetível aos valores de frequência / temperatura que o ligante CAP 50/70. A título de exemplo, o cálculo da inclinação ( $m$ ) da curva mestra após o envelhecimento, modelada no item 4.3.2, apresentou valores de 0,686 e 0,527 para o CAP 50/70 e para o AB-R30, respectivamente. Pode-se afirmar

que os valores encontrados na varredura de frequência na temperatura de execução do LAS (20° C) e aplicados na teoria do VECD não apresentam diferenças significativas do método de sobreposição tempo-temperatura.

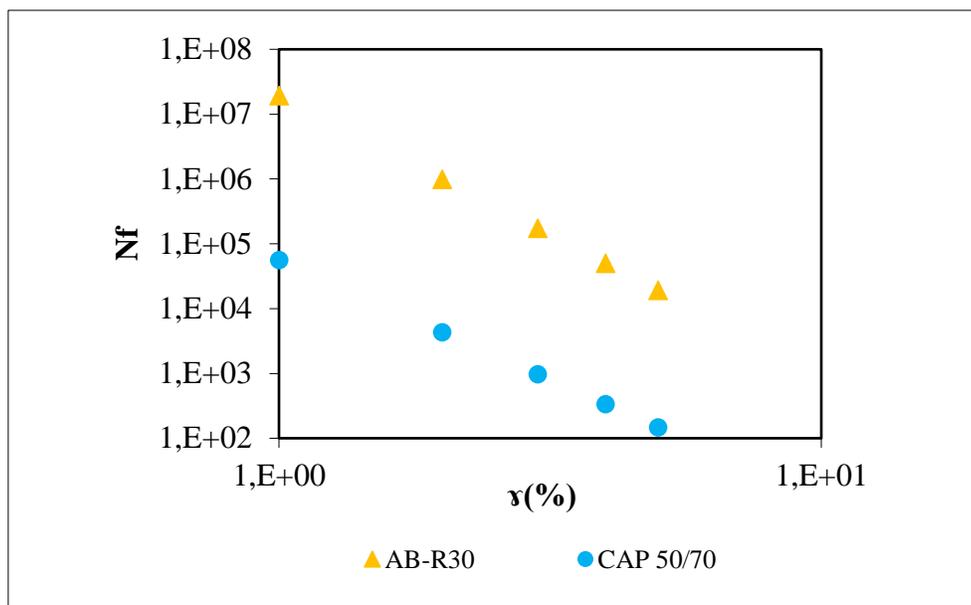
O valor do parâmetro  $A$  indica a integridade do material em função do dano acumulado e do módulo dinâmico inicial do ligante ainda sem dano. O critério de ruptura adotado para o cálculo de  $A$  corresponde à redução do valor inicial de  $|G^*|$  que ocorre na tensão cisalhante de pico, ruptura do material. Observa-se também que o valor de  $D_f$ , dano acumulado até o momento em que ocorre a ruptura, é maior no ligante AB-R30. Significa dizer que o ligante modificado com RAR é capaz de acumular maior nível de dano antes de atingir a ruptura, comparado ao ligante base, CAP 50/70. Observa-se que a modificação do CAP 50/70 resulta em aumento de todos os valores de  $A$ , como mostra a Tabela 4.4.

As curvas características de dano, representadas pela média dos dados obtidos, são apresentadas na Figura 4.10. Ao observar a evolução do parâmetro de dano acumulado ( $D$ ), é possível concluir que para qualquer valor observado o ligante modificado com RAR AB-R30 apresentou maior integridade ( $C$ ). Os resultados observados corroboram as pesquisas de Nuñez (2013), Micaelo *et al.* (2015), Carmago (2016) e Lopes *et al.* (2021).



**Figura 4.10-** Curva de dano característica do ensaio LAS para os ligantes CAP 50/70 e AB-R30.

A determinação dos parâmetros  $A$  e  $B$  da lei de fadiga (Equação 3.6) pela teoria S-VECD permite prever o número de ciclos que causará a ruptura do ligante asfáltico. A Figura 4.11 apresenta o comportamento à fadiga dos ligantes em estudo, em função de alguns valores de deformação (de 1,00 a 5,00%) na faixa da viscoelasticidade linear do ligante asfáltico. Observa-se claramente a melhoria de desempenho à fadiga apresentada pela adição de RAR.



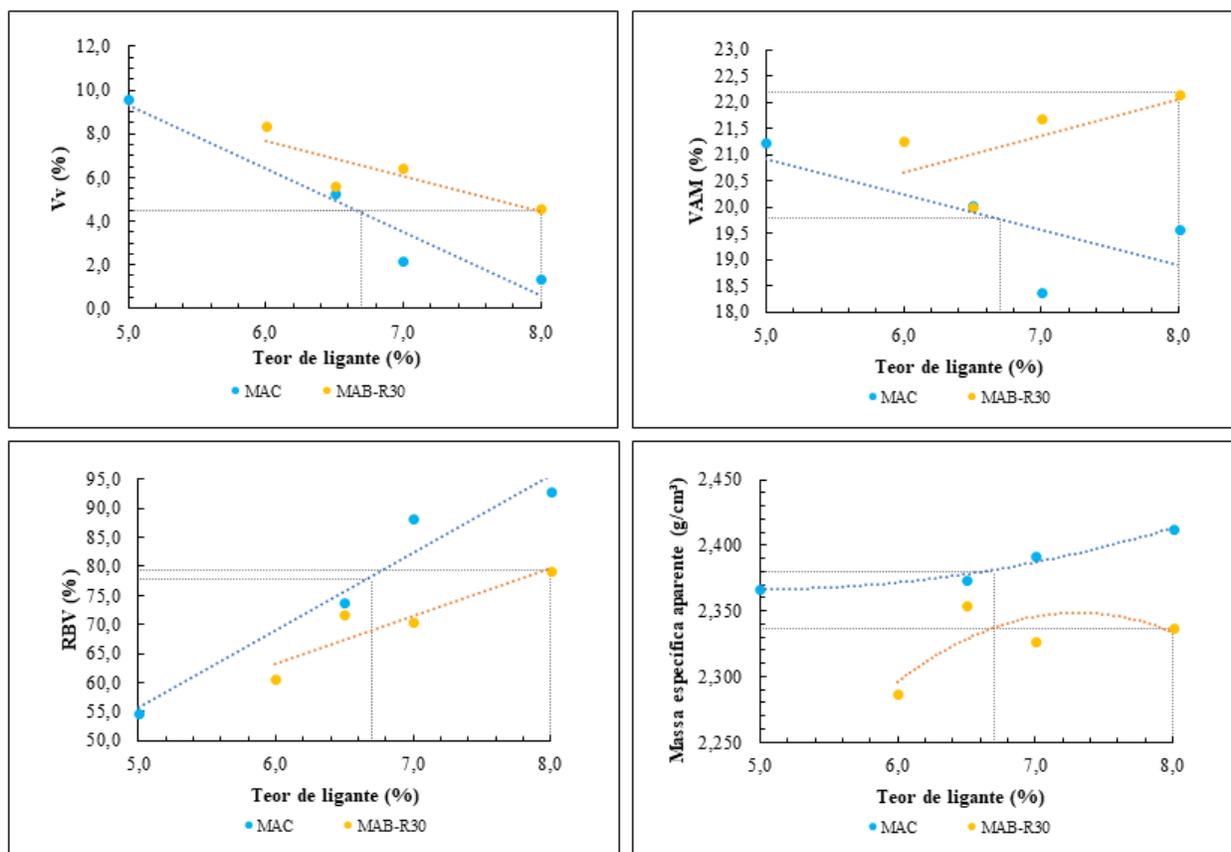
**Figura 4.11-** Vida de fadiga  $N_f$  em função dos valores de deformação cisalhante ( $\gamma$ ).

#### 4.4 DOSAGEM POR COMPACTAÇÃO GIRATÓRIA E PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS DAS MISTURAS

O projeto das misturas MAC e MAB-R30 foi realizado testando os teores de ligante descritos no item 3.6. A metodologia seguiu o protocolo Superpave segundo é descrito no documento MS-2 do *Asphalt Institute* (AI, 2014). São apresentados na Figura 4.9 e na Tabela 4.4 os valores dos parâmetros volumétricos de volume de vazios ( $V_v$ ), vazios no agregado mineral ( $V_{AM}$ ), relação betume vazios (RBV) e densidade aparente são referentes a  $N_{projeto}$ . Os valores de critério da Tabela 4.5 incluem as faixas consideradas pela especificação DNIT 112 e pelo manual do *Asphalt Insitute*. O teor de projeto de ligante asfáltico obtido foi de 6,7% para a mistura de controle e 8,0% para a mistura modificada com RAR.

**Tabela 4.5**-Resumo das propriedades volumétricas nos projetos de dosagem das misturas MAC e MAB-R.

Propriedade	MAC	MAB-R30	Critério
Vv (%)	4,5	4,5	4-6
Teor de projeto (%)	6,7	8	5-8
VAM (%)	19,8	22,2	>14
RBV (%)	77,8	79,2	65-78
% G <sub>mm</sub> N <sub>inicial</sub>	84,3	85,9	Máx 89



**Figura 4.12** – Parâmetros volumétricos da dosagem segundo a metodologia Superpave para as mituras MAC e MAB-R30.

No projeto de dosagem buscou-se enquadrar os parâmetros volumétricos das mituras em faixas que obedecessem tanto aos critérios volumétricos da dosagem Superpave quanto da norma DNIT ES 119/2009. Com relação ao teor de ligante, cabe lembrar que a referida norma estabelece limites para uso de asfalto-borracha do tipo *terminal blend*, o que difere da tecnologia

utilizada. É comum que misturas AB, fabricadas por via úmida, consumam teores elevados de ligante asfáltico (Kaloush *et al.*, 2002; Mello, 2008; Souza *et al.*, 2012; Shah *et al.*, 2018; Alsaad *et al.*, 2018).

A partir dos resultados obtidos para a mistura MAB-R30, é possível avaliar a coerência dos resultados obtidos empiricamente no processo de dosagem da mistura de controle MAC. Na confecção da mistura MAB-R30, como mencionado no item 3.5, considerando 100% em massa de mistura, no teor de 8,0% de ligante, para a adição de 30% de RAR neste teor (2,4%), a massa de ligante foi corrigida para 5,6%. Como a RAR é composta também por ligante asfáltico na margem de 20 a 25% no total de sua composição, é necessário considerar esta parcela de ligante contribuindo para o teor de ligante total da mistura. Desta forma, em 2,4% de RAR, considerando o valor de 25% de ligante em sua composição, obtém-se 0,6% de ligante disponível para compor a mistura asfáltica. Assim, é possível afirmar que a mistura MAB-R30 contém 6,2% de teor de ligante, em 100% de massa de mistura, em que 5,6% provêm da adição de CAP 50/70 e 0,6% da composição da RAR.

Ao observar os resultados plotados na Figura 4.12 no que diz respeito aos valores de  $V_v$  versus teor de ligante, é possível concluir que os dados empíricos da mistura MAC, tendo mesma origem e lote os materiais aplicados na mistura MAB-R30, demonstram que o valor de 6,2% de ligante corresponde a um  $V_v$  de 5,8%. Esta ocorrência exclui a elegibilidade do teor de 6,2% como teor de projeto para a mistura MAC.

Pode-se afirmar que ao estabelecer o valor de  $V_v$  a 4,5% nas misturas MAC e MAB-R, avaliando-se a introdução da RAR na etapa de dosagem, os resultados mostraram que:

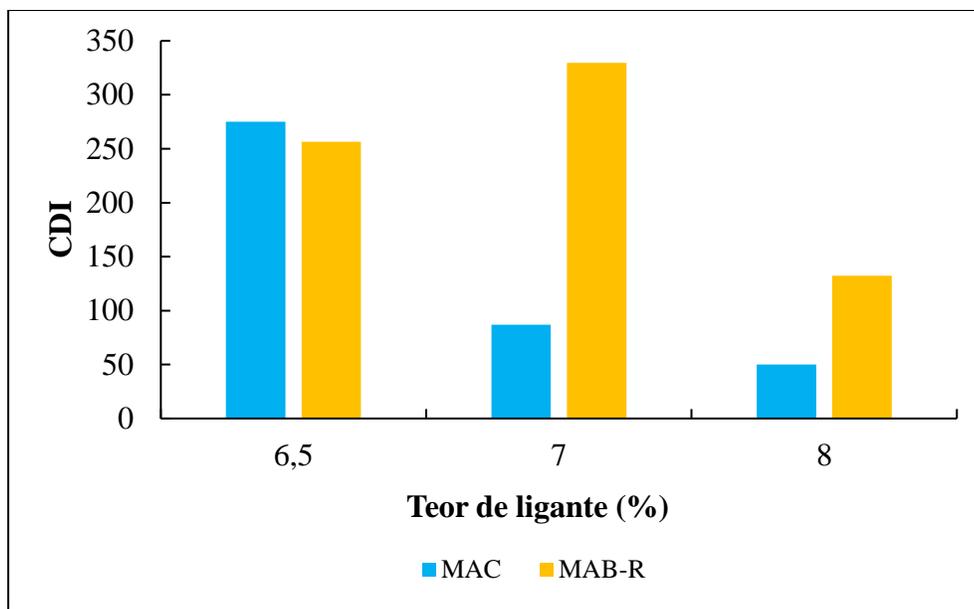
- Ambas as misturas apresentam diminuição do  $V_v$  com o aumento do teor de ligante na dosagem, sendo que a mistura MAB-R30 apresenta maiores valores de  $V_v$  quando comparado a mistura MAC para os mesmos teores de ligante, o que corresponde a introdução da RAR na mistura. Tal fato é atrelado ao aumento da viscosidade promovido pela adição da RAR, tornando o processo de compactação mais trabalhoso;
- Uma vez que os valores de VAM dependem do  $V_v$  e dos Vazios com Betume (VCB), apesar de o volume efetivo de ligante aumentar em ambas as misturas, MAB-R30 apresentou maiores valores de VAM uma vez que possui maiores valores de  $V_v$ . Vale

lembrar que para as misturas modificadas com ligante AB é interessante a apresentação de elevados valores de VAM;

- Os valores de RBV é a razão entre os valores de VCB e VAM, como as misturas MAB-R30 apresentam maiores valores de VAM, conseqüentemente são esperados menores valores de RBV;
- Os resultados da densidade aparente mostram que a introdução da RAR, que apresenta baixo valor de densidade aparente, sendo um material leve, faz com que estes valores na mistura MAB-R30 sejam menores que na mistura MAC em qualquer teor de ligante testado na etapa de dosagem.

Na Figura 4.13 apresentam-se os valores de CDI para os teores de 6,5; 7,0 e 8,0% a fim de verificar o comportamento das misturas MAC e MAB-R30. Nascimento (2008) relaciona o CDI ao trabalho aplicado pelos rolos compactadores para as misturas atingirem a densidade requerida durante a construção e o TDI com a densificação do pavimento em função das cargas impostas pelo tráfego de veículos. Na Figura 4.13 é possível observar que o aumento do teor de ligante nas misturas apontam para a tendência de diminuição do valor de CDI. Além disso, é possível observar que a adição de RAR aumenta os valores de CDI da mistura MAB-R30 em comparação aos valores obtidos para MAC. Tal fato corresponde ao esperado uma vez que a modificação por RAR representa aumento dos valores de viscosidade do ligante, o que implica em aplicação de maior energia de compactação.

Faheem e Bahia (2004) destacam que para tráfego pesado, as misturas devem indicar CDI máximo de 300. Apesar de o teor de 7,0% da mistura MAB-R30 apresentar comportamento fora da tendência observada, o que pode significar que a mistura foi compactada fora da faixa de temperatura adequada, para o CDI, ambas as misturas apresentaram habilidade de densificação em campo, respeitando o limite de 300.



**Figura 4.13** – Parâmetro CDI x teor de ligante (%).

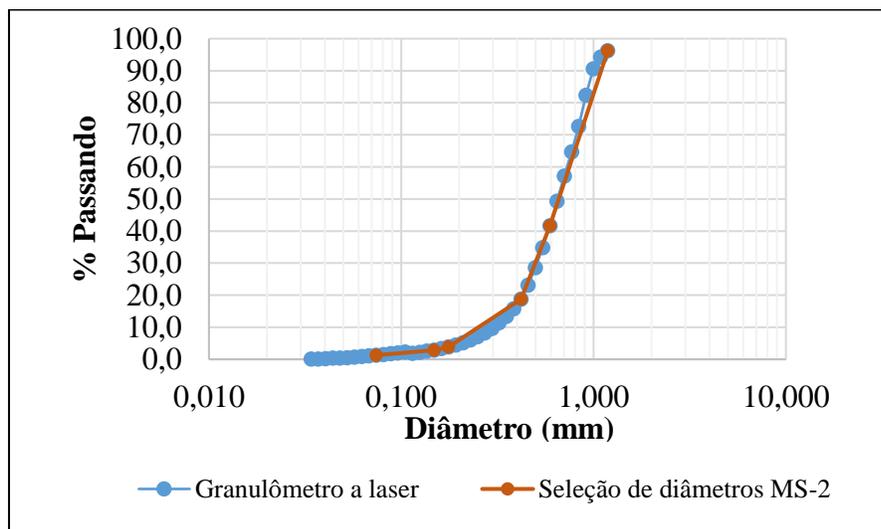
Para a análise do TDI seria necessário compactar as amostras até 98% da Gmm ( $N_{final}$ ), no caso deste estudo, sendo necessário a compactação de amostras neste estudo até 205 giros. Uma vez que para a etapa de dosagem e para os ensaios mecânicos em vista não se aplica a compactação de amostras até  $N_{final}$ , os valores de TDI não serão apresentados.

#### 4.5 ESPESSURA DO FILME DE LIGANTE

Ressalta-se que para o cálculo da espessura do filme de ligante desenvolvido por Nanjegowda *et al.* (2019) em misturas que utilizam a RAR na composição, são considerados os valores tabelados de aberturas de malha de peneiras e as respectivas superfícies específicas, fornecidas pela MS-2 (*Asphalt Institute*, 2014). Dito isto, tendo em vista a curva granulométrica dos agregados utilizados na mistura e a curva granulométrica da RAR, merecem atenção a sequência de peneiras que foram consideradas no cálculo: 4,75; 2,36; 1,18; 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075 mm.

Uma etapa importante nos cálculos da espessura do filme de ligante foi a obtenção da curva granulométrica da RAR obtida por meio do granulômetro a laser. Na Figura 4.14 são observadas a disposição de duas curvas granulométricas: (1) todos os tamanhos de diâmetros observados na RAR nos ensaios realizados no granulômetro; (2) tamanhos de diâmetros observados na RAR no

ensaio do granulômetro a laser, com seleção dos valores presente no MS-2 (*Asphalt Institute*, 2014).



**Figura 4.14-** Distribuição granulométrica da RAR obtida por meio do granulômetro a laser.

De acordo com as equações apresentadas no item 3.6, as espessuras do filme de ligante para a granulometria estabelecida, assim como a combinação RAR-agregado e RAR-ligante foram calculados. A

Tabela 4.6 e a Tabela 4.7 apresentam exemplos das planilhas utilizadas para o cálculo da espessura do filme de ligante (*TF*).

**Tabela 4.6-**Exemplo de cálculo de *TF* considerando  $SA_{Agregado}$  e  $SA_{RAR-Agregado}$  para 8,0% de ligante sendo, 5,60% de CAP50/70 e 2,40% de RAR.

Malha (mm)	% Passando Mistura	Ajuste granulométrico Agregados	$SA_{Fi}$ (MS-2; Asphalt Institute)	$SA_{Agreg}$	% RAR Passando	Ajuste granulométrico RAR	$AS_{FiRAR}$	$SA_{RAR-Agregado}$	
19,1	100	97,6			-	-	-		
12,5	95,9	93,6	0,41	0,41	-	-	-	0,41	
9,5	77,9	76,0			-	-	-		
4,8	37,2	36,3	0,4	0,14	-	-	-	0,14	
2	22,1	21,6	1,0	0,21	-	-	-	0,21	
1,18	-	-	1,6	-	96,2	2,3	16,25	0,38	
0,6	-	-	3,3	-	41,7	1,0	30,93	0,31	
0,425	10,6	10,3	4,6	0,49	18,8	0,5	49,00	0,70	
0,18	-	-	11,2	-	3,9	0,1	122,93	0,11	
0,15	-	-	13,4	-	2,9	0,1	147,76	0,10	
0,075	2,8	2,7	27,3	0,76	1,3	0,0	308,41	0,84	
$\Sigma SA_{Agregado}$				<b>2,02</b>	$\Sigma SA_{RAR-Agregado}$				<b>3,21</b>
<b>TF</b>				<b>43,03</b>	<b>TF</b>				<b>18,98</b>

**Tabela 4.7-** Exemplo de cálculo de  $TF$  considerando  $SA_{RAR-Ligante}$  para 8,0% de ligante sendo, 5,60% de CAP50/70 e 2,40% de RAR.

Malha (mm)	(%) RAR Passando	$SA_{F-RAR}$	$AS_{-RAR}$
1,18	96,2	0,15	0,004
0,6	41,7	0,37	0,009
0,425	18,8	0,86	0,021
0,18	3,9	4,64	0,111
0,15	2,9	6,27	0,150
0,075	1,3	14,96	0,359
$\Sigma AS$ (Com RAR)			<b>2,67</b>
			<b>TF</b>
			<b>22,76</b>

O procedimento exemplificado nas Tabelas 4.6 e 4.7 foi realizado para todos os teores de dosagem sendo os resultados resumidos na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8-**Resumo dos resultados de  $SA$  e  $TF$  para a etapa de dosagem das misturas asfálticas.

MAC			MAB				
Teor (%)	$SA$ (m <sup>2</sup> /kg)	$TF$ (μm)	Teor (%)	RAR como agregado		RAR como ligante	
			-	$SA$ (m <sup>2</sup> /kg)	$TF$ (μm)	$SA$ (m <sup>2</sup> /kg)	$TF$ (μm)
5	2,02	26,05	6	2,91	15,35	2,51	17,79
6,5	2,02	34,40	6,5	2,99	16,30	2,55	19,07
<b>6,7</b>	<b>2,02</b>	<b>35,54</b>	7	3,06	17,22	2,59	20,32
7	2,02	37,25	<b>8</b>	<b>3,21</b>	<b>18,98</b>	<b>2,67</b>	<b>22,76</b>
8	2,02	43,03					

Uma vez que a granulometria aplicada nas misturas foi fixada, a fim de se atingir o  $V_v$  e demais parâmetros volumétricos, é possível observar que com o aumento do teor de ligante há consequente aumento nos valores de  $TF$  para a dosagem MAC. Significa dizer que dentro da mesma granulometria e  $SA_{Agregado}$ , o volume disponível de ligante asfáltico aumenta, aumentando o valor de  $TF$  nessas misturas. Observa-se que, para o teor de ligante de 6,7% selecionado na MAC, o  $TF$  é de 35,54 μm.

Para as misturas MAB-R30 observa-se que os valores de  $SA_{RAR-Agregado}$  são maiores em todos os teores quando comparado aos valores de  $SA_{RAR-Ligante}$ . Isso ocorre devido ao fato de  $SA_{RAR-Agregado}$  ser a soma da área de superfície do agregado com a influência da RAR, atuando como um fíler, que ao contrário da granulometria da mistura, apresenta frações nas peneiras de abertura

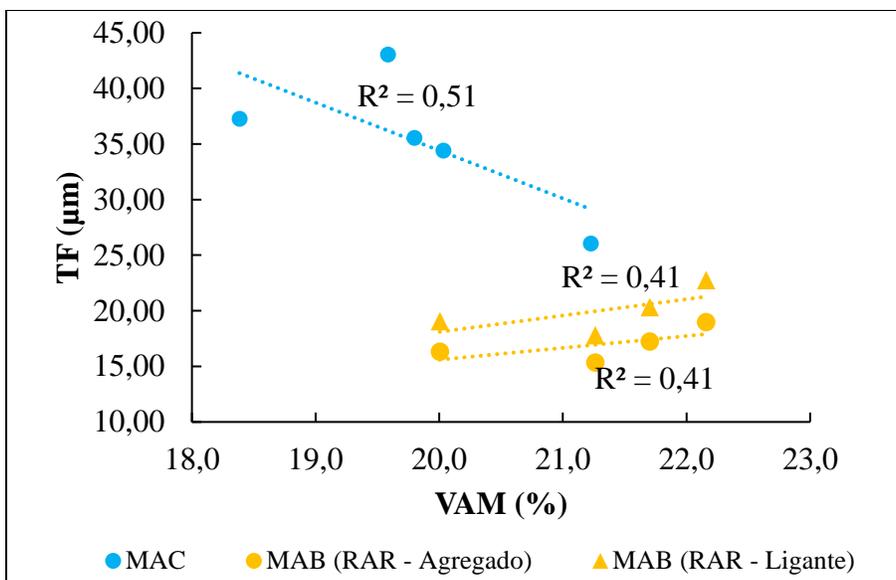
0,18 e 0,15 mm, o que aumenta o valor da área de superfície, consumindo parte do ligante, como é observado ao se comparar os resultados de espessura do filme de ligante,  $TF$ .

Ao considerar a RAR como ligante, apesar do alto valor de fator de área de superfície considerado para a RAR, a correção dos valores de  $SA_{RAR}$  a partir da porcentagem de adição do material presente na massa total da mistura (2,40 % em 8,0 % de ligante), contribuem para um valor de em  $SA_{RAR-Ligante}$  menor, aumentando o  $TF$  disponível na mistura.

Com relação à espessura do filme de ligante em misturas modificadas com RAR, recomendadas por Shah (2018) e Nanjegowda *et al.* (2019), pode-se afirmar que a mistura MAB-R30 em seu teor de projeto definido na etapa de dosagem (8%) cumpre os valores de  $TF$  que recomendam os autores, sendo estes de 10 e 12  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

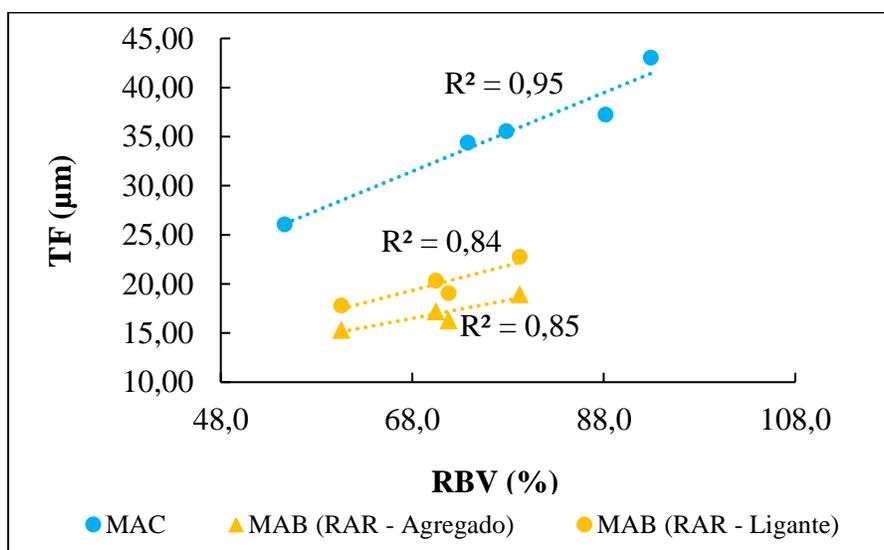
Os autores Kandhal e Chakraborty (1996) indicam que a faixa ideal da espessura do filme de ligante seria entre 9  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ . A partir da metodologia proposta por Duriez, STP1147 (1992) a espessura do filme de ligante é obtida a partir do método da superfície específica em que se aplica o módulo de riqueza ( $k$ ), com um valor mínimo especificado. Vale mencionar que a espessura do filme de ligante não é tratada como um parâmetro da etapa de dosagem, sendo recomendada a sua análise e observação como um indicador de possíveis ocorrências nas misturas como um direcionador.

Na Figura 4.15 e Figura 4.16 apresentam-se as relações obtidas entre as propriedades volumétricas da dosagem VAM e RBV com a espessura do filme de ligante. De uma maneira geral observa-se que o VAM apresentou baixa correlação com os valores de  $TF$ , enquanto o RBV apresentou boa correlação com  $TF$  nas misturas estudadas. Na mistura MAC o aumento do teor de ligante causa o aumento de  $TF$  e diminuição dos valores de VAM. O que faz sentido uma vez há maior disposição de ligante na mistura, para um mesmo valor de superfície específica de agregado, fazendo com que o ligante aja de forma a reduzir o  $V_v$ . Nas misturas MAB-R30 se observa que ao contrário, há aumento nos valores de VAM e conseqüente aumento de  $TF$ , fato que representa a atuação da RAR nestas propriedades.



**Figura 4.15** - Espesura do filme de ligante em função dos valores de VAM (%) das misturas.

O RBV apresentou correlação direta com os valores de TF em ambas as misturas para os teores de dosagem testados. Tal fato é esperado dado que o aumento na espesura do filme de ligante representa sua maior disponibilidade na mistura, ocorrendo em menores valores na MAB-R30 quando considerado a interação RAR-agregado devido ao aumento da superfície específica da mistura.



**Figura 4.16** - Espesura do filme de ligante em função dos valores de RBV (%) das misturas.

Além de cumprir o valor estabelecido em pesquisas anteriores para o filme de ligante em misturas modificadas com RAR, os valores de *TF* encontrados também se encontram dentro da faixa de ocorrência estudada por Vieira *et al.* (2019). Os autores estudaram a espessura de filme de ligante em matriz de agregado fino tendo como resultado, apesar da não uniformidade de distribuição por toda amostra, a maior ocorrência da espessura do filme entre 0  $\mu\text{m}$  e 50  $\mu\text{m}$ .

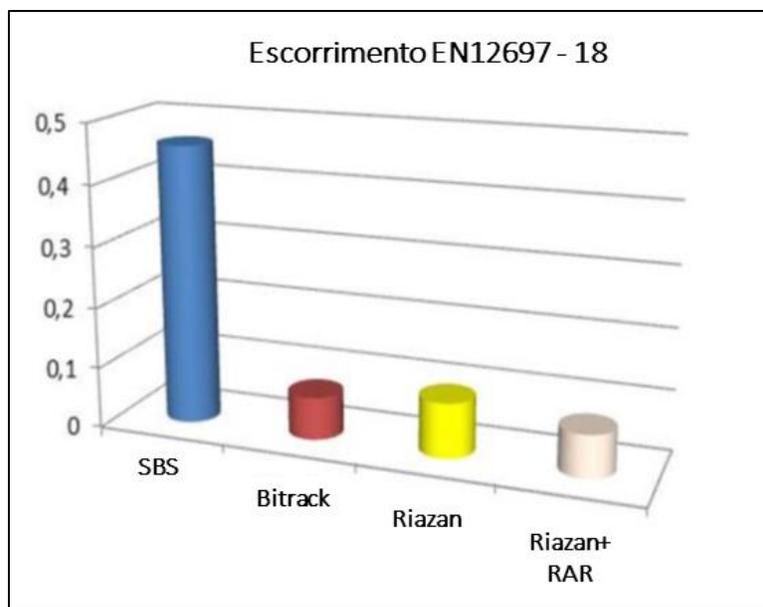
#### 4.6 ENSAIO DE ESCORRIMENTO DA MISTURA ASFÁLTICA

Na Tabela 4.9 mostram-se os resultados obtidos para o ensaio de escorrimento das misturas MAC e MAB-R30. Como recomendado, os ensaios foram realizados na temperatura de produção das misturas asfálticas e a uma temperatura 15°C acima desta. Os ensaios foram realizados em temperaturas mais altas para a mistura MAB-R30 em razão da necessidade de se trabalhar com temperaturas mais elevadas devido à viscosidade elevada pela adição de RAR. Observa-se que os valores de escorrimento em porcentagem na mistura MAB-R30 foram menores que na mistura MAC. Este fato permite concluir que a adição da RAR melhorou a resposta da mistura quanto ao escorrimento, mesmo em temperaturas de trabalho mais elevadas.

**Tabela 4.9-**Resultados de perda de massa no ensaio de escorrimento das misturas MAC e MAB-R30.

Mistura	Ensaio Escorrimento						
	Temp.	145°C		Média	165°C		Média
MAC	Perda de massa (g)	3,40	4,80	4,10	20,60	24,10	22,35
	Escorrimento (%)	0,27	0,39	<b>0,33</b>	1,61	1,87	<b>1,74</b>
MAB-R30	Temp.	165°C		Média	180°C		Média
	Perda de massa (g)	2,50	2,73	2,62	1,30	1,10	1,20
	Escorrimento (%)	0,20	0,22	<b>0,21</b>	0,10	0,09	<b>0,10</b>

Sousa *et al.* (2012) apresentam resultados de escorrimento para misturas SMA produzidas a partir de quatro ligantes comumente utilizados na Rússia. Duas misturas (com 6,2% de teor de ligante) produzidas com ligantes extremamente modificados com polímeros (SBS e Bitract), e outras duas misturas produzidas com um ligante menos viscoso (Riazan), estabilizado com adição de 0,4% de fibras celulósicas (em 6,5% de teor de ligante), e a outra mistura com adição de 30% de RAR (em massa de ligante). Os resultados obtidos pelos autores são mostrados na Figura 4.17. Percebe-se que a adição de RAR é efetiva na minimização do escorrimento da mistura nos períodos de repouso antes da compactação.



**Figura 4.17-** Resultados do escorrimento do ligante obtidos para quatro ligantes utilizados na Rússia (modificado-Sousa *et al.*,2012).

Sousa *et al.* (2012) não mencionam as temperaturas de realização do ensaio de escorrimento apresentado na Figura 4.17, no entanto percebe-se que os valores para a mistura confeccionada com a RAR são menores que 0,1%. Este valor vai de encontro ao escorrimento médio encontrado para a mistura MAB-R30 na temperatura de 180°C, de 0,1%. Além disso, é curioso notar que o escorrimento de MAB-R30 diminuiu com o aumento da temperatura. Tal fato pode estar atribuído ao tempo de digestão das partículas de borracha, ou ativação da RAR na mistura pela combinação da alta temperatura e do tempo demandado no ensaio de escorrimento, ambos acontecimentos contribuindo com o aumento da viscosidade do ligante.

## 4.7 ENSAIOS NAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos da execução dos ensaios de desempenho mecânico realizados nas amostras de misturas asfálticas.

### 4.7.1 Dano por umidade induzida

A avaliação da resistência ao dano por umidade induzida é relacionada aos resultados de resistência à tração que as misturas asfálticas apresentaram antes e depois do condicionamento

térmico, segundo a norma DNIT 180/2018 – ME. Foi adotado um intervalo de saturação próximo a 60 % em ambas as misturas testadas.

A Tabela 4.10 e a Tabela 4.11 apresentam o  $V_v$ , a saturação (S), os resultados da  $RT$  do grupo de controle ( $RT$ ) e o condicionado ( $RT_c$ ) e valores de  $RRT$  para as misturas MAC e MAB-R30, respectivamente. Em relação aos valores de  $RT$ , observa-se que de forma geral, houve a redução da propriedade em consequência do condicionamento térmico. No grupo de amostras não condicionadas ( $RT$ ), tanto para a mistura MAC quanto para MAB-R30, um dos valores de  $RT$  (destaque negrito) encontra-se fora do intervalo permitido entre  $\pm 10\%$  o valor da média, segundo a norma do ensaio de resistência à tração DNIT 136/2018 - ME. Em caso de se desconsiderar tais valores, o cálculo de  $RRT$  passa a ser 83% para MAC e 87% para MAB-R30, e representa ganho de resistência entre MAB-R30 e MAC em cerca de 4,5%.

**Tabela 4.10-RT e RRT da mistura de controle, MAC.**

MAC	RT			RTc		
<b>V<sub>v</sub> (%)</b>	7,99	7,41	7,43	7,69	7,55	8,54
<b>S (%)</b>	-	-	-	58,15	59,52	58,71
<b>RT (MPa)</b>	0,61	<b>0,49</b>	0,59	0,52	0,45	0,54
<b>RT<sub>Média</sub> (MPa)</b>		0,56			0,50	
<b>Desvio padrão (MPa)</b>		0,06			0,05	
<b>Coefficiente de variação (%)</b>		11			9	
<b>RRT (%)</b>				89		

**Tabela 4.11- RT e RRT da mistura modificada com RAR, MAB-R.**

MAB-R30	RT			RTc		
<b>V<sub>v</sub> (%)</b>	7,41	7,38	6,91	7,64	7,34	7,29
<b>S (%)</b>	-	-	-	57,12	57,12	61,01
<b>RT (MPa)</b>	0,62	0,61	<b>0,48</b>	0,51	0,57	0,51
<b>RT<sub>Média</sub> (MPa)</b>		0,57			0,53	
<b>Desvio padrão (MPa)</b>		0,08			0,03	
<b>Coefficiente de variação (%)</b>		14			7	
<b>RRT (%)</b>				93		

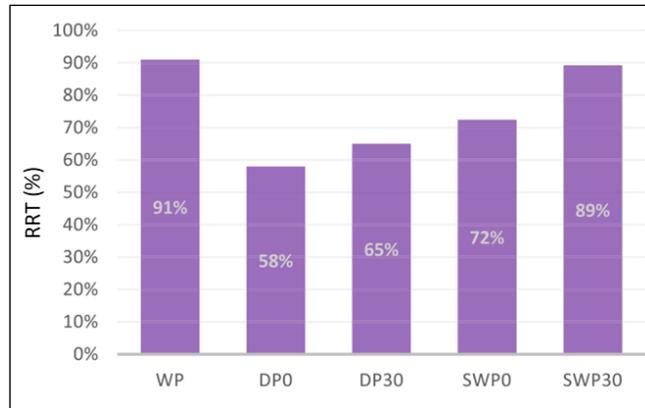
Apesar de conduzir os ensaios segundo os critérios da norma brasileira para a suscetibilidade ao dano, os testes também visaram atender ao critério da metodologia Superpave que preconiza que a mistura asfáltica, dosada e moldada, é considerada sensível ao dano por umidade induzida

quando a *RRT* é menor que 80%. Como observa-se nos resultados das tabelas 4.9 e 4.10, tanto a mistura de controle quanto a mistura modificada com RAR atendem a este critério.

O intuito de se utilizar a mistura MAC é de justamente investigar a verdadeira influência dos grânulos de RAR, agindo como modificante na mistura. A adição de RAR, que apresenta alta concentração de cal em seu *fíler*, parece melhorar as propriedades de resistência ao dano por umidade, uma vez que o valor de *RRT* é mais alto para MAB-R30. No entanto, a pequena diferença observada nos valores de *RT* nos grupos *RT* e *RT<sub>c</sub>* em ambas as misturas não permite uma conclusão clara e assertiva do material quanto a propriedade em questão.

As pesquisas bibliográficas consultadas com relação ao ensaio de dano por umidade induzida em misturas descontínuas do tipo *gap-graded* com RAR, divergem em tendência de resultados, apresentando em comum menores valores de *RT* nas amostras após o condicionamento. No trabalho de Shah (2018), o valor de *RRT* obtido para uma mistura do tipo *gap-graded* com 35% de RAR (sendo o teor de projeto de 10%) apresentou *RRT* de 83 % e Kumar *et al.* (2018) obtiveram valores de *RRT* menores que 70% em uma adição de 33% de RAR.

Chavez *et al.* (2019) realizaram ensaios de dano por umidade induzida em misturas de granulometria descontínua comparando os resultados entre uma mistura AB de controle, produzida com ligante modificado empregando 18% de BMP (nomeada de *wet process* - WP), e duas misturas também descontínuas, produzidas em laboratório uma modificada com BMP pelo processo seco (nomeada de *dry process* - DP) e outra modificada com RAR (nomeada de *semi wet process* - SWP). Os autores comentam que a mistura produzida pelo processo seco e a mistura modificada com a RAR foram testados com tempo de digestão de 30 minutos e sem tempo de digestão. Na Figura 4.18 mostra-se os resultados de *RRT* obtidas pelos autores.



**Figura 4.18** - Resultados RRT do ensaio DUI para várias misturas modificadas com BMP e RAR, sem digestão (0 minutos) e com tempo de digestão (30 minutos) (modificado-Chaves *et al.* 2019).

Chavez *et al.* (2019) comentam que a mistura de controle produzida com uma ligante modificado com BMP (WP) obteve o melhor resultado ao dano por umidade. No entanto, os autores comentam que apenas 30 minutos de tempo de digestão para a mistura modificada com RAR (SWP30) oferece resultados adequados de resistência à degradação pela ação da água. Ainda segundo os autores, este tempo pode ser alcançado durante o transporte da mistura da usina de asfalto até o ponto de aplicação. Nesse sentido, o tempo de digestão não é problemático para o uso da RAR.

#### 4.7.2 Ensaio Cantabro

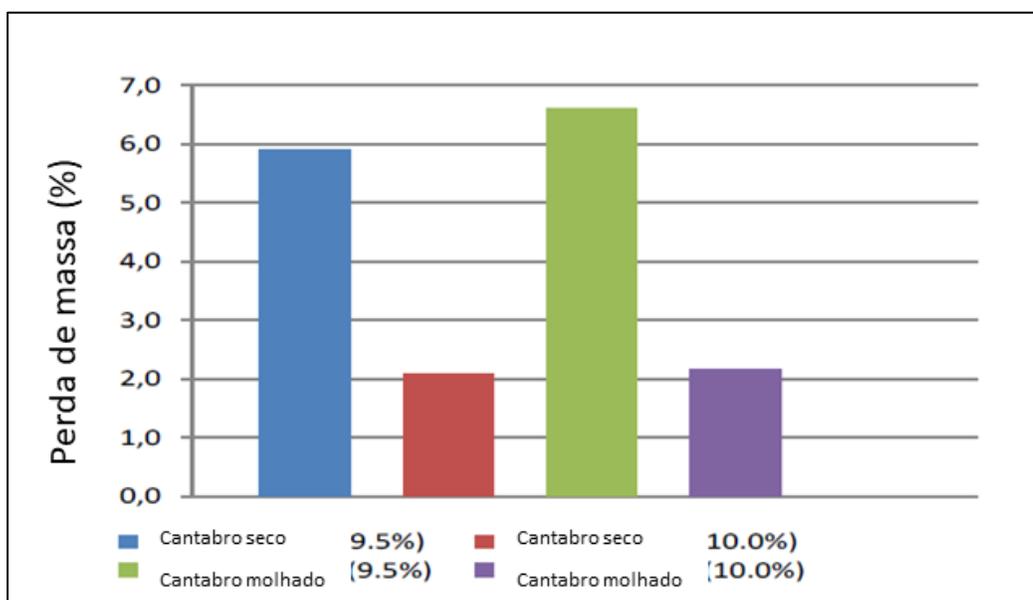
A resistência ao desgaste por perda de massa Cantabro é uma indicação da durabilidade da camada de revestimento e está relacionada à quantidade e qualidade do ligante asfáltico. Na Tabela 4.12 são mostrados os resultados obtidos e, com base nos dados apresentados, pode ser observado que a mistura MAB-R30 apresenta menores de perda de massa, em média, o que significa que a adição de RAR diminui a tendência ao desgaste.

Analisando o valor de perda de massa obtido para a mistura MAC, apesar de mais elevado do que a perda de massa da mistura MAB-R30, pode-se concluir que o alto teor de ligante contido na mistura atua a contra a ação do desgaste, uma vez que mesmo sem nenhum outro aditivo a mistura MAC apresenta valor razoável de perda de massa.

**Tabela 4.12 - Resultados do ensaio de perda de massa – Ensaio Cantabro**

Mistura	P(g)	P'(g)	A(g)	Média (%)	DP (%)
MAC_1	1111,70	1029,50	7,39		
MAC_2	1167,30	1099,90	5,77	6,61	0,81
MAC_3	1173,40	1095,10	6,67		
MAB_R301	1181,20	1147,80	2,83		
MAB_R302	1180,80	1146,30	2,92	2,67	0,36
MAB_R303	1186,60	1159,80	2,26		

Sousa *et al.* (2012) realizaram o ensaio Cantabro para duas misturas denominadas como *thingap*, com dois diferentes teores de ligante (9,5 e 10%), que foram modificadas com RAR na porcentagem de 45% (em massa de ligante). Os autores realizaram o ensaio Cantabro conforme uma norma espanhola (NLT 62/92) em amostras na condição seca e molhada. Na Figura 4.19 são mostrados os resultados obtidos pelos autores. Tendo por comparação os valores de Sousa *et al.* (2012) conclui-se que os valores obtidos para MAB-R30 são pertinentes para perda de massa de misturas modificadas com RAR.



**Figura 4.19 - Resultados do ensaio Cantabro para misturas do tipo *thingap* (modificado-Sousa *et al.*, 2012).**

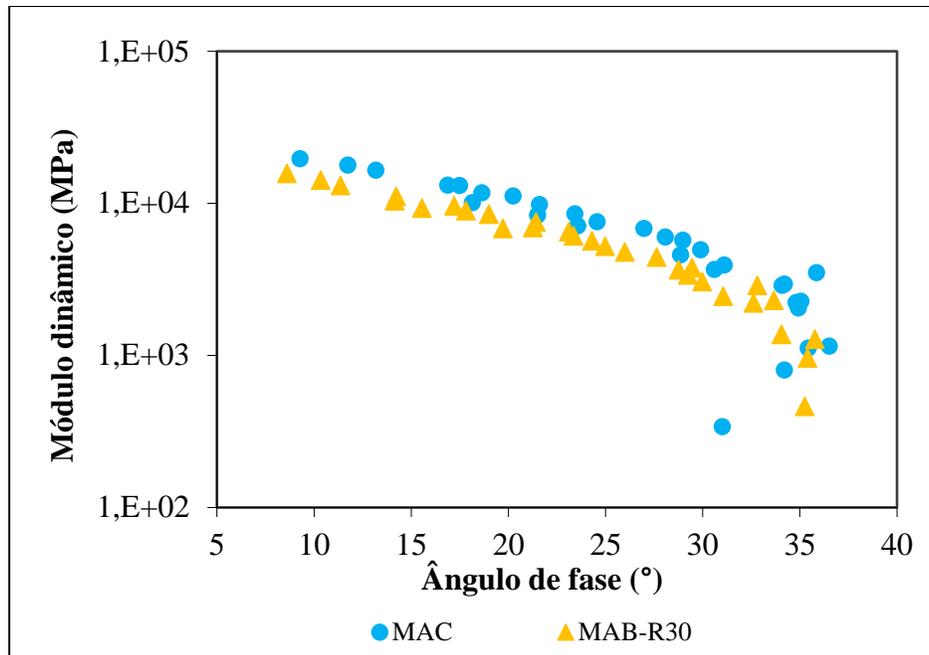
### 4.7.3 Módulo dinâmico e ângulo de fase

Com os resultados da caracterização LVE de duas amostras para cada mistura e o princípio da sobreposição t-T, foram construídas as curvas mestras do módulo dinâmico e do ângulo de fase das misturas MAC e MAB-R30, a uma temperatura de referência de 20°C. A partir dos dados experimentais, o modelo sigmoidal foi ajustado, obtendo-se os parâmetros e constantes, apresentadas na Tabela 4.13.

**Tabela 4.13** - Parâmetros do modelo sigmoidal e coeficientes do fator de translação.

Mistura	$\delta$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	a	b	c
MAC	-3,22	7,78	-2,04	0,38	0,000971	-0,16	2,83
MAB-R30	-3,24	7,75	-2,08	0,35	0,0003262	-0,13	2,43

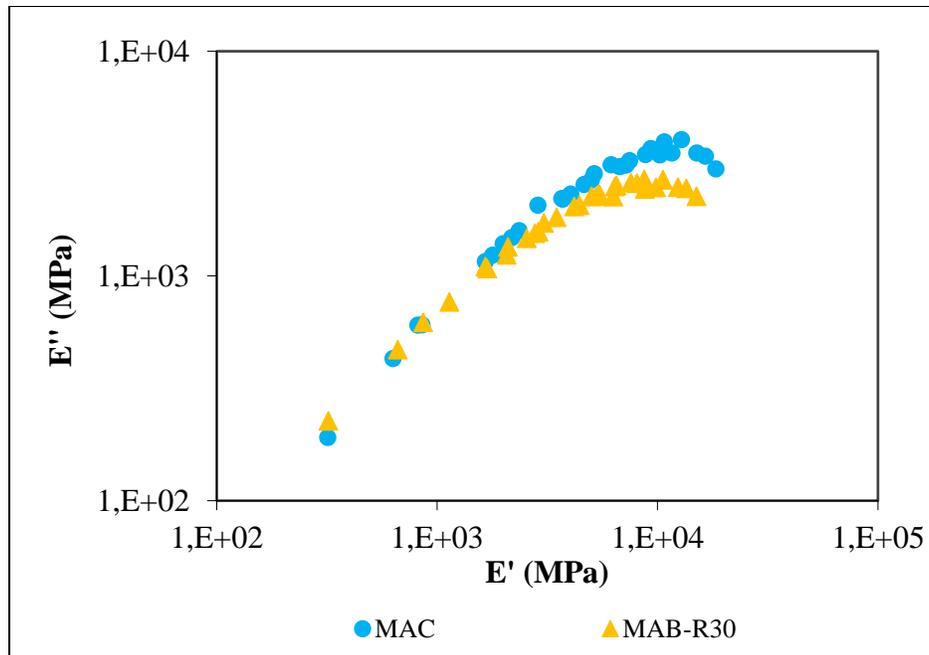
Ao analisar os parâmetros do modelo sigmoidal  $\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , obtidos para as misturas MAC e MAB-R30, nota-se que houve pouquíssima diferença entre os valores encontrados. Sotil (2005) *apud* Mello (2008) descreve que o comportamento de  $\delta$  e  $\alpha$  dependem da granulometria, da quantidade de ligante e de vazios na amostra e os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  estão relacionados com as características do ligante e com a magnitude de  $\delta$  e  $\alpha$ . Desta forma, o observado na Tabela 4.13 é esperado pois na produção das misturas estudadas foram utilizados os mesmos materiais, e as propriedades físicas ( $V_v$ , VAM, RBV) obtidas na dosagem e reprodução das amostras são similares.



**Figura 4.20** – Diagrama de espaço Black das misturas MAC e MAB-R30.

Ao se analisar a Figura 4.20 que mostra a caracterização LVE no digrama de espaço Black para as misturas é possível verificar a influência da adição de RAR. Se observarmos, para um mesmo valor de módulo dinâmico (rigidez) a mistura MAB-R30 tende a apresentar menor valor de ângulo de fase.

Procurando investigar com mais clareza a influência da RAR no comportamento da mistura, sob a perspectiva do ângulo de fase, na Figura 4.21 é apresentado o plano Cole-Cole para MAC e MAB-R30. O diagrama Cole-Cole, assim como o espaço Black permite conferir a qualidade dos resultados, além disso, analisar a resposta do módulo de armazenamento ( $E'$ , associado ao comportamento elástico) e módulo de dissipação ( $E''$ , associado ao comportamento viscoso).



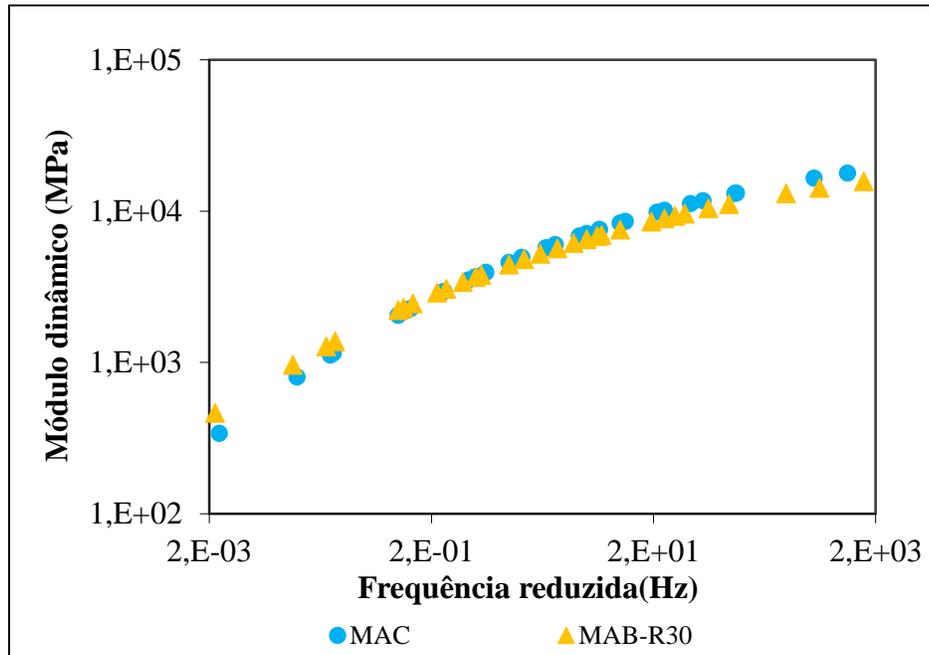
**Figura 4.21** - Plano Cole-Cole para as misturas MAC e MAB-R30.

Analisando o plano Cole-Cole na Figura 4.21, percebe-se que de fato, o comportamento da componente elástica ( $E'$ , eixo das abcissas) para MAC e MAB-R30 são semelhantes pois atingem a mesma gama de valores nas temperaturas ensaiadas. Observa-se que na temperatura mais alta ensaiada (35°C, valores à esquerda na Figura 4.21) as curvas se sobrepõem, significando que não há discrepância entre os valores de  $E'$  e  $E''$  e as respostas das misturas às solicitações feitas no ensaio são sustentadas esqueleto mineral.

Ainda sobre a Figura 4.21, em temperaturas intermediárias até a menor temperatura do ensaio (20 a 5°C) percebe-se diferença no comportamento dos valores de  $E''$ , ou seja, da componente viscosa ou módulo de dissipação. Neste sentido, a mistura MAC apresenta maiores valores de  $E''$  com relação à mistura MAB-R30. Em outras palavras, significa dizer que devido aos menores valores de  $E''$  apresentados pela mistura MAB-R30, esta terá redução do comportamento viscoso, ou seja, responde às solicitações de carregamento de maneira mais tênue e com maior capacidade de retorno às condições iniciais do estado anterior à solicitação.

Além destas conclusões, observando-se a Figura 4.22, pode-se afirmar que com relação ao comportamento do módulo dinâmico das misturas MAC e MAB-R30 este foi pouco afetado pela adição de RAR. É fácil perceber tal afirmação quando observamos os valores obtidos na Tabela

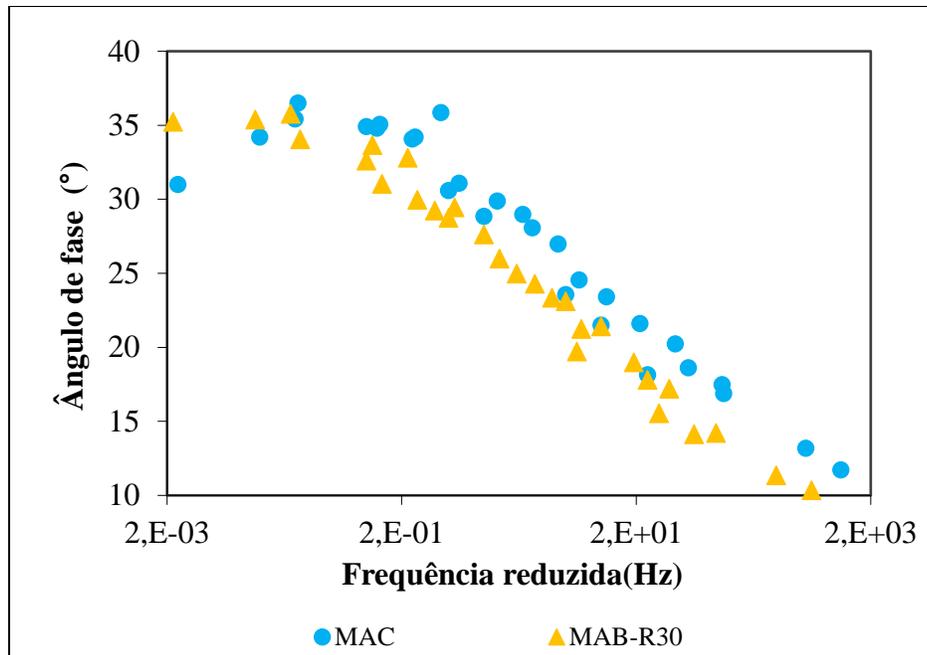
4.13 e a quase sobreposição das curvas mestras de módulo dinâmico para MAC e MAB-R30. Isto significa que a rigidez da mistura está sendo comandada em grande parte pelo esqueleto mineral na faixa de temperaturas testadas, não sofrendo influência direta do tipo de ligante.



**Figura 4.22** - Curva mestra do módulo dinâmico ( $E^*$ ) para as misturas MAC e MAB-R30 para a temperatura de 20°C.

A Figura 4.23 apresenta a curva mestra do ângulo de fase para MAC e MAB-R30. Percebe-se que os valores de  $\phi$  foram pouco afetados pela adição de RAR na mistura, apresentando a tendência de diminuição. Diferentemente do comportamento observado nos ligantes CAP 50/70 e AB-R30 (Figura 4.4 e Figura 4.5) em que a adição de RAR é significativa em termos de ângulo de fase e módulo cisalhante dinâmico.

Importa mencionar que devido ao alto teor de ligante das misturas estudadas (6,7% e 8,0% para MAC e MAB-R30, respectivamente) não foram conduzidos ensaios para caracterização LVE em temperaturas maiores que 35°C. Uma vez que o ensaio ocorre sob compressão e sem confinamento, designou-se a temperatura de 35°C como a temperatura limite.



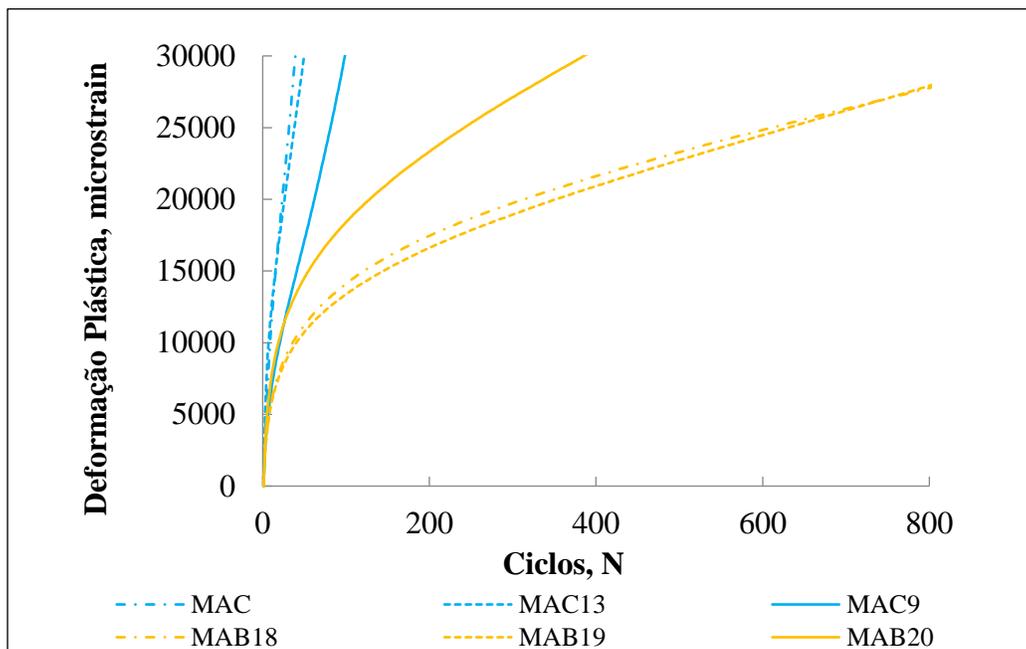
**Figura 4.23** - Curva mestra do ângulo de fase ( $\varphi$ ) para as misturas MAC e MAB-R30 para a temperatura de 20°C.

#### 4.7.4 Ensaio uniaxial de carga repetida – *flow number*

O ensaio uniaxial de carga repetida foi realizado conforme a normativa DNIT 184/2018 – ME, de acordo com o descrito no item 3.8.4. Nenhuma das misturas estudadas alcançou o limite de encerramento do ensaio segundo a norma, portanto atingiram o FN antes dos 7.200 ciclos. As curvas de deformação plástica decorrentes dos ensaios realizados foram elaboradas ajustando os resultados dos CPs ao modelo Francken e são apresentadas na Figura 4.24. O resumo dos resultados dos valores de FN entre amostras da mesma mistura e entre as misturas MAC e MAB-R30 podem ser conferidos na Figura 4.25.

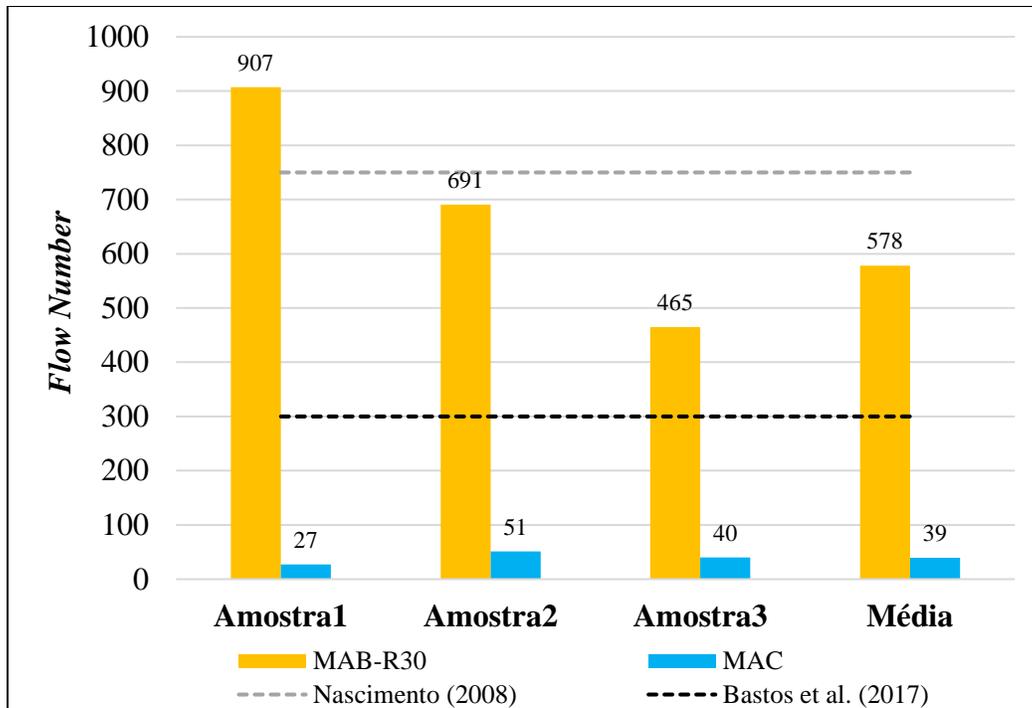
Antes de fazer qualquer colocação sobre valores de FN estipulados em normas, encontrados na literatura e os resultados atingidos neste trabalho, é preciso destacar que de uma forma geral, a adição de RAR contribui consideravelmente para a resistência à deformação permanente da mistura. Ao se estabelecer o ensaio de FN para determinar o comportamento das misturas com relação à deformação permanente, pesquisou-se sobre as especificações e metodologias adotadas quanto a este ensaio, em misturas modificadas com borracha e misturas modificadas com RAR. Para as misturas AB modificadas com BMP, Kaloush *et al.* (2002) recomendam que em

granulometrias descontínuas do tipo *gap-graded*, ensaios não confinados em amostras com 7% de Vv sejam conduzidos a 37,7°C e com uma tensão de 600kPa. Shah (2018) realizou o ensaio FN em amostras não confinadas em misturas descontínuas modificadas com RAR e BMP, adotando a temperatura de 50°C e o nível de tensão de 400kPa. Uma vez que não existe um consenso em se tratando de misturas AB, decidiu-se por realizar o ensaio de FN conforme a normativa brasileira e comparar os resultados obtidos entre outros trabalhos que estudaram o fenômeno da deformação permanente em misturas do tipo *gap-graded* sob a mesma especificação.



**Figura 4.24** - Curvas de deformação plástica versus número de ciclos para cada mistura ensaiada.

Na Figura 4.25, além dos resultados das misturas MAC e MAB-R30, estão representados os valores mínimos de FN estipulados para o tráfego pesado, conforme Nascimento (2008) e Bastos *et al.* (2017). Conforme mostrou a Tabela 2.7, nesta classificação os autores utilizam as mesmas especificações de ensaio adotadas neste trabalho. Sendo assim, para o nível de tráfego pesado, observa-se que de acordo com o critério de Nascimento (2008) os valores médios de FN apresentados por MAC e MAB-R30 não alcançam 750 ciclos. Com relação à classificação realizada por Bastos *et al.* (2017) a mistura MAB-R30 atinge o critério mínimo de 300 ciclos para o FN.



**Figura 4.25** - *Flow number* (FN) obtido entre as amostras e valores médio para as misturas MAC e MAB-R30.

Para as curvas mostradas na Figura 4.24 na Tabela 4.14 são apresentados os valores dos coeficientes de ajuste do modelo de Francken.

Beja (2020) explica que o intercepto da função da lei da potência (A), indica como ocorre a densificação inicial da mistura após abertura do tráfego, resulta da reordenação da matriz de agregados. Misturas com maior intercepto de plastificação, são inicialmente mais resistentes ao afundamento plástico. A inclinação na zona secundária (B) pode ser utilizada para prever o aumento constante da deformação da mistura para cada ciclo de carga. Isto pode ser interpretado como a amplitude na vida útil de um pavimento após a deformação permanente sob carga inicial de tráfego e antes do início do fluxo de plástico. Uma mistura com uma declividade maior deveria deformar-se mais rapidamente do que uma mistura com declividade menor. Por fim, os coeficientes C e D se relacionam com a taxa de evolução do cisalhamento plástico na zona terciária, e quão maiores estes, maior suscetibilidade da mistura em propagar o dano até a fluência terminal (afundamento que necessite de recuperação estrutural do pavimento).

**Tabela 4.14 - Flow number segundo o modelo de Francken e seus parâmetros.**

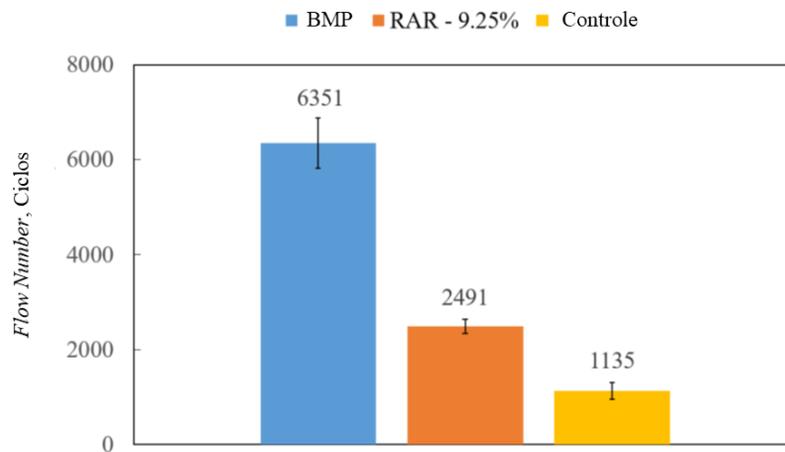
<b>Resultados flow number</b>					
<b>CP</b>	<b>Flow Number, ciclos</b>	<b>Coefficientes do modelo de Francken</b>			
		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>MAC</b>					
MAC	27	2103,70	0,69	417,95	0,0558
MAC-9	51	1729,04	0,55	1078,13	0,0215
MAC-13	40	3322,73	0,54	362,90	0,0433
Média (FN)	39	-	-	-	-
DP (FN)	12,0	-	-	-	-
CV (FN)	30,5	-	-	-	-
<b>MAB-R30</b>					
MAB-R30-18	907	3346,93	0,31	1124,79	0,0013
MAB-R30-19	691	3242,85	0,30	1754,99	0,0015
MAB-R30-20	465	3916,91	0,33	1523,56	0,0025
Média (FN)	578	-	-	-	-
DP (FN)	221,0	-	-	-	-
CV (FN)	38,2	-	-	-	-

Dos resultados dos valores médios de FN mostrados na Tabela 4.14 observa-se estes variaram bastante em torno da média, com coeficiente de variação maiores que 30%. A norma brasileira não estipula um valor máximo de coeficiente de variação para o ensaio. Barros (2017) e Dapper (2020) estudaram misturas descontínuas produzidas com um ligante comercialmente nomeado de ECOFLEX-AB-8. Sob os mesmos critérios de ensaio para o FN que foram utilizados nesta pesquisa, para as misturas usinadas à quente, Barros (2017) obteve valor de FN de 275 (adicionando cal dolomítica) e FN de 437 (adicionando cal calcítica). Já Dapper (2020) obteve FN de 112 para uma mistura descontínua produzida com ECOFLEX-AB-8 sem adição de fíler. As autoras encontraram valores de coeficiente de variação entre 11 e 30%.

Shah (2018) obteve bons resultados de FN para as misturas descontínuas modificadas com BMP e RAR, os resultados obtidos pelo autor são mostrados na Figura 4.26. A mistura com RAR ocupou o segundo lugar de desempenho quanto à deformação permanente.

Faccin (2018) estudou o FN de misturas densas aplicadas no estado do Rio Grande do Sul e afirma que quanto ao desempenho à deformação permanente os resultados de FN demonstraram elevada dependência com o tipo de ligante. O autor comenta que encontrou boas correlações entre desempenho de campo e laboratório, com exceção de misturas AB e misturas mornas.

Zhang *et al.* (2013) ressaltam que este parâmetro pode não indicar de forma precisa o comportamento da deformação permanente, sendo um bom parâmetro de comparação em laboratório.

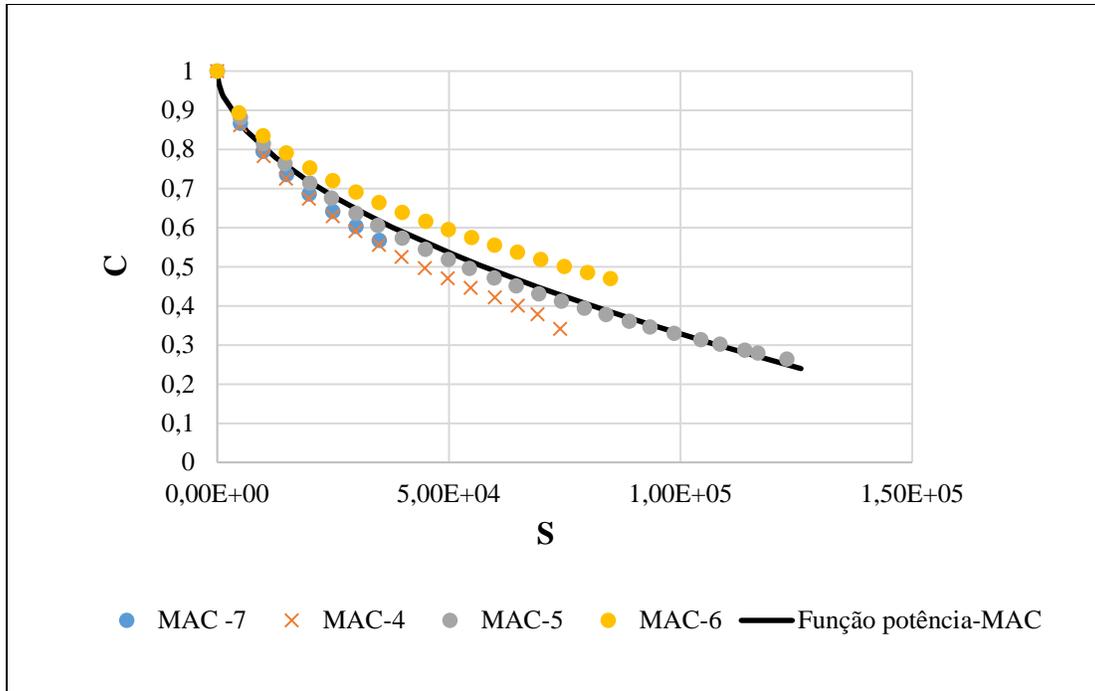


**Figura 4.26** - Resultados de FN para misturas descontínuas (*gap-graded*) com BMP e RAR e mistura de controle (densa) (modificado-Shah, 2018).

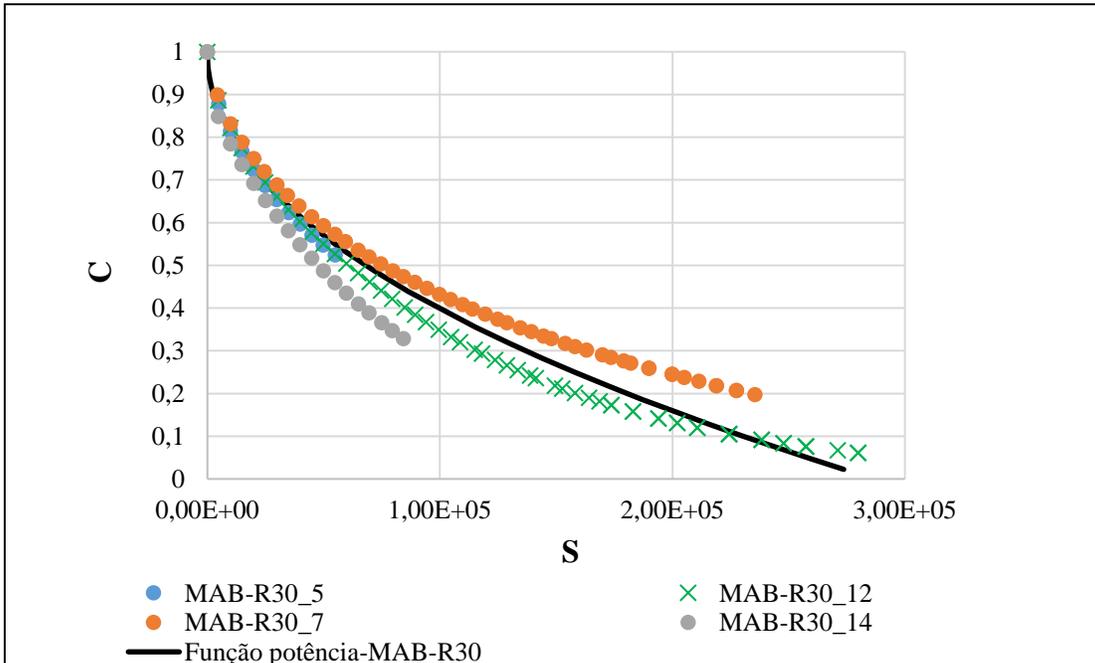
#### 4.7.5 Fadiga uniaxial cíclica (Tração/Compressão)

Os resultados obtidos nos ensaios de fadiga uniaxial cíclica foram processados a partir de uma planilha de cálculo conhecida como FlexMAT. Esta planilha possui todos os direcionamentos necessários para a inclusão dos arquivos de dados obtidos nos ensaios de fadiga T/C.

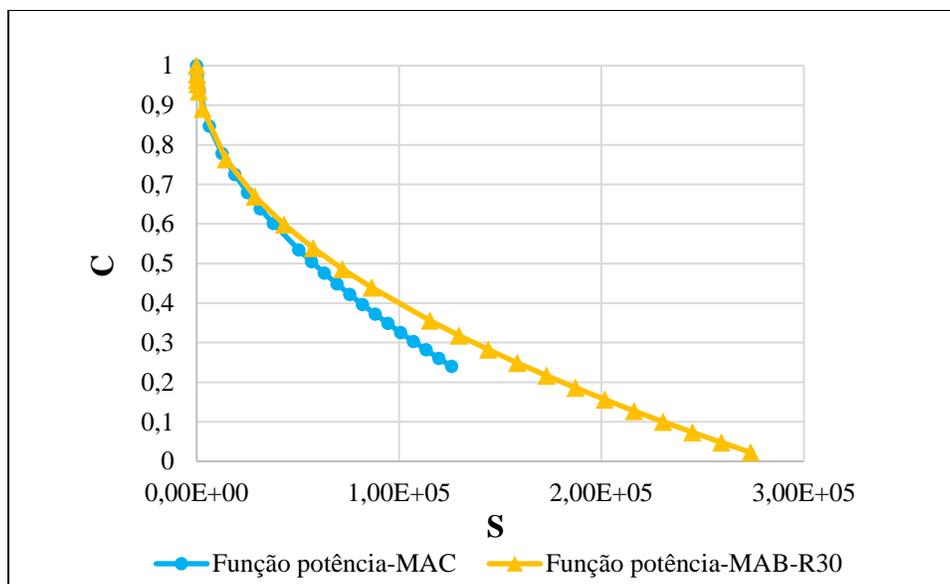
O principal resultado obtido deste ensaio são as curvas características de dano do material e a obtenção desta propriedade permitirá que as demais abordagens sejam feitas dentro do escopo do trabalho. Na Figura 4.27 e na Figura 4.28 são mostradas as curvas características de dano de cada amostra ensaiada para determinar as curvas  $C \times S$  das misturas MAC e MAB-R30. Na Figura 4.29 é apresentada a curva característica de dano ajustada pela função potência para as misturas estudadas.



**Figura 4.27** - Função potência ajustada para quatro amostras ensaiadas da mistura MAC, para a temperatura de 20°C.



**Figura 4.28** - Função potência ajustada para quatro amostras ensaiadas da mistura MAB-R30, para a temperatura de 20°C.



**Figura 4.29** - Curvas características de dano das misturas estudadas para a temperatura de 20°C.

Vale lembrar que para avaliar o desempenho mecânico de um material é essencial que os resultados obtidos a partir dos ensaios laboratoriais sejam aplicados em análises que simulem as condições reais, que possibilitem envolver as solicitações de clima e de tráfego. No entanto, a partir das curvas  $C \times S$  obtidas se faz necessário a realização de algumas considerações com relação ao comportamento da mistura modificada com RAR. Na Tabela 4.15 são mostrados os coeficientes das curvas  $C \times S$  das misturas.

**Tabela 4.15** - Coeficientes do ajuste da função potência para a curva característica de dano  $C \times S$ .

Coeficientes CxS	Mistura	
	MAC	MAB-R30
C11	1,42E-03	2,34E-03
C12	5,35E-01	4,82E-01

Como pode ser visualizado na Figura 4.27, Figura 4.28 e na Figura 4.29 observa-se que para o critério de ruptura da amostra sendo do pico do ângulo de fase, todas as amostras ensaiadas para a mistura MAC rompem quando ainda apresentam um nível de integridade considerável. Como consequência, observa-se que o ajuste da curva característica de dano na função potência para as amostras da mistura MAC mostra que esta mistura rompe no nível de 0,24 de integridade ( $C$ ), tendo acumulado cerca de 1,26E+05 de dano ( $S$ ). Neste mesmo ponto em que a mistura MAC apresenta a ruptura, a mistura MAB-R30 apresenta o nível de 0,32 de integridade enquanto

acumulou  $1,30E+05$  de dano, e segue suportando o acúmulo do dano até a ruptura, com 0,02 de integridade e tendo acumulado  $2,74E+05$  de dano.

É perceptível na Figura 4.29 que enquanto o dano evolui nas misturas MAC e MAB-R30 os valores de  $C$  e  $S$  não são discrepantes. É fácil perceber que a mistura MAB-R30 apresentará maiores valores de integridade em qualquer ponto de acúmulo do dano do que a mistura MAC significando que a adição de RAR retarda o fenômeno da ruptura. Em outras palavras, a ruptura da mistura MAB-R30 ocorre para níveis de acúmulo de dano superiores e isto pode ser observado tanto nos ligantes quanto nas misturas.

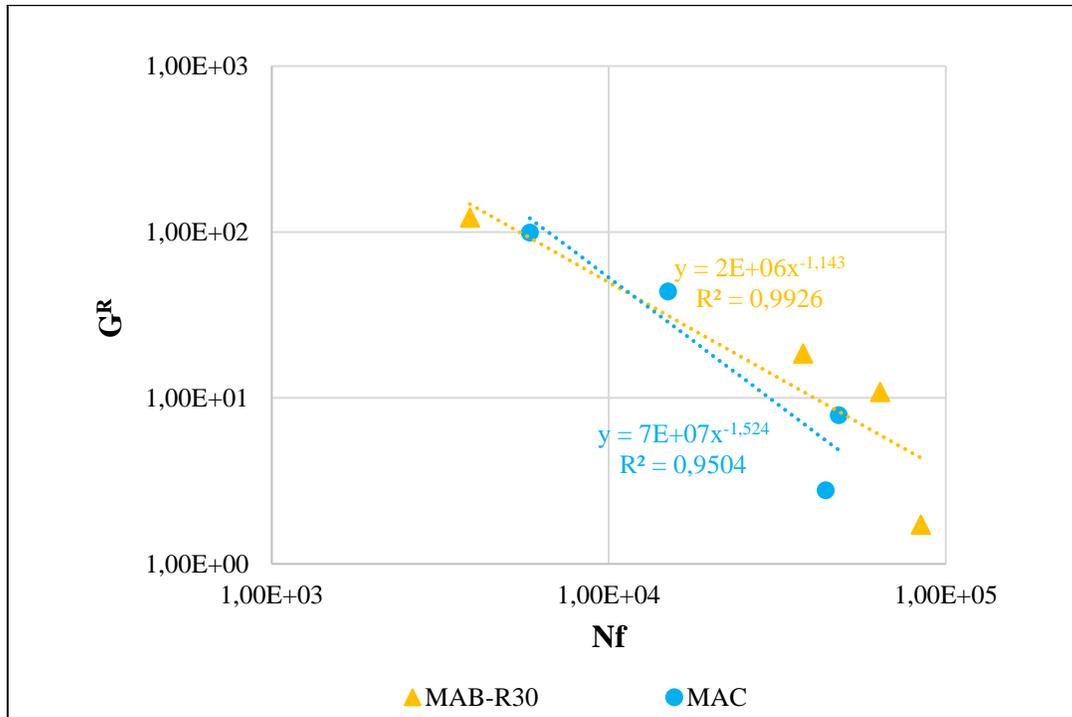
Retomando o que foi observado sobre o comportamento dos ligantes na Figura 4.10, que mostra a evolução do dano no CAP 50/70 e AB-R30 no ensaio LAS, é interessante notar que estas curvas têm comportamento muito parecido com as apresentadas na Figura 4.29. Além disso, é interessante observar a faixa de valores de dano acumulado onde ocorre a ruptura do material. Para o CAP 50/70 o fenômeno ocorre a um nível de acúmulo de dano próximo a 132,3 e para a mistura MAC próximo 126.000. Para o ligante AB-R30 a ruptura ocorre próximo ao nível de dano de 324,2 e na mistura MAB-R30 próximo de 274.000.

Disto isto, a observação do comportamento de evolução do dano sendo analisadas na escala do ligante e na escala da mistura permite concluir que a RAR aumenta a capacidade de suportar a evolução do dano, até certo critério de ruptura definido, cerca de de 2,44 vezes para o ligante e 2,19 vezes para a mistura. Ademais, percebe-se que a relação entre o dano acumulado da razão mistura/ligante é de aproximadamente 1000 vezes.

Além das curvas  $C \times S$ , foram geradas as envoltórias de ruptura tendo por base o parâmetro  $G^R$ . Na Figura 4.30 são apresentadas as envoltórias obtidas para MAC e MAB-R30, em que  $G^R$  é calculado para cada amostra ensaiada segundo a Equação 3.34, e o valor de  $N_f$  é determinado segundo o critério do pico do ângulo de fase. Estas envoltórias funcionam como bom indicativo da uniformidade dos ensaios.

Os valores de  $R^2$  obtidos tanto para MAC quanto MAB-R30 foram suficientemente altos para considerar que as amostras ensaiadas, apesar da variabilidade vista na curva de dano  $C \times S$  apresentaram um ótimo ajuste e forte correlação. Como esperado, observa-se pela envoltória de ruptura que a mistura com RAR apresenta menor inclinação localizada mais acima e mais à direita

significando melhor desempenho à fadiga, ou seja, para um mesmo valor de  $G^R$  maiores valores de  $N_f$  são atingidos. Além das equações do ajuste indicadas na Figura 4.30 que apontam os valores de  $Y$  e  $\Delta$ , a Tabela 4.16 apresenta os valores de  $G^R$  e  $N_f$  para cada amostra.

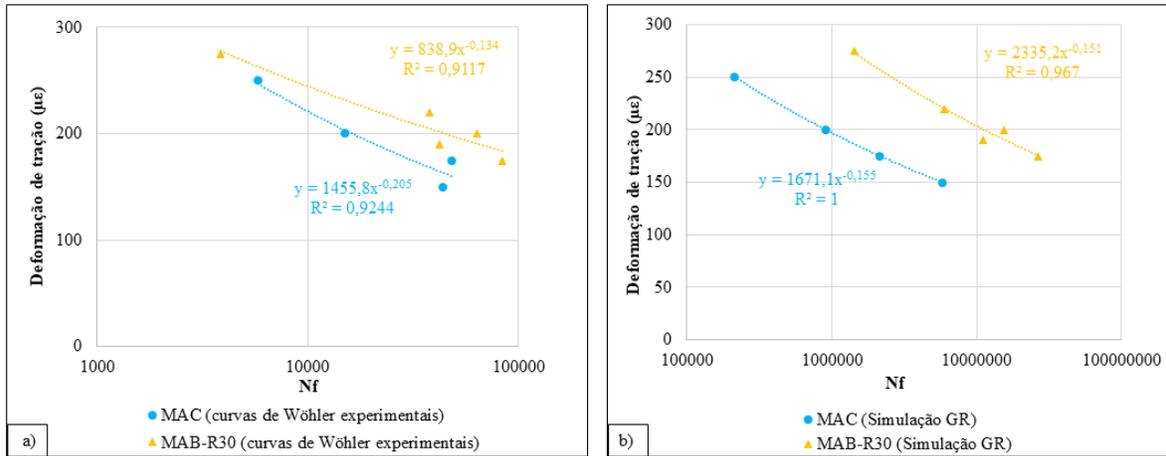


**Figura 4.30** - Envolvórias de ruptura por meio do parâmetro  $G^R$  para as misturas MAC e MAB-R30, ensaiadas a 20°C.

**Tabela 4.16** - Valores de  $G^R$  e  $N_f$  para a construção da envoltória de cada mistura.

MAC					
Amostra	Deformação de tração	$N_f$	$G^R$	$\log(N_f)$	$\log(G^R)$
MAC-7	150	43990	2,769	4,643	0,442
MAC-4	175	48110	7,847	4,682	0,895
MAC-5	200	14990	43,671	4,176	1,640
MAC-6	250	5830	98,932	3,766	1,995
MAB-R30					
Amostra	Deformação de tração	$N_f$	$G^R$	$\log(N_f)$	$\log(G^R)$
MAB-R30_5	175	84250	1,718	4,926	0,235
MAB-R30_12	200	63750	10,851	4,804	1,035
MAB-R30_7	220	37700	18,494	4,576	1,267
MAB-R30_14	275	3870	121,665	3,588	2,085

Uma vez que as curvas  $C \times S$  e as envoltórias de ruptura são uma propriedade característica do material, o uso destas propriedades permite a extrapolação de resultados para além daquelas condições que foram ensaiadas. Na Figura 4.31 são mostradas as curvas de Wöhler para os dados experimentais da mistura MAC e MAB-R30, a sigla  $G^R$  significa que o resultado de  $N_f$  foi previsto conforme a equação proposta por Nascimento (2016) que utiliza os parâmetros da curva  $C \times S$ . Pode ser observado que a mistura MAB-R30 apresenta os melhores desempenhos.



**Figura 4.31** - Comparação entre as curvas de Wöhler dos dados experimentais e os dados de simulação a partir de  $G^R$  para os ensaios realizados a 20°C.

Segundo a metodologia utilizada por Nascimento (2015) para os dados obtidos a partir dos gráficos apresentados na Figura 4.31 foi calculado o Fator de Área de Fadiga (FAF), apresentados na Tabela 4.17. O FAF é o cálculo da área sob a curva de fadiga em espaço log-log e quanto maior o valor do FAF melhor o desempenho à fadiga. Os resultados representados nos gráficos da Figura 4.31 e os valores observados na Tabela 4.17, permitem concluir que como esperado, a mistura MAB-R30 apresenta o melhor desempenho à fadiga. O processo metodológico da equação proposta por Nascimento (2016) para os cálculos das curvas de  $\varepsilon \times N_f$  segundo os parâmetros das curvas  $C \times S$  e os dados de  $N_f$  obtidos para cada deformação se encontram no Apêndice F.

**Tabela 4.17-** Comparação dos FAF para as curvas de fadiga segundo os dados experimentais e segundo a simulação com os dados do modelo S-VECD.

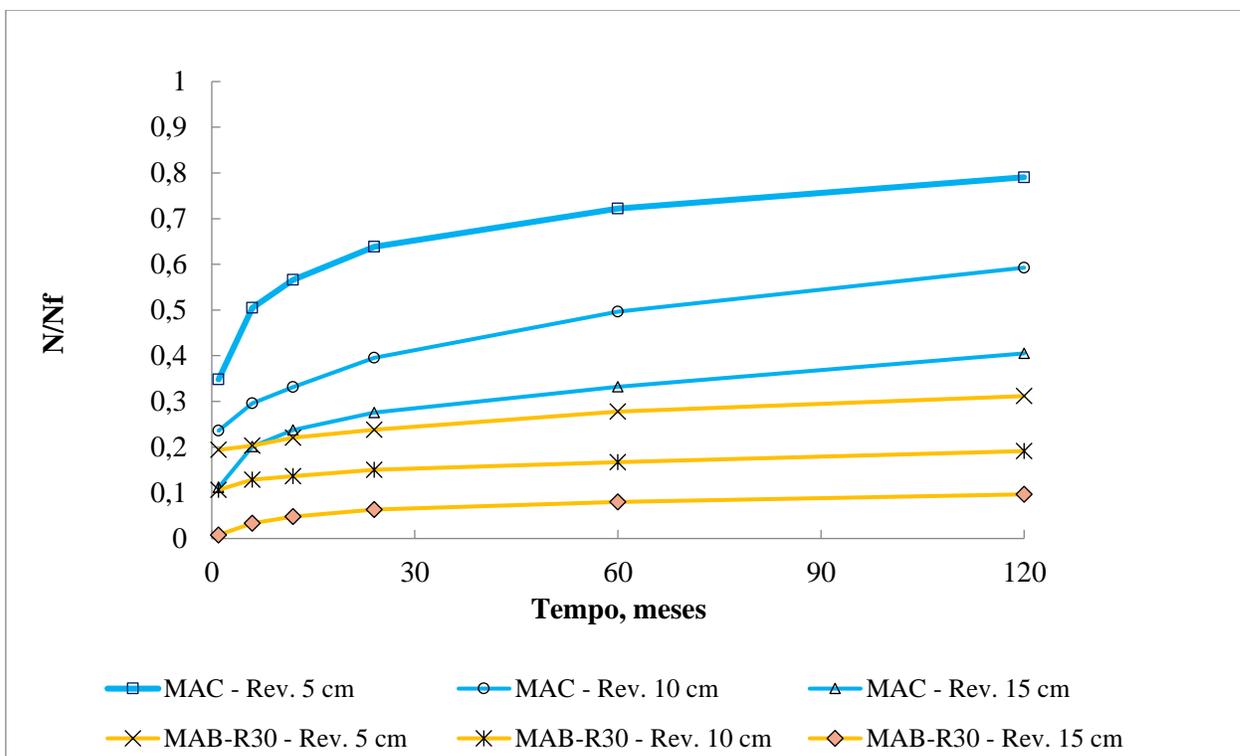
Misutra	FAF Simulação $G^R$	FAF Wöhler exp
MAB-R30	2,89	1,91
MAC	2,46	1,77

#### **4.8 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PAVIMENTO UTILIZANDO O SOFTWARE FlexPAVE 1.1**

Neste item serão apresentados os resultados das análises de desempenho de uma estrutura de pavimento realizadas no programa FlexPAVE™ 1.1. Nascimento (2015) utilizou versões anteriores deste programa para calibrar uma função de transferência entre dano simulado e área trincada em campo para misturas asfálticas brasileiras.

Os materiais empregados na estrutura de pavimento, além dos dados de tráfego e clima foram os mesmos simulados por Schuster (2018) a fim de poder comparar os resultados obtidos para as misturas MAC e MAB-R30 com as respostas obtidas pelo autor. Não foi encontrada na literatura nenhuma referência com resultados de misturas modificadas com RAR simuladas no FlexPAVE™.

Foram simuladas três estruturas variando-se o material do revestimento com espessuras de 5, 10 e 15 cm, sem variação das espessuras e módulos resilientes das camadas granulares. As três estruturas foram submetidas às mesmas solicitações climáticas e de tráfego. A partir destas análises, os resultados são plotados em gráficos que mostram a evolução dos danos médios acumulados ( $N/N_f$ ) na malha de pontos, calculados pela Lei de Miner, com valores variando de 0 (sem dano) a 1 (totalmente danificado), para as misturas MAC e MAB-R30 ao longo do horizonte de projeto, segundo o critério  $G^R$ . Os resultados dos danos médios acumulados são mostrados na Figura 4.32.



**Figura 4.32** - Curvas de dano médio acumulado ao longo do tempo para MAC e MAB-R30 nas três estruturas testadas.

A partir dos resultados apresentados na Figura 4.32 nota-se que em ambas as misturas o acúmulo de dano é maior em camadas com menores espessuras. Esta característica é mais marcante na mistura MAC, em que o dano médio acumulado sofreu maior influência da variação na espessura do revestimento. Os resultados do dano médio acumulado total para cada espessura das misturas MAB-R30 e MAC podem ser observados na Tabela 4.18.

**Tabela 4.18** - Valores de dano médio acumulado ou consumo de vida de fadiga, com 120 meses, para as estruturas simuladas.

Esp. revestimento (cm)	MAB-R30 (N/N <sub>f</sub> )	MAC (N/N <sub>f</sub> )	Relação (%)
5	0,312	0,791	60,6
10	0,191	0,593	67,7
15	0,097	0,405	76,2

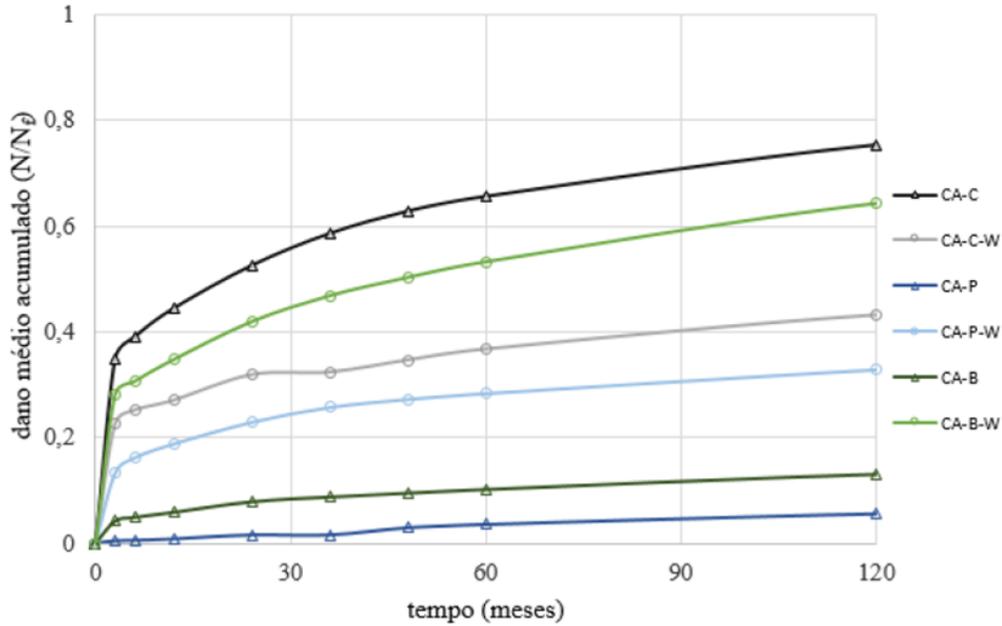
Os valores da Tabela 4.18 apontam que a adição de RAR à mistura, em uma camada esbelta (5 cm), é capaz de proporcionar ótimo desempenho à fadiga, reduzindo em aproximadamente

60% o dano médio acumulado em relação a mesma mistura sem adição de RAR. Além disso, observando-se os valores de  $N/N_f$  apresentados, é possível concluir que seria necessário aplicar mais de 15 cm de espessura da mistura MAC para que o desempenho ao longo do tempo seja próximo a uma camada de revestimento de 5 cm de MAB-R30.

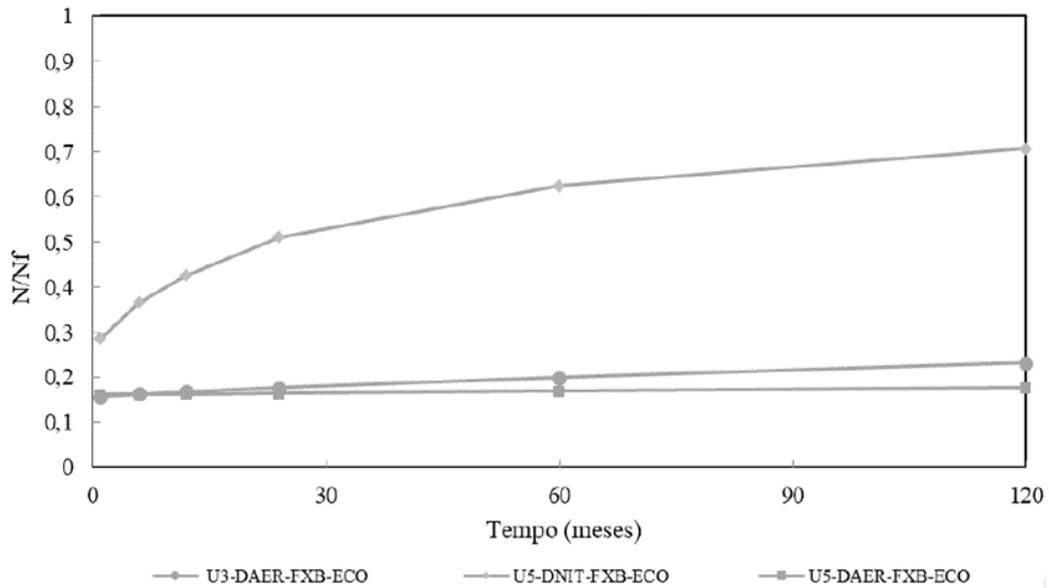
Com relação a misturas modificadas com asfalto borracha, Mocelin (2018) e Schuster (2018) avaliaram o comportamento de misturas produzidas com ECOFLEX-AB-8 no programa FlexPAVE™. Mocelin (2018) analisou o comportamento de  $N/N_f$  em misturas do tipo descontínuas quentes e mornas, produzidas a partir deste ligante, além de misturas convencionais de granulometria densa e modificada por polímero. O autor simulou o dano em uma estrutura de pavimento, com camada de revestimento de 12,5 cm variando-se as misturas aplicadas, utilizando os mesmos dados de clima que foram utilizados por Schuster (2018), além dos dados de tráfego e estrutura serem bastante similares. Schuster (2018) analisou o desempenho de misturas densas produzidas com o ligante ECOFLEX-AB-8 aplicadas em uma camada de revestimento com 5 cm de espessura. Os resultados de Mocelin (2018) e Schuster (2018) são apresentados na Figura 4.33 e Figura 4.34, respectivamente. Pode-se afirmar que os resultados de  $N/N_f$  obtidos para a mistura MAB-R30 se encontram na mesma faixa de valores obtidos por estes autores, condizendo com o comportamento ao dano por fadiga de misturas AB.

Como pode ser observado na Figura 4.33 Mocelin (2018) comenta que a mistura descontínua do tipo *gap-graded* modificada com borracha (CA-B) apresentou o segundo melhor desempenho, sendo superada pela mistura modificada por polímero (CA-P).

Schuster (2018) afirma que entre as misturas estudadas aquelas produzidas com ligantes modificados apresentam melhor comportamento frente ao dano por fadiga, sendo que no ranking elaborado pelo autor, duas das misturas produzidas com ECOFLEX-AB-8 ocupam o segundo e terceiro lugar com relação ao nível de dano. Estas misturas são a U5-DAER-FXC-ECO e U3-DAER-FXB-ECO, mostradas na Figura 4.34.



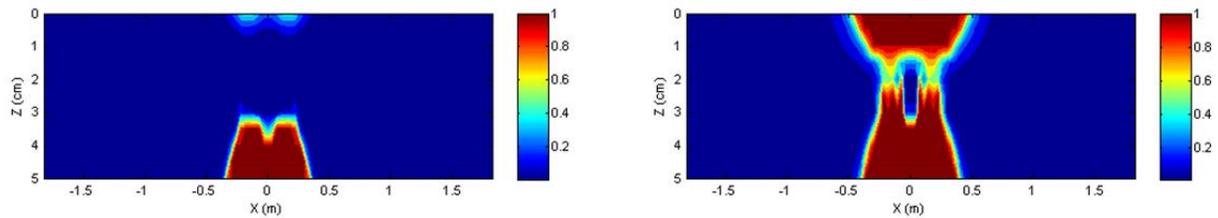
**Figura 4.33** - Dano médio acumulado para misturas estudadas por Mocelin (2018). CA-B é a mistura descontínua produzida à quente com ECOFLEX-AB-8.



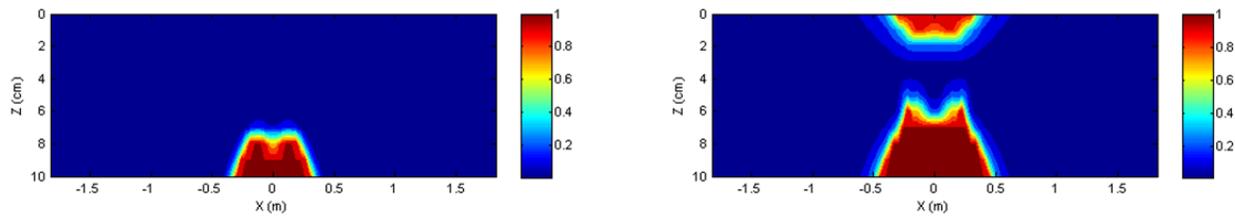
**Figura 4.34** - Dano médio acumulado para misturas densas produzidas com ECOFLEX-AB-8 analisadas por Schuster (2018).

Além dos resultados que mostram o consumo de vida de fadiga ao longo do tempo, o programa FlexPAVE™ permite que sejam exportados os gráficos de contorno. Nestes gráficos a

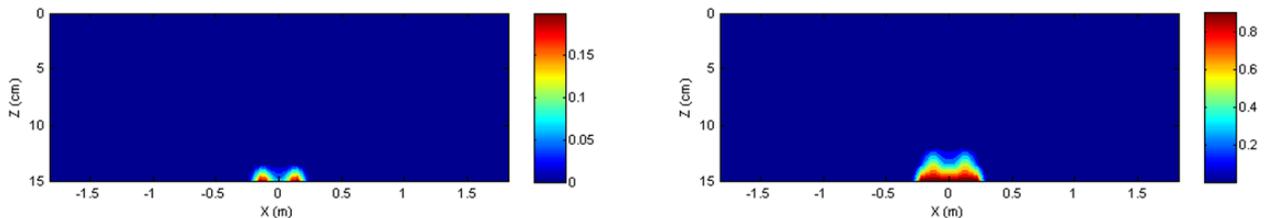
escala de cores representa o dano limitado entre 0 e 1 ao longo da espessura da camada de revestimento. O centro do perfil é onde está centralizado o rodado de dois pneus com carga de 40 kN. Nas Figuras Figura 4.35, Figura 4.36 e Figura 4.37 são mostradas as imagens de contorno de dano para a mistura MAC nas três espessuras simuladas para o tempo de 1 mês (tempo inicial de projeto) e 120 meses (fim dos 10 anos de projeto). Para as mesmas situações de espessura e tempo de projeto são mostradas nas Figuras Figura 4.38, Figura 4.39 e Figura 4.40 as imagens de contorno de dano para a mistura MAB-R30.



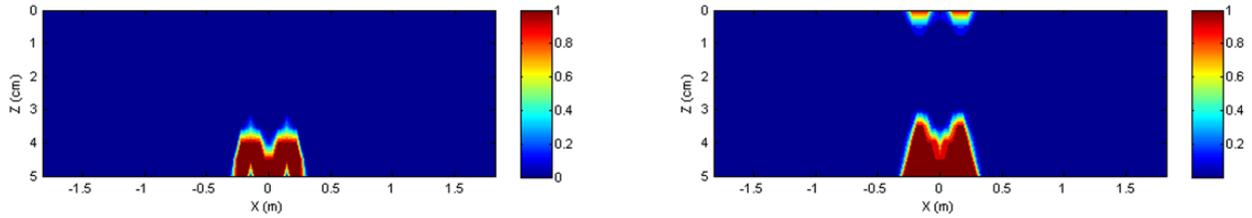
**Figura 4.35** - Dano médio acumulado na camada de revestimento da mistura MAC com 5 cm de espessura com 1 mês (à esquerda) e com 120 meses (à direita).



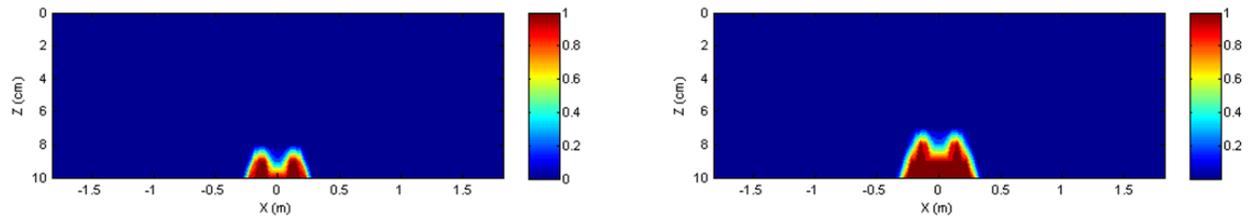
**Figura 4.36** - Dano médio acumulado na camada de revestimento da mistura MAC com 10 cm de espessura com 1 mês (à esquerda) e com 120 meses (à direita).



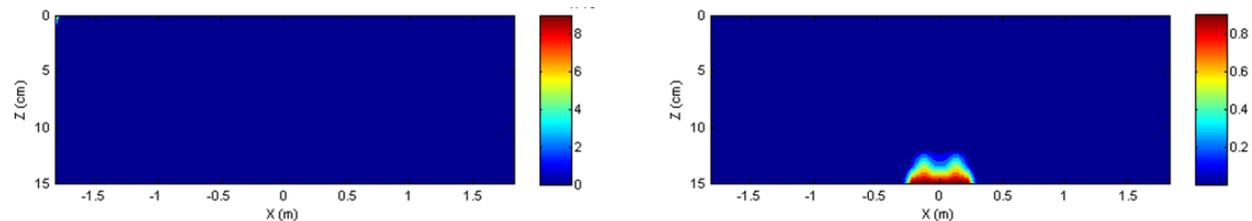
**Figura 4.37** - Dano médio acumulado na camada de revestimento da mistura MAC com 15 cm de espessura com 1 mês (à esquerda) e com 120 meses (à direita).



**Figura 4.38** - Dano médio acumulado na camada de revestimento da mistura MAB-R30 com 5 cm de espessura com 1 mês (à esquerda) e com 120 meses (à direita).



**Figura 4.39** - Dano médio acumulado na camada de revestimento da mistura MAB-R30 com 10 cm de espessura com 1 mês (à esquerda) e com 120 meses (à direita).



**Figura 4.40** - Dano médio acumulado na camada de revestimento da mistura MAB-R30 com 15 cm de espessura com 1 mês (à esquerda) e com 120 meses (à direita).

Como comenta Mocelin (2018), os gráficos de contorno permitem uma melhor visualização da forma como o dano ocorre ao longo da camada, permitindo análises que as demais formas de representação dos resultados não permitem, como por exemplo a previsão do local onde a trinca ocorrerá em uma determinada estrutura. Na espessura de 5 cm, a mistura MAC apresenta início de trincamento de cima para baixo já no primeiro mês e o fenômeno de dano é bastante agravado com o passar do tempo. Ao final da vida útil, o revestimento apresenta trincas na parte inferior e na parte superior, muito provavelmente acometendo o restante da estrutura. Para a mistura MAC o surgimento de trincas na parte superior e inferior do revestimento só é solucionado para 10 anos de projeto com a aplicação de 15 cm dessa mistura na estrutura proposta. Pela previsão do

programa, este tipo de trincamento também irá aparecer na mistura MAB-R30, porém apenas no fim da vida útil quando a camada de revestimento for de 5 cm.

Outra característica que se manifesta de forma diferente nas misturas e é notável nos gráficos de contorno, comparando-se as espessuras de 5 e 10 cm, é o formato da área de distribuição do dano logo abaixo da roda, com a mistura MAC apresentando maiores formatos de áreas danificadas.

A análise da Figura 4.38, Figura 4.39 e Figura 4.40 permitem concluir que a aplicação da mistura MAB-R30 tende a estabilizar a evolução do dano para o tempo de vida útil de 10 anos na estrutura proposta, sendo que uma camada de 5 cm aplicada no revestimento atende de maneira eficiente às solicitações por fadiga na estrutura.

### 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A presente pesquisa tem caráter inovador contribuindo com o estudo a respeito do material RAR e sua forma de ação como um modificador de um ligante convencional, largamente utilizado no Brasil, e de uma mistura asfáltica de granulometria descontínua. Foi demonstrada a eficiência da RAR em agregar melhorias nas propriedades reológicas (módulo dinâmico e ângulo de fase), no comportamento quanto ao trincamento por fadiga e deformação permanente acumulada na escala ligante e na escala mistura. Além disso, este trabalho teve como um importante subproduto a implementação do ensaio de fadiga uniaxial cíclico (tração/compressão) no INFRALAB, utilizando os resultados obtidos no modelo *Simplified-Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD) e no programa FlexPAVE™.

Diante dos assuntos abordados, este capítulo apresenta as principais conclusões sobre a ação da RAR na escala do ligante e na escala da mistura. Ademais busca-se sugerir o avanço em pesquisas futuras que complementarão o conhecimento adquirido neste trabalho.

#### 5.1 CARACTERIZAÇÃO CONVENCIONAL, REOLÓGICA E DESEMPENHO MECÂNICO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

- As modificações do CAP 50/70 com adição de 30% de RAR resultaram em aumento do ponto de amolecimento, da viscosidade rotacional e da densidade, além de redução da penetração. Tais características são comumente esperadas em ligantes modificados com polímeros e borracha. Além destas propriedades, a modificação aumentou o grau de desempenho do ligante em relação à alta temperatura passando do PG 58-XX para PG 70-XX;
- Os dados reológicos obtidos no DSR mostraram ser termorreologicamente simples, apresentando linhas de tendência e distribuição suave no diagrama de espaço Black. Os ligantes envelhecidos apresentaram maiores valores de rigidez ( $|G^*|$ ) do que os ligantes virgens, principalmente em frequências mais baixas. A diminuição da inclinação da curva mestre do ligante modificado AB-R30 representa menor dependência da frequência/temperatura, em decorrência da modificação por RAR.

Além disso, a adição de RAR tornou o CAP 50/70 mais rígido e diminuiu os valores do ângulo de fase, aumentando a parcela elástica do ligante modificado;

- A adição de RAR melhorou as respostas do ligante puro à deformação permanente e fadiga, como mostraram os resultados dos ensaios MSCR e LAS, respectivamente. Com relação à deformação permanente a adição de RAR aumentou os valores da recuperação elástica e diminuiu os valores da compliância não-recuperável ( $J_{nr}$ ) aumentando a resistência ao acúmulo de deformações permanente e os níveis de classificação de tráfego em todas as temperaturas. O ensaio LAS mostrou que o AB-R30 é capaz de acumular maior nível de dano na ruptura que o CAP 50/70, e dessa forma apresenta melhor tolerância à fadiga.

## 5.2 CARATERIZAÇÃO QUÍMICA DA RAR

Diante da heterogeneidade da composição da RAR, envolvendo a complexidade em matéria orgânica do CAP e da BMP, além da matéria inorgânica presente em seu fíler, os resultados obtidos nas técnicas empregadas não foram suficientes para estabelecer conclusões definitivas sobre a RAR. Os resultados das técnicas químicas realizadas confirmam as informações fornecidas pelo fabricante, as quais pode-se complementar com os seguintes comentários:

- Os resultados quantitativos da fluorescência de raio X mostraram que grande parte do material que a compõem é o óxido de cálcio (CaO), sendo este elemento inorgânico o principal componente do fíler da RAR;
- A análise térmica gravimétrica apontou para duas temperaturas de degradação na RAR atribuídas à presença de borracha natural e polímeros;
- A calorimetria exploratória diferencial aponta para a transição vítrea da RAR próxima à da borracha natural e alterações do comportamento termodinâmico que indicam a fusão do CAP e outros polímeros presentes em sua composição.

## 5.3 TEOR DE PROJETO PARA AS MISTURAS PROPOSTAS

- O teor de projeto de ligante asfáltico de 6,7 % para MAC e 8,0 % para MAB-R30 permitem que as misturas apresentem  $V_v$  de 4,5 %, como estabelecido, além de outras propriedades volumétricas apreciadas durante a dosagem dentro das faixas estabelecidas. Os teores determinados se encontram dentro da faixa esperada para o tipo de

granulometria empregada. Além disso, os parâmetros volumétricos obtidos para MAB-R30 correspondem ao esperado para uma mistura AB;

- A espessura do filme de ligante,  $TF$ , nos teores estabelecidos como teores de projeto para as misturas asfálticas, MAC e MAB-R30, apresentaram valores acima do mínimo especificado por pesquisas anteriores em misturas descontínuas com e sem o uso de RAR, o que poderá minimizar a ocorrência de trincas e descolamento de agregado;
- A partir do teor de projeto definido para as misturas, a adição de RAR diminuiu consideravelmente o valor de perda de massa ou escorrimento no momento de produção e transporte. Além de diminuir o escorrimento com relação à mistura MAC, para a mistura MAB-R30, considerando o tempo do ensaio, foi notado que na temperatura mais elevada (180°C) houve diminuição do escorrimento. Tal fato é atribuído ao tempo de digestão das partículas de borracha, ou ativação da RAR na mistura pela combinação da alta temperatura e do tempo demandado no ensaio de escorrimento, ambos acontecimentos contribuindo com o aumento da viscosidade do ligante.

#### 5.4 DESEMPENHO MECÂNICO DAS MISTURAS

- As misturas MAC e MAB-R30 atenderam ao critério da metodologia Superpave com respeito ao valor de RRT superior a 80%. Os resultados mostraram que a cal presente na RAR, na mistura MAB-R30 contribuiu para a adesividade e a manutenção ou aumento da resistência ao dano por umidade;
- A mistura MAB-R30 apresenta menor perda de massa, em média, o que significa que a adição de RAR diminuiu a tendência ao desgaste. A mistura MAB-R30 apresentou valor de desgaste compatível com misturas produzidas com RAR de acordo com os dados da bibliografia, e a mistura MAC, devido ao valor elevado do teor de ligante, apresenta resultados razoáveis de desgaste;
- Na caracterização reológica das misturas pode-se concluir que a adição de RAR não provocou grandes alterações com relação ao comportamento do módulo dinâmico, significando que a rigidez das misturas está sendo comandada em grande parte pelo esqueleto mineral, na faixa de temperaturas testadas. Em compensação, percebe-se diferença no comportamento do módulo de dissipação  $E''$ , representado no plano Cole-Cole. Como a mistura MAB-R30 apresenta menores valores de  $E''$ , responderá às

solicitações de carregamento de maneira mais equilibrada e com maior capacidade de retorno às condições iniciais do estado anterior à solicitação;

- Assim como ocorre na modificação do ligante CAP 50/70, a adição de RAR contribui consideravelmente para a resistência à deformação permanente apresentando valores médios de FN de 39 na mistura MAC e 539 para MAB-R30. De acordo com o observado na literatura, tais resultados desclassificam o emprego destas misturas em níveis de tráfego pesado e extremamente pesado. No entanto, a título de comparação entre os resultados experimentais das misturas produzidas em laboratório e com os dados ajustados ao modelo de Francken, conclui-se que a RAR agrega melhoria ao desempenho quanto à deformação permanente;

Quanto à metodologia do ensaio de fadiga uniaxial cíclica T/C:

- Conclui-se sobre a efetividade dos acessórios, como os pratos de topo e base para fixação da amostra e do gabarito para o processo de colagem, utilizando a cola Vedacit Tixotrópica. As amostras apresentaram ruptura dentro da faixa de leitura dos LVDTs, sem que a ancoragem fosse desfeita.

Quanto aos resultados do ensaio de fadiga uniaxial cíclica T/C e as análises:

- Para o critério de ruptura da amostra sendo do pico do ângulo de fase, foi possível observar nas curvas características de dano  $C \times S$  que todas as amostras ensaiadas para a mistura MAC rompem quando ainda apresentam um nível de integridade considerável. Além disso, obteve-se coeficientes do ajuste da função potência  $C_{11}$  e  $C_{12}$  muito similares para as misturas MAC e MAB-R30, que até certo nível de dano acumulado é mostrado pela sobreposição das curvas. No entanto, a ruptura das amostras ensaiadas para a mistura MAB-R30 ocorre para níveis de acúmulo de dano superiores e este fato também foi observado nos ligantes;
- As curvas de Wöhler plotadas para os dados  $N_f \times \mu\epsilon$  obtidos experimentalmente apresentaram bons resultados de previsibilidade do parâmetro  $G^R$ . Além disso, as envoltórias de ruptura tendo traçadas no gráfico  $G^R \times N_f$  apresentaram bom coeficiente de correlação ( $R^2$ ) o que indica uma boa uniformidade dos ensaios;

- As análises dos dados de dano médio acumulado ao longo do tempo obtidos pelo programa FlexPAVE™ mostraram que para a mistura MAB-R30 a espessura da camada de revestimento tem menor influência na resposta da estrutura ao consumo de vida de fadiga. A partir da análise dos gráficos de contorno conclui-se que para evitar o surgimento de trincas na parte superior e inferior do revestimento deve-se aplicar 15 cm de espessura da mistura MAC contra 5 cm da mistura MAB-R30. Sendo que neste último, este tipo de manifestação ocorrerá apenas no fim da vida útil do pavimento.

## 5.5 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com as considerações realizadas ficam claras as vantagens obtidas em se utilizar a RAR na produção de misturas AB. A sua utilização, a partir de requisitos mínimos no tocante ao tempo de digestão ou reação do material, é capaz de produzir um concreto asfáltico que mantém o desempenho obtido pelas misturas produzidas por via úmida (*field blend*) sem a necessidade de equipamentos muito específicos ou a alteração de uma planta de produção de mistura asfáltica.

Embora misturas de granulometria descontínua sejam amplamente empregadas na produção de misturas AB não é comum o emprego deste tipo de mistura em rodovias brasileiras. Desta forma, é necessário que o estudo realizado com a aplicação da RAR seja abrangido para uma mistura de granulometria densa, produzida a partir de um ligante convencional. O emprego de misturas mais comuns permitirá que sejam realizados avançados nos estudos da relação campo-laboratório, aproximando o estado da técnica ao estado da prática.

Para a análise do desempenho quanto à deformação permanente de forma mais realista para as misturas é indicado que os ensaios ocorram no simulador de tráfego em laboratório. Atualmente, está disponível no INFRALAB o equipamento *Double Wheel Tracker* (DWT) que permite a avaliação das deformações plásticas nas condições de ambiente seco e úmido, tanto em placas quanto em amostras cilíndricas de misturas moldadas no compactador Superpave.

Com relação ao ensaio de fadiga uniaxial cíclica (T/C) o protocolo de ensaio implementado associado ao programa que utiliza os dados calibrados no modelo S-VECD são ferramentas poderosas quanto à classificação das misturas no desempenho à fadiga. A parte experimental se torna mais efetiva, demandando menor quantidade de amostras e menos tempo de ensaio, ao mesmo tempo em que se obtém dados para uma formulação robusta na análise da fadiga. Neste

sentido é recomendado que este ensaio seja amplamente aplicado nas misturas desenvolvidas no INFRALAB.

Além disso, uma vez que a RAR vem sendo utilizada para além dos benefícios a cerca do desempenho de misturas asfálticas, também como um material que oferece melhores condições ambientais na obtenção de misturas afalto-borracha, recomenda-se a aplicação da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para o levantamento da quantidade de emissão de gases do efeito estufa (GEE), a fim de se avaliar o desempenho ambiental dos materiais e processos envolvidos no desenvolvimento das misturas estudadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (2013) *T-166 - Bulk specific gravity of compacted asphalt mixtures using saturated surface-dry specimens*.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (2014) *TP-101 - Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep*.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (2014) *TP-107 (Provisional Standard). Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests*. Washington, D.C., 2014.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (2017). *Determining the dynamic modulus and flow number for asphalt mixtures using Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) T 378*. p. 1-20.
- Airey, G., Rahman, M. & Collop, A. (2003). Absorption of bitumen into crumb rubber using the basket drainage method. *The International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 4, nº 2, p. 105-119.
- Alsaad, N.; Mahadi, V.; Richards & Kaloush, K. (2018). Reacted and Activated Rubber (RAR) PG64-22 Binder Study. *Rubberized Asphalt Rubber 2018 - Proceedings*, Kruger National Park, South Africa: 367-381.
- 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.
- Asphalt Institute (2007). *The Asphalt Handbook*. MS-4 Seventh Edition. USA. 788p.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), (2007) *C 127 – Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), (2009) *C 128 – Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregates*.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), (2013) *C 1252 – Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate as Influenced by Particle Shape, Surface Texture and Grading*.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), (2011) *D 2041 – Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*.

- American Society for Testing and Materials (ASTM), (2009) *D 2419 – Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate*.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), (2012) *D 2872 - Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (RollingThin-Film Oven Test)*.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), (2015) *D 4402 – Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), (2010) *D 4791 – Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate*.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), (2009) *D 6114 – Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder. American Society for Testing Materials*.
- Babadopulos, L. F. D. A. L. (2014). A contribution to couple aging to hot mix asphalt (HMA) mechanical characterization under load-induced damage. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 139 fl.
- Babadopulos, L. (2017). Phenomena occurring during cyclic loading and fatigue tests on bituminous materials: Identification and quantification (Doctoral dissertation, Lyon). ENTPE, Lyon.
- Bahia H. U., Hanson, D. I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M. A. e Anderson, M.R. (2001) NCHRP Report 459, Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design. Prepared for the Naional Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C.
- Bahia, H. U., Golalipour, A., Coenen, A.R. (2012). Comparing Effects of Crumb Rubber and Synthetic Polymers on Hot Mix Asphalt Performance. Asphalt Rubber 2012 – Proceedings, Munich, Germany, 2012, p. 183-1.
- Bastos, J. B. S.; Soares, J. B.; Nascimento, L. A. H. Critérios para os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida de misturas asfálticas em laboratório a partir do desempenho em campo. Transportes, vol. 25, nº. 2, p.29-40, 2017.
- Barros, L. M. D. (2017). Deformação permanente de misturas asfálticas: avaliação do desempenho conforme critério de flow number de misturas quentes e mornas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 179 p.
- Beja, I. A.; Florencio, H. A.; Chaves, J. M.; Vasconcelos, K. L.; Bernucci, L. B.; (2015). Large Stone Asphalt Mixture (25mm) - avaliação do procedimento de dosagem. In: XVIII Congresso Ibero Latinoamericano de Asfalto, Bariloche. Anais do XVIII Congresso Ibero Latinoamericano de Asfalto.

- Beja, I.A. (2020). Avaliação do comportamento mecânico de misturas do tipo Large Stone Asphalt Mixture (LSAM). Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 154 p.
- Bertollo, S. A. M. (2002). Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas Densas Modificadas com Borracha Reciclada de Pneus. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 252p.
- Bessa, I. S. (2017). Laboratory and field study of fatigue cracking prediction in asphalt pavements. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 138p.
- Boeira, F. D. (2018). Estudo da rigidez, da deformação permanente e da fadiga de misturas asfálticas com ligantes convencionais e modificados. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 284p.
- Bonnaure, F., Gravois, A., Udron, J. (1980). A New Method for Predicting the Fatigue Life of Bituminous Mixes. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT, V. 49.
- Caltrans (2003). Asphalt Rubber Usage Guide. State of California Department of Transportation, Sacramento, California.
- Camargo, F. F. (2016). Field and laboratory performance evaluation of a field-blended rubber asphalt. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, SP, 161p.
- Chavez, F., Marcobal, J., & Gallego, J. (2019). Laboratory evaluation of the mechanical properties of asphalt mixtures with rubber incorporated by the wet, dry, and semi-wet process. *Construction and Building Materials*, 205, 164-174.
- Chehab, G. R.; O’Quinn, E.; Kim, Y. R. (2000). Specimen Geometry Study for Direct Tension Test Based on Mechanical Tests and Air Void Variation in Asphalt Concrete Specimens Compacted by Superpave Giratory Compactor. *Transportation Research Record – Journal of the Transportation Research Board*, p. 125-132.
- Chehab, G. R. (2002). Characterization of Asphalt Concrete in Tension Using a Viscoelastoplastic Model. PhD Thesis, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA, 298 pg.
- Chough, S. H., & Chang, D. H. (1996). Kinetics of sulfur vulcanization of NR, BR, SBR, and their blends using a rheometer and DSC. *Journal of Applied Polymer Science*, 61(3), 449-454.
- CNT (2021). Pesquisa Rodoviária 2021 – Relatório Gerencial. Confederação Nacional de Transportes, Brasília, DF. CNT: SEST: SENAT, 2021.394p.

- Daniel, J. S. (2001). Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure Using a Viscoelastic Continuum Damage Model and its Implementation to WestTrack Mixtures. PhD Thesis, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA.
- Daniel, J. S. & Kim, Y. R. (2002). Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure Using a Viscoelastic, Continuum Damage Model. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT. Colorado – EUA.
- Dantas Neto, S. A. (2004). Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas Asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 265p.
- Dapper, H. (2020). Avaliação laboratorial de misturas asfálticas a quente e mornas com utilização de asfalto borracha. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 137 p.
- Di Benedetto, H., De La Roche, C., Baaj, H., Pronk, A., Lundström, R. (2004). Fatigue of Bituminous Mixtures. Materials and Structures, V. 37, pp. 202-216.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (2009) ME 003 - Material betuminoso: determinação da penetração
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998) ME 083 - Agregados - análise granulométrica
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) ME 086 - Agregado- Determinação do índice de forma
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) ME 148 - Material betuminoso: Determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto Cleveland).
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1996) ME 193 - Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos: Determinação da densidade e da massa específica.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1999) ME 383 - Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - ensaio Cantabro
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010) 131-ME - Materiais asfálticos – Determinação do ponto de Amolecimento – Método do Anel e Bola.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2011) 129-EM - Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2009) 112-ES - Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending”.

- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018) 180-ME - Materiais asfálticos – Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018) 184-ME - Materiais asfálticos – Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente - Método de ensaio.
- Ionashiro, M., Caires, F. J., & Gomes, D. J. C. (2005). *Giolito: fundamentos da termogravimetria e análise térmica diferencial/calorimetria exploratória diferencial*. São Paulo: Giz, 1, 80.
- Faheem, A.; Bahia, H. U. (2004) Using gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures. Wisconsin Highway Research Program, Report 05-02, 95 p.
- Faxina, A. L. (2006). Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação e Área de concentração em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, (1): 303p.
- Fontes, L. P. (2009). *Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos*.
- Galiani, P. D., Malmonge, J. A., Santos, D. P. D., & Malmonge, L. F. (2007). Compósitos de borracha natural com polianilina. *Polímeros*, 17, 93-97.
- Hintz, C. (2012). *Undersatanding Mechanisms Leading to Asphalt Binder Fatigue*. Ph.D Thesis. University of Wisconsin – Madison, Madison.
- Kaloush, K. E. (2001). *Simple performance test for permanent deformation of asphalt mixtures*. Ph Thesis, Arizona State University.
- Kaloush, K. E., Witczak, M. W., Way, G. B., Zborowski, A., Abojaradeh, M. & Sotil, A. (2002). *Performance Evaluation of Arizona Asphalt Rubber Mixtures Using Advanced Dynamic Material Characterization Tests*. Final Report, Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona State University, Tempe, Arizona, July 2002.
- Kedarisetty, S., Biligiri, K. P., & Sousa, J. B. (2016). Advanced rheological characterization of Reacted and Activated Rubber (RAR) modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 122, 12-22.
- Kim, Y. R.; Little, D. N. (1990). One-Dimensional Constitutive Modeling of Asphalt Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 116, N° 4 p. 751-772.
- Kim, Y. R.; Daniel, J. S.; Wen, H. (2002) *Fatigue Performance Evaluation of WesTrack Asphalt Mixtures Using Viscoelastic Continuum Damage Approach*. North Carolina State University. Report n° FHWA/NC/2002-004.

- Kim, Y.-R., Little, D. N., & Lytton, R. L. (2003). Fatigue and healing characterization on asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15, 75-83.
- Kim, Y., Lee, H. J., Little, D. N., Kim, Y. R. (2006). A Simple Testing Method to Evaluate Fatigue Fracture and Damage Performance of Asphalt Mixtures. *Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT*, V. 75.
- Kim, Y. R. (2009) *Modeling of Asphalt Concrete*. 1ed American Society of Civil Engineers. 460 p.
- Kowalski, K. J., Król, J., Radziszewski, P., Casado, R., Blanco, V., Pérez, D., ... & Wayman, M. (2016). Eco-friendly materials for a new concept of asphalt pavement. *Transportation Research Procedia*, 14, 3582-3591.
- Kumara, S.; Venudharanb, V.; Biligiric, K. P. & Sousa, J. B. (2018). Performance Characterization of Reacted and Activated Rubber Modified Gap-Graded Asphalt Mixtures. *Rubberized Asphalt Rubber 2018 - Proceedings, Kruger National Park, South Africa*: 113-128.
- Lee, H. J.; Kim, Y. R. Viscoelastic Constitutive Model for Asphalt Concrete Under Cyclic Loading. *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 124, N° 1 p. 32-40, jan. 1998.
- Leite, L. F. M. (1999). Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero. Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, IMA/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Leite, L. M. F., Constatino, R.S. & Vivoni, A. (2000). Rheological studies of asphalt with ground tire rubber. *Asphalt Rubber 2000 - Proceedings, Vilamoura, Portugal*, p.421-434.
- Leite, L. M. F., Motta, L. M. G., Bernucci, L. B. & Soares, J. B. (2000). Mechanical Behaviour of Asphalt Rubber Mixes Prepared in Laboratory. *Asphalt Rubber 2000 - Proceedings, Vilamoura, Portugal*, p.309-329.
- Lopes, L. N., de Farias, M. M., & de Mello, L. G. R. (2021). Fatigue tests and damage analyses in modified binders and gap-graded asphalt mixtures with Reacted and Activated Rubber–RAR. *Road Materials and Pavement Design*, 22(7), 1616-1636.
- Lundström, R. & Isacsson, U. (2003). Asphalt Fatigue Modeling Using Viscoelastic Continuum Damage Theory. *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, V.4, N. 1, pp. 50-75.
- Mangiafico, S. (2014). Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends. (Doctoral dissertation, Lyon). ENTPE, Lyon.

- Manica, D.; Miranda, H.M.B. & Sousa, J.B.3. (2018). Case study: Development of a new bituminous mixture “ThinGap with Reacted and Activated Rubber for Madeira Island” Rubberized Asphalt Rubber 2018 - Proceedings, Kruger National Park, South Africa: 291-300.
- Martínez, J. G. B. (2014). Avaliação de Desempenho de Misturas Betuminosas com Adição de Lodos de ETA e de ETE. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97 p.
- Bastidas-Martínez, J. G., Rondón-Quintana, H. A., & Muniz de Farias, M. (2021). Behavior of asphalt mastics containing different materials as filler. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 48(4), 347-355.
- Mello, L. G. R. (2008). A Teoria do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 263 p.
- Micaelo, R., Pereira, P., Quaresma, L., & Cidade, M. T. (2015). Fatigue resistance of asphalt binders: Assessment of the analysis methods in strain-controlled tests. *Construction and Building Materials*, 98, p. 703-712.
- Mocelin, D. M. (2018). Avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas quentes e mornas através do modelo de dano contínuo viscoelástico. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 136 p.
- Modified Asphalt Research Center –MARC (2017). Microsoft Excel Spreadsheet for Analysis of Linear Amplitude Sweep Test data according to the draft proposed proposed revised AASHTO TP-101 (Last modified to v1.55 on 3/29/2014). Disponível em <<http://uwmarc.wisc.edu/linear-amplitude-sweep>>. Acesso em: 18 de outubro de 2016.
- Nascimento, L. D. (2008). Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 204 p.
- Nascimento, L. A. H. do. Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil. Dissertação (Doutorado em filosofia) - Faculty of North Carolina State University. Transportation Materials. Raleigh, North Carolina – USA, 2015.
- Nascimento, L. A. H. do. (2016). Caracterização Avançada de Materiais Asfálticos: Dano por Fadiga. Curso. Universidade Federal de Santa Maria. 30 e 31 de março de 2016.
- Núñez, J. (2013). Caracterização à fadiga de ligantes asfálticos modificados envelhecidos a curto e longo prazo. Ms Thesis, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

- Nunes, L. C. (2017). Fadiga de Misturas Asfálticas Descontínuas com Asfalto-Borracha de 4ª Geração. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-281/17, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 142 p.
- Oda, Sandra (2000). Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- Olard, F., Di Benedetto, H., Dony, A., & Vaniscote, J. C. (2005). Properties of bituminous mixtures at low temperatures and relations with binder characteristics. *Materials and structures*, 38(1), 121-126.
- Onofre, F. C.; Bessa, I. S.; Castelo Branco, V. T. F; Soares, J. B. (2011) Correlação entre variáveis de densificação do compactador giratório e resistência à deformação permanente de misturas asfálticas convencionais e com resíduos. *Transportes*, São Paulo-SP, v. 19, n. 1, p. 13-22.
- Plati, C., & Cliatt, B. (2021). Building Sustainable Pavements: Investigating the Effectiveness of Recycled Tire Rubber as a Modifier in Asphalt Mixtures. *Energies*, 14(21), 7099.
- Park, S. W.; Kim, Y. R.; Schapery, R. A. (1996) A viscoelastic continuum damage model and its application to uniaxial behavior of asphalt concrete. *Mechanics of Materials*, 24: 241 – 255.
- Park, S. W.; Schapery, R. A. (1997) A viscoelastic constitutive model for particulate composites with growing damage. *International Journal of Solids and Structures*, 34: 931-947.
- Park, S. W.; KIM, Y. R. (1999) Interconversion between relaxation modulus and creep compliance for viscoelastic solids. *Journal of materials in Civil Engineering*, 11: 76 – 82.
- Pellinen, T. K. (2001). Investigation of the Use of Dynamic Modulus as an Indicator of Hot-Mix Asphalt Performance. PhD Thesis, Arizona State University, Arizona, EUA, 803 pg.
- Pellinen, T. K.; Witczak, M. W.; Bonaquist, R. F. (2004) Asphalt mix master curve construction using sigmoidal fitting function with non-linear least squares optimization. 15th Engineering Mechanics Division Conference: 83–101.
- Pinheiro, J. H. M. (2004). Incorporação de Borracha de Pneu em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco). Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 166 fl.
- Sabouri, M.; Kim, Y. R. (2014). Development of a Failure Criterion for Asphalt Mixtures Under Different Modes of Fatigue Loading. *Transportation Research Record N° 2447– Journal of the Transportation Research Board*. Washington, DC. p. 117-125.

- Salini, R. B. (2000). Utilização de Borracha Reciclada de Pneus em Misturas Asfálticas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 120p.
- Santos, A. B. V. (2020). Contribuições para um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos: Influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão de área trincada. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, CE, 165p.
- Schuster, S. L. (2018). Estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas em campo por meio da teoria viscoelástica de dano contínuo. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 268p.
- Sides, A., Uzan, J. & Perl, M. (1985). A comprehensive visco-elastoplastic characterization of sand-asphalt under compression and tension cyclic loading. *Journal of Testing and Evaluation*. (13): 49-59.
- Silva, F.; Miranda, H.M.B. & Sousa, J.B. (2018). High performance mixtures: two new technologies brought together, ThinGap with RAR designed with i-Mix Design, a new mix design approach. *Rubberized Asphalt Rubber 2018 - Proceedings, Kruger National Park, South Africa: 265-275.*
- Shah, J.; Srinivasan, A. & Kaloush, K. (2018). RAR: Superpave Mix Design and Performance Testing. *Rubberized Asphalt Rubber 2018 - Proceedings, Kruger National Park, South Africa: 79-94.*
- Shatnawi, S. (2011). Comparisons of Rubberized Asphalt Binders Asphalt Rubber and Terminal Blend. Shatec Engineering Consultants, LLC. Eldorado Hills, California, 2011.
- Sousa, J.B., Craus J., Monismith C.L. (1991). Summary report on permanent deformation in asphalt concrete. Strategic Highway Research Program (SHRP), National Research Council, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.
- Sousa, J. B., Way, G. B. & Zareh, A. (2006). Asphalt-Rubber Gap Graded Mix Design Concepts. *Asphalt Rubber 2006 – Proceedings, California, USA: 523-543.*
- Sousa, J. B., Vorobiev, A., Ishai, I., Svehinsky, G. (2012). Elastomeric Asphalt Extender – A New Frontier on Asphalt Rubber Mixes. *Asphalt Rubber 2012 – Proceedings, Munich, Germany, 2012, p. 161-181.*
- Specht, L. P. (2004). Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

- Tayebali, A. A., Deacon, J. A., Coplantz, J. S., Harvey, J. T., Monismith, C. L. (1994). Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mix. Part II – Extended Test Program. *Strategic Highway Research Program – SHRP-A-404, National research Council.*
- Takallou, H. B. & Takallou M. B. (2003). Effects of mixing time and temperature on the viscoelastic properties of asphalt rubber binder. *Asphalt Rubber 2003 – Proceedings, Brasilia, Brazil, 2003, p. 589-602.*
- Underwood, B. S., Kim, Y. R., & Guddati, M. N. (2010). Improved calculation method of damage parameter in viscoelastic continuum damage model. *International Journal of Pavement Engineering, 11(6), 459–476. doi:10.1080/10298430903398088*
- Underwood, B. S.; Baek, C.; Kim, Y. R. (2012). Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model as Platform for Asphalt Concrete Fatigue Analysis. *Transportation Research Record N° 2296 – Journal of the Transportation Research Board, Washington, DC. p. 35-45.*
- Van Dijk, W. & Visser, W. (1977). The Energy Approach to Fatigue for Pavement Design. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT, V.46, pp. 1-37.*
- Visser, A. T. & Verhaeghe, B. (2000). Bitumen rubber: lessons learned in South Africa. *Asphalt Rubber 2000 – Proceedings, Vilamoura, Portugal: 33-50.*
- Way, G.B. (2003). OFGC Meets CRM: where the rubber meets the rubber: 15 Years of Durable Success. *Asphalt Rubber 2003 - Proceedings, Brasilia, Brazil, p. 49-63.*
- Way, G.B., Kaloush, K., Sousa, J. & Biligiri, K.P. (2012). Performance Characteristics of Arizona Asphalt-Rubber and Conventional Mixes using Beam Fatigue and Simple Shear Tests. *Asphalt Rubber 2012 – Proceedings, Munich, Germany, 2012, p. 207-228.*
- Wickboldt, V. S. (2005). *Ensaio Acelerados de Pavimentos para Avaliação de Desempenho de Recapeamentos Asfálticos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, RS.*
- Wu, C., Sousa, J. B., Li A. & Zhao, Z. (2012). Activated Minerals as Binder Stabilizers in Middle Course's Asphalt Concrete Paving Mixtures. *91<sup>st</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, January.*
- Yildirim, Y. (2007). *Polymer modified asphalt binders. Department of Civil Engineering, Texas University at Austin. Construction and Building Materials. (21): 66–72.*
- Yinfei, D.; Jiaqi, C.; Zheng, Z.; Weizheng, L. (2018). A review on solutions for improving rutting resistance of asphalt pavement and test methods. *Construction and Building Materials 168: 893 – 905.*
- Yussof, N. (2012). *Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Bituminous Binders. PhD Thesis, University of Nottingham, UK.*

Zhang, J.; Sabouri, M.; Guddati, M. N.; Kim, Y. R. (2013). Development of a Failure Criterion for Asphalt Mixtures under Fatigue Loading. *Road Materials and Pavement Design*, vol. 14, N° S2, p. 1-15, 2013.

Zhang, J.; Alvarez, A. E.; Lee, S. I.; Torres, A.; Walubita, L. F. (2013). Comparison of flow number, dynamic modulus, and repeated load tests for evaluation of HMA permanent deformation. *Construction and Building Materials*, 44: 391-398.

## Apêndice A: Caracterização LVE dos ligantes

CAP 50/70 Virgem														
Frequência	Módulo dinâmico (Pa)							Ângulo de fase						
	Temperatura de ensaio (°C)													
	$\omega$ (rad/s)	10	15	20	25	35	45	55	10	15	20	25	35	45
0,628	5,28E+05	1,92E+05	5,61E+04	1,51E+04	1,24E+03	1,46E+02	3,02E+01	71,4	74,4	77,7	80,7	85,0	87,8	88,6
1,01	7,51E+05	2,83E+05	8,42E+04	2,31E+04	1,94E+03	2,32E+02	4,63E+01	70,2	73,3	76,8	80,0	84,4	87,4	88,4
1,57	1,06E+06	4,07E+05	1,23E+05	3,44E+04	2,96E+03	3,61E+02	7,30E+01	68,5	72,1	75,9	79,3	83,8	86,9	88,2
2,51	1,52E+06	5,91E+05	1,83E+05	5,20E+04	4,60E+03	5,73E+02	1,14E+02	66,6	70,7	74,9	78,6	83,1	86,3	87,8
3,96	2,11E+06	8,42E+05	2,67E+05	7,75E+04	7,04E+03	8,92E+02	1,80E+02	64,5	69,2	73,8	77,9	82,5	85,8	87,4
6,28	2,93E+06	1,19E+06	3,89E+05	1,15E+05	1,08E+04	1,39E+03	2,86E+02	62,1	67,4	72,6	76,8	81,8	85,2	86,9
10,1	3,24E+06	1,33E+06	4,38E+05	1,31E+05	1,24E+04	1,60E+03	3,32E+02	61,3	66,8	72,1	76,7	81,0	84,6	86,4
15,7	5,34E+06	2,32E+06	8,05E+05	2,51E+05	2,50E+04	3,33E+03	7,04E+02	56,5	63,2	69,6	74,8	80,2	84,0	85,9
25,1	7,04E+06	3,20E+06	1,16E+06	3,69E+05	3,83E+04	5,20E+03	1,11E+03	53,0	60,7	67,8	73,7	79,3	83,4	85,4
39,6	9,00E+06	4,29E+06	1,62E+06	5,34E+05	5,75E+04	7,99E+03	1,73E+03	49,3	57,9	65,8	72,3	78,3	82,8	84,8
62,8	1,15E+07	5,71E+06	2,26E+06	7,75E+05	8,68E+04	1,23E+04	2,70E+03	45,5	54,7	63,6	70,3	77,2	82,1	84,2

CAP 50/70 RTFOT													
Frequência	Módulo dinâmico (Pa)							Ângulo de fase					
	Temperatura de ensaio (°C)												
	$\omega$ (rad/s)	10	15	25	35	45	55	10	15	25	35	45	55
0,628	8,45E+06	3,13E+06	3,28E+05	2,74E+04	3,24E+03	6,13E+02	48,8	55,3	64,7	72,0	78,0	83,0	
1,01	1,08E+07	4,16E+06	4,50E+05	4,04E+04	4,96E+03	9,58E+02	47,2	53,8	63,7	71,0	77,0	82,0	
1,57	1,36E+07	5,40E+06	6,17E+05	5,83E+04	7,38E+03	1,46E+03	45,7	52,3	62,7	69,9	76,0	81,0	
2,51	1,72E+07	7,06E+06	8,54E+05	8,52E+04	1,12E+04	2,26E+03	44,1	50,6	61,5	68,7	75,0	80,0	
3,96	2,13E+07	9,07E+06	1,16E+06	1,22E+05	1,66E+04	3,43E+03	42,5	49,0	60,2	67,6	74,0	79,0	
6,28	2,64E+07	1,16E+07	1,57E+06	1,76E+05	2,46E+04	5,22E+03	41,0	47,4	58,9	66,8	73,0	78,0	
10,1	3,25E+07	1,48E+07	2,12E+06	2,53E+05	3,64E+04	7,96E+03	39,4	45,8	57,4	66,0	72,0	77,0	
15,7	3,93E+07	1,84E+07	2,79E+06	3,56E+05	5,26E+04	1,18E+04	37,9	44,3	56,0	64,7	71,0	76,0	
25,1	4,76E+07	2,31E+07	3,68E+06	5,06E+05	7,67E+04	1,78E+04	36,3	42,7	54,5	63,5	69,9	75,0	
39,6	5,69E+07	2,85E+07	4,76E+06	7,06E+05	1,10E+05	2,62E+04	34,9	41,2	53,0	62,0	68,7	74,0	
62,8	6,77E+07	3,50E+07	6,10E+06	9,84E+05	1,56E+05	3,84E+04	33,4	39,7	51,5	61,0	67,6	73,0	

AB-R30 Virgem												
Frequência	Módulo dinâmico (Pa)						Ângulo de fase (°)					
	Temperatura (°C)											
$\omega$ (rad/s)	25	35	45	55	65	75	25	35	45	55	65	75
0,628	4,36E+04	9,51E+03	2,43E+03	8,86E+02	3,43E+02	1,81E+02	60,3	60,2	62,3	61,9	60,1	52,7
1,01	5,72E+04	1,27E+04	3,32E+03	1,21E+03	4,72E+02	2,39E+02	60,5	60,2	61,8	62,7	62,0	56,0
1,57	7,43E+04	1,67E+04	4,45E+03	1,65E+03	6,46E+02	3,16E+02	60,7	60,1	61,2	62,8	63,3	58,8
2,51	9,77E+04	2,24E+04	6,05E+03	2,27E+03	9,03E+02	4,33E+02	60,8	60,0	60,6	62,4	64,1	61,1
3,96	1,27E+05	2,97E+04	8,12E+03	3,10E+03	1,25E+03	5,94E+02	61,0	60,0	60,1	61,9	64,2	62,7
6,28	1,65E+05	3,96E+04	1,09E+04	4,23E+03	1,74E+03	8,28E+02	61,1	60,1	59,7	61,2	63,9	63,7
10,1	2,14E+05	5,30E+04	1,48E+04	5,78E+03	2,43E+03	1,16E+03	61,3	60,2	59,5	60,6	63,4	64,2
15,7	2,72E+05	6,98E+04	1,96E+04	7,76E+03	3,33E+03	1,60E+03	61,5	60,4	59,4	60,1	62,7	64,1
25,1	3,48E+05	9,30E+04	2,64E+04	1,06E+04	4,60E+03	2,24E+03	61,7	60,7	59,5	59,8	62,1	63,8
39,6	4,37E+05	1,22E+05	3,53E+04	1,42E+04	6,25E+03	3,08E+03	62,0	61,0	59,8	59,6	61,6	63,4
62,8	5,45E+05	1,61E+05	4,73E+04	1,91E+04	8,50E+03	4,22E+03	62,2	61,3	60,1	59,6	61,3	63,0

AB-R30 RTFOT												
Frequência	Módulo dinâmico (Pa)						Ângulo de fase (°)					
	Temperatura (°C)											
$\omega$ (rad/s)	25	35	45	55	65	75	25	35	45	55	65	75
0,628	7,18E+04	2,26E+04	8,67E+03	3,02E+03	1,11E+03	4,29E+02	56,6	53,5	53,5	56,7	61,8	63,8
1,01	8,93E+04	2,98E+04	1,15E+04	4,04E+03	1,53E+03	6,01E+02	57,1	53,7	53,2	56,0	60,7	63,6
1,57	1,11E+05	3,87E+04	1,48E+04	5,30E+03	2,05E+03	8,31E+02	57,3	54,0	53,2	55,5	59,6	63,2
2,51	1,43E+05	5,12E+04	1,95E+04	7,04E+03	2,79E+03	1,16E+03	57,4	54,2	53,4	54,9	58,4	62,3
3,96	1,82E+05	6,72E+04	2,54E+04	9,25E+03	3,72E+03	1,59E+03	57,5	54,5	53,8	54,6	57,4	61,2
6,28	2,30E+05	8,88E+04	3,36E+04	1,22E+04	4,97E+03	2,16E+03	57,6	54,8	54,1	54,5	56,6	60,1
10,1	2,92E+05	1,18E+05	4,44E+04	1,62E+04	6,63E+03	2,96E+03	57,7	55,1	54,5	54,6	56,0	58,9
15,7	3,63E+05	1,55E+05	5,83E+04	2,11E+04	8,70E+03	3,94E+03	57,9	55,4	55,1	54,8	55,6	58,1
25,1	4,54E+05	2,06E+05	7,78E+04	2,81E+04	1,16E+04	5,33E+03	58,1	55,7	55,6	55,2	55,4	57,1
39,6	5,60E+05	2,72E+05	1,04E+05	3,72E+04	1,52E+04	7,11E+03	58,4	55,8	56,2	55,6	55,5	56,5
62,8	6,86E+05	3,60E+05	1,38E+05	4,96E+04	2,01E+04	9,53E+03	58,9	55,9	56,7	55,9	55,7	55,7

## Apêndice B: Amostras utilizadas e resultados dos ensaios de Dano por Umidade Induzida e Cantabro

Dano por Umidade Induzida - DUI (150x75mm)											
MAC											
Condição	Amostra	Vv (%)	(A) (g)	Va (cm <sup>3</sup> )	(B) (g)	(J)	(S)	Força ruptura (N)	RT(Mpa)	RT (MPa)	RRT (%)
RTc	MAC 1	7,7	3359,7	117,6	3428,3	68,4	58,2	10570	0,52		
	MAC 5	7,6	3211,1	108,7	3276,0	64,7	59,5	8697	0,45	0,50	
	MAC 8	8,5	3402,7	133,7	3481,4	78,5	58,7	11253	0,54		89
RT	MAC 2	8,0	3355,1	120,3	-	-	-	12330	0,61		
	MAB 4	7,4	3398,8	112,9	-	-	-	10087	0,49	0,56	
	MAC 7	7,4	3420,9	118,1	-	-	-	12392	0,59		
MAB-R30											
Condição	Amostra	Vv (%)	(A) (g)	Va (cm <sup>3</sup> )	(B) (g)	(J)	(S)	Força ruptura (N)	RT(Mpa)	RT (MPa)	RRT (%)
RTc	MAB-R30-2	7,6	3094,2	106,0	3154,9	60,5	57,1	9523	0,51		
	MAB-R30-4	7,3	3076,3	99,5	3133,3	56,8	57,1	10411	0,57	0,53	
	MAB-R30-7	7,3	3032,8	98,9	3093,3	60,3	61,0	9208	0,51		93
RT	MAB-R30-1	7,4	3096,9	104,1	-	-	-	11456	0,62		
	MAB-R30-3	7,4	3164,5	102,1	-	-	-	11246	0,61	0,57	
	MAB-R30-8	6,9	3034,0	95,2	-	-	-	8829	0,48		

Ensaio Cantabro (100x60mm)						
MAC						
Amostra	Vv (%)	P (g)	P'(g)	A(%)	Média (%)	DP (%)
MAC 1	4,4	1111,7	1029,5	7,39		
MAC 2	5,0	1167,3	1099,9	5,77	6,61	0,81
MAC 3	4,2	1173,4	1095,1	6,67		
MAB-R30						
Amostra	Vv (%)	P	P'	A	Média (%)	DP (%)
MAB-R30-1	4,3	1181,2	1147,8	2,83		
MAB-R30-2	5,2	1180,8	1146,3	2,92	2,67	0,36
MAB-R30-3	4,0	1186,6	1159,8	2,26		

**Apêndice C: Propriedades volumétricas das amostras utilizadas nos ensaios uniaxiais**

<b>Módulo dinâmico (100x150mm)</b>					
<b>Amostra</b>	<b>Gmb (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Vv (%)</b>	<b>VCB (%)</b>	<b>VAM (%)</b>	<b>RBV (%)</b>
MAC 1	2,380	4,1	15,6	19,7	79,4
MAC 2	2,384	4,1	15,7	19,7	79,3
<b>Ensaio uniaxial carga repetida - flow number (100x150mm)</b>					
MAC	2,260	7,8	14,8	22,6	65,6
MAC 9	2,271	7,9	14,9	22,8	65,4
MAC 13	2,250	7,5	14,8	22,3	66,3
<b>Fadiga uniaxial cíclica (100x130mm)</b>					
MAC 4	2,350	4,6	15,4	20,0	77,2
MAC 5	2,355	4,7	15,5	20,2	76,6
MAC 6	2,377	3,5	15,6	19,1	81,6
MAC 7	2,381	3,8	15,6	19,4	80,6

<b>Módulo dinâmico (100x150mm)</b>					
<b>Amostra</b>	<b>Gmb (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Vv (%)</b>	<b>VCB (%)</b>	<b>VAM (%)</b>	<b>RBV (%)</b>
MAB-R30- 10	2,354	4,4	17,7	22,1	79,9
MAB-R30- 11	2,350	4,1	17,6	21,8	81,0
<b>Ensaio uniaxial carga repetida - flow number (100x150mm)</b>					
MAB-R30- 18	2,294	6,7	17,2	23,9	72,1
MAB-R30- 19	2,289	6,9	17,2	22,5	76,3
MAB-R30- 20	2,267	7,8	17,0	22,1	77,2
<b>Fadiga uniaxial cíclica (100x130mm)</b>					
MAB-R30- 5	2,356	4,5	17,7	22,2	79,6
MAB-R30- 7	2,402	3,0	18,0	21,0	85,8
MAB-R30- 12	2,329	5,1	17,5	22,6	77,4
MAB-R30- 14	2,327	5,3	17,5	26,3	66,3

## Apêndice D: Caracterização LVE das misturas

Temp.	Freq.	E*	E*	E*	Desvpad	CV	Ângulo de fase	Ângulo de fase	Ângulo de fase	Desvpad	CV
		MAC1	MAC 2	Média			MAC 1	MAC 2	Média		
5,00	25	19284	17944	1,86E+04	9,48E+02	5%	8,81	9,72	9,27	0,64	7%
5,00	10	17456	16154	1,68E+04	9,21E+02	5%	11,56	11,88	11,72	0,23	2%
5,00	5	16132	14763	1,54E+04	9,68E+02	6%	12,98	13,37	13,18	0,28	2%
5,00	1	12755	11485	1,21E+04	8,98E+02	7%	16,46	17,30	16,88	0,59	4%
5,00	0,5	11453	10163	1,08E+04	9,12E+02	8%	18,12	19,13	18,63	0,71	4%
5,00	0,1	8449	7222	7,84E+03	8,68E+02	11%	22,70	24,12	23,41	1,00	4%
15,00	25	13521	13374	1,34E+04	1,04E+02	1%	17,40	17,57	17,49	0,12	1%
15,00	10	11282	11542	1,14E+04	1,84E+02	2%	20,36	20,09	20,23	0,19	1%
15,00	5	9953	10109	1,00E+04	1,10E+02	1%	21,00	22,19	21,60	0,84	4%
15,00	1	6933	6843	6,89E+03	6,36E+01	1%	26,00	27,95	26,98	1,38	5%
15,00	0,5	5953	5823	5,89E+03	9,19E+01	2%	28,06	29,88	28,97	1,29	4%
15,00	0,1	3574	3471	3,52E+03	7,28E+01	2%	33,97	37,72	35,85	2,65	7%
20,00	25	10568	12347	1,15E+04	1,26E+03	11%	18,42	17,86	18,14	0,40	2%
20,00	10	8641	10267	9,45E+03	1,15E+03	12%	21,23	21,75	21,49	0,37	2%
20,00	5	7421	8867	8,14E+03	1,02E+03	13%	23,28	23,83	23,56	0,39	2%
20,00	1	4847	5735	5,29E+03	6,28E+02	12%	28,62	29,08	28,85	0,33	1%
20,00	0,5	3950	4675	4,31E+03	5,13E+02	12%	30,48	30,70	30,59	0,16	1%
20,00	0,1	2236	2623	2,43E+03	2,74E+02	11%	35,20	34,63	34,92	0,40	1%
25,00	25	7467	7296	7,38E+03	1,21E+02	2%	24,39	24,71	24,55	0,23	1%
25,00	10	5712	5629	5,67E+03	5,87E+01	1%	28,68	27,45	28,07	0,87	3%
25,00	5	4666	4617	4,64E+03	3,46E+01	1%	30,41	29,36	29,89	0,74	2%
25,00	1	2661	2607	2,63E+03	3,82E+01	1%	34,55	33,84	34,20	0,50	1%
25,00	0,5	2053	1987	2,02E+03	4,67E+01	2%	35,51	34,59	35,05	0,65	2%
25,00	0,1	1037	992,7	1,01E+03	3,13E+01	3%	38,01	35,01	36,51	2,12	6%
35,00	25	4350	4217	4,28E+03	9,40E+01	2%	30,06	32,12	31,09	1,46	5%
35,00	10	2837	2840	2,84E+03	2,12E+00	0%	33,08	35,07	34,08	1,41	4%
35,00	5	2201	2140	2,17E+03	4,31E+01	2%	34,29	35,31	34,80	0,72	2%
35,00	1	1070	1021	1,05E+03	3,46E+01	3%	35,10	35,76	35,43	0,47	1%
35,00	0,5	779,3	745,3	7,62E+02	2,40E+01	3%	34,04	34,35	34,20	0,22	1%
35,00	0,1	373,9	368,7	3,71E+02	3,68E+00	1%	31,42	30,58	31,00	0,59	2%

Temp.	Freq.	E*	E*	E*	Desvpad	CV	Ângulo de fase	Ângulo de fase	Ângulo de fase	Desvpad	CV
		MAB-R30-10	MAB-R30-11	Média			MAB-R30-10	MAB-R30-11	Média		
5,00	25	15573	14717	1,51E+04	6,05E+02	4%	8,40	8,78	8,59	0,27	3%
5,00	10	14162	13213	1,37E+04	6,71E+02	5%	10,45	10,23	10,34	0,16	2%
5,00	5	13087	12166	1,26E+04	6,51E+02	5%	11,43	11,26	11,35	0,12	1%
5,00	1	10521	9773	1,01E+04	5,29E+02	5%	14,19	14,07	14,13	0,08	1%
5,00	0,5	9423	8755	9,09E+03	4,72E+02	5%	15,57	15,52	15,55	0,04	0%
5,00	0,1	6956	6403	6,68E+03	3,91E+02	6%	19,76	19,67	19,72	0,06	0%
15,00	25	11413	10421	1,09E+04	7,01E+02	6%	13,62	14,80	14,21	0,83	6%
15,00	10	9653	8515	9,08E+03	8,05E+02	9%	16,60	17,81	17,21	0,86	5%
15,00	5	8536	7470	8,00E+03	7,54E+02	9%	18,20	19,76	18,98	1,10	6%
15,00	1	6115	5296	5,71E+03	5,79E+02	10%	22,42	24,26	23,34	1,30	6%
15,00	0,5	5258	4509	4,88E+03	5,30E+02	11%	24,00	25,95	24,98	1,38	6%
15,00	0,1	3459	2894	3,18E+03	4,00E+02	13%	28,38	30,07	29,23	1,20	4%
20,00	25	8878	8049	8,46E+03	5,86E+02	7%	17,22	18,38	17,80	0,82	5%
20,00	10	7250	6480	6,87E+03	5,44E+02	8%	21,43	21,38	21,41	0,04	0%
20,00	5	6248	5565	5,91E+03	4,83E+02	8%	23,05	23,15	23,10	0,07	0%
20,00	1	4172	3687	3,93E+03	3,43E+02	9%	27,80	27,44	27,62	0,25	1%
20,00	0,5	3479	3078	3,28E+03	2,84E+02	9%	28,71	28,78	28,75	0,05	0%
20,00	0,1	2141	1859	2,00E+03	1,99E+02	10%	32,51	32,69	32,60	0,13	0%
25,00	25	7193	6749	6,97E+03	3,14E+02	5%	20,89	21,59	21,24	0,49	2%
25,00	10	5706	5280	5,49E+03	3,01E+02	5%	24,00	24,59	24,30	0,42	2%
25,00	5	4851	4456	4,65E+03	2,79E+02	6%	25,75	26,22	25,99	0,33	1%
25,00	1	3088	2794	2,94E+03	2,08E+02	7%	29,75	30,17	29,96	0,30	1%
25,00	0,5	2536	2287	2,41E+03	1,76E+02	7%	30,75	31,33	31,04	0,41	1%
25,00	0,1	1452	1286	1,37E+03	1,17E+02	9%	33,82	34,26	34,04	0,31	1%
35,00	25	4001	3007	3,50E+03	7,03E+02	20%	28,59	30,29	29,44	1,20	4%
35,00	10	2860	2121	2,49E+03	5,23E+02	21%	31,89	33,72	32,81	1,29	4%
35,00	5	2288	1686	1,99E+03	4,26E+02	21%	32,81	34,51	33,66	1,20	4%
35,00	1	1241	887,9	1,06E+03	2,50E+02	23%	35,14	36,38	35,76	0,88	2%
35,00	0,5	951,2	674,4	8,13E+02	1,96E+02	24%	34,94	35,83	35,39	0,63	2%
35,00	0,1	465,2	319,7	3,92E+02	1,03E+02	26%	35,00	35,47	35,24	0,33	1%

## Apêndice E: Série de Prony das misturas

MAC		MAB-R30	
Prony Series		Prony Series	
Ti(s)	Ei (kPa)	Ti(s)	Ei (kPa)
2,00E+08	1,32E+03	2,0E+08	3,7E+03
2,00E+07	1,29E+03	2,0E+07	2,3E+03
2,00E+06	3,36E+03	2,0E+06	5,9E+03
2,00E+05	7,63E+03	2,0E+05	1,2E+04
2,00E+04	1,82E+04	2,0E+04	2,7E+04
2,00E+03	4,65E+04	2,0E+03	6,7E+04
2,00E+02	1,33E+05	2,0E+02	1,8E+05
2,00E+01	4,37E+05	2,0E+01	5,3E+05
2,00E+00	1,42E+06	2,0E+00	1,3E+06
2,00E-01	3,29E+06	2,0E-01	2,5E+06
2,00E-02	4,37E+06	2,0E-02	3,3E+06
2,00E-03	3,48E+06	2,0E-03	3,1E+06
2,00E-04	2,03E+06	2,0E-04	2,3E+06
2,00E-05	1,03E+06	2,0E-05	1,5E+06
2,00E-06	4,87E+05	2,0E-06	9,0E+05
2,00E-07	2,24E+05	2,0E-07	5,2E+05
2,00E-08	1,04E+05	2,0E-08	3,0E+05

## Apêndice F: Curvas de Wöhler obtidas segundo os dados experimentais, e por meio do critério de ruptura $G^R$ e dados do modelo S-VECD

Dados de deformação de tração e  $N_f$  experimentais para obtenção das Curvas de Wöhler.

Mistura	Modelo de Potência		Deformações e $N_f$				
	$k_1$	$k_2$	150	175	200	250	-
MAC	1456	0,205	43990	48110	14990	5830	
MAB-R30	$k_1$	$k_2$	175	190	200	220	275
	839	0,134	84250	63750	42440	37700	3870

Dados de deformação de tração e  $N_f$  calculados segundo a equação desenvolvida por Nascimento (2016) utilizando-se o parâmetro  $G^R$  e dados do modelo S-VECD.

Mistura	Modelo de Potência		Deformações e $N_f$				
	$k_1$	$k_2$	150	175	200	250	-
MAC	2335	0,155	5795166	2140867	903570	213758	
MAB-R30	$k_1$	$k_2$	175	190	200	220	275
	1671	0,151	26328518	15477612	11112159	6003461	1420244

Equação para o cálculo da vida de fadiga  $N_f$  segundo Nascimento (2016) utilizando-se o parâmetro  $G^R$  e os dados do modelo S-VECD:

$$N_f = \left( \frac{\delta}{Y \left( \frac{C_{12}}{p} \right) + 1} \right)^{\frac{1}{\Delta + 1 - \left( \frac{C_{12}}{p} \right)}}$$

Onde:

$$\delta = \frac{1}{2} (\varepsilon_{TA}^R)^2 C_{11} \left( \frac{(p(C_{11} C_{12})^\alpha (\varepsilon_{TA}^R)^2)}{f_R^{2\alpha}} \right)^{\left( \frac{C_{12}}{p} \right)}$$

$$\varepsilon_{TA}^R = \frac{1}{E_R} \frac{\beta + 1}{2} \left( (\varepsilon_{0,pp})_i |E^*|_{LVE} \right)$$

$$p = \alpha - \alpha C_{12} + 1$$

$$G^R = Y(N_f)^\Delta$$