

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

**FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DESCONTÍNUAS COM  
ASFALTO-BORRACHA DE 4ª GERAÇÃO**

**LETÍCIA CARDOSO NUNES**

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

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM-281/17**

**BRASÍLIA / DF: FEVEREIRO / 2017**

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

**FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DESCONTÍNUAS COM  
ASFALTO-BORRACHA DE 4ª GERAÇÃO**

**LETÍCIA CARDOSO NUNES**

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

**APROVADA POR:**

---

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

---

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

---

**MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**ERNESTO SIMÕES PREUSSLER, DSc (DYNATEST)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**BRASÍLIA/DF, 23 DE FEVEREIRO DE 2017.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

|   |                        |
|---|------------------------|
| NUNES, LETÍCIA CARDOSO  |                        |
| Fadiga de Misturas Asfálticas Descontínuas com Asfalto-Borracha de 4ª Geração, [Distrito Federal], 2017                   |                        |
| xviii,142 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2017)  |                        |
| Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental |                        |
| 1. Pavimentação   | 2. Misturas Asfálticas |
| 3. Asfalto-borracha   | 4. Fadiga              |
| I. ENC/FT/UnB   | II. Mestre             |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Letícia Cardoso Nunes

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Fadiga de Misturas Asfálticas Descontínuas com Asfalto-Borracha de 4ª Geração.

GRAU / ANO: Mestre / 2017

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

---

Letícia Cardoso Nunes

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus por sempre iluminar meu caminho e me permitir chegar até aqui.

Aos meu pais, Geraldo e Nilda, por sempre apoiarem minhas decisões e me darem força para continuar a busca pela realização pessoal e profissional. A todos os meus familiares que mesmo de longe sempre me motivaram, os amo muito.

Ao meu namorado, Cleiton, por estar ao meu lado em todos os momentos, minha melhor companhia. Obrigada por ser um dos meus maiores incentivadores, amo você. Agradeço também à Tânia e Kléber, por me terem como da família, tornando a vida em Brasília mais aconchegante.

Gostaria de agradecer ao professor Márcio pela orientação, pela confiança, por seu exemplo como docente e pesquisador na engenharia geotécnica.

Gostaria de agradecer muito ao Luiz Guilherme pela orientação e suporte, por viabilizar grande parte das etapas deste trabalho e não medir esforços para que tudo fosse possível. Obrigada por sua ajuda, pelas sugestões sempre bem vindas e por compartilhar o seu conhecimento em pavimentação. Sou muito grata a tudo que fez e faz por mim e por todos os ensinamentos recebidos.

Aos professores da Pós-Graduação em Geotecnia por contribuírem com a minha formação. E aos amigos Victor e Ana Carolina por dividirem comigo grande parte desta caminhada, pelos estudos e bons momentos.

Gostaria de agradecer a todos que fazem parte do INFRALAB, em especial aos amigos pesquisadores Juan, Jaime, Liosber e Robinson, por terem me acolhido no laboratório, pelas ajudas corriqueiras e pelos conhecimentos transmitidos.

Agradeço ao DER/DF em especial aos técnicos Sérgio e Sinval pela disposição em ajudar e pelo apoio que me deram durante a compactação das misturas asfálticas.

A todos o meu muito obrigada.

# FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DESCONTÍNUAS COM ASFALTO-BORRACHA DE 4ª GERAÇÃO

## RESUMO

O dano em pavimentos flexíveis devido a tensões e deformações causadas pelo tráfego e por fatores ambientais é manifestado em grande parte dos casos em trincamento por fadiga. A resistência à fadiga é a habilidade de suportar carregamentos repetidos sem que haja o desenvolvimento de trincas e está associada à rigidez do material. Apesar das vantagens obtidas pela modificação do ligante com Borracha Moída de Pneus (BMP) pela via úmida, sua fabricação requer instalação de equipamentos específicos na usina, além de elevada temperatura e tempo de mistura. Neste contexto, novos materiais como os grânulos de borracha pré-ativados (RAR-*Reacted and Activated Rubber*) e borracha peletizada (*Pellet*) surgiram com a proposta de simplificar do processo de usinagem (como o realizado na mistura asfáltica obtida pela via seca) e obter desempenho superior (como a mistura asfáltica obtida pela via úmida). Pesquisas recentes têm adotado critérios de análises menos empíricos e mais mecânicos de avaliação dos materiais empregados na pavimentação. Desta forma, o presente trabalho analisou o comportamento reológico e a resistência à fadiga de um ligante base (CAP 50/70), de ligantes modificados e de misturas de granulometria descontínua produzidos com adição de *Pellet* e RAR. Os ensaios de caracterização reológica tiveram embasamento na Teoria da Viscoelasticidade e no princípio de superposição tempo-temperatura o que possibilitou criar as chamadas curvas mestras para os ligantes e para as misturas asfálticas. As análises do comportamento à fadiga, foram realizadas sob o conceito de VECD (*ViscoElastic Continuum Damage*) para os ligantes, enquanto as misturas produzidas foram avaliadas com base nas tradicionais curvas de Whöler. Todos os ensaios de caracterização reológica e fadiga nos ligantes foram realizados no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) e para as misturas asfálticas no equipamento de viga à flexão em quatro pontos (4PB). Os resultados mostraram que a modificação do ligante convencional CAP 50/70 por *Pellet* e RAR aumenta os valores de módulo dinâmico  $|G^*|$  e reduz a suscetibilidade em relação à frequência/temperatura. Estes resultados implicaram em aumento da vida de fadiga e diminuição da sensibilidade ao dano nos ligantes asfálticos estudados. Nas misturas asfálticas a modificação por asfaltos-borracha de 4ª geração resultou em redução dos valores de  $|E^*|$  e

consequente aumento da vida de fadiga comparada a uma mistura asfáltica produzida por via úmida local (*field blend*).

# **FATIGUE DAMAGE IN GAP-GRADED ASPHALT MIXTURES WITH ADDITION OF 4<sup>TH</sup> ASPHALT-RUBBER**

## **ABSTRACT**

Damage to flexible pavements due to stress and strain caused by traffic and environmental factors is manifested in most cases in the form of fatigue cracking. Fatigue resistance is the ability to withstand repeated loads without cracking and is associated with stiffness of the material. Cracking can be reduced using modified asphalt binder with the incorporation of ground scrap tyre rubber to produce asphalt-rubber via the wet process. This process results in a highly viscous material with enhanced engineering properties, but requires a specific equipment that is typically installed at the job site, or close to the supplying asphalt plant and its manufacture requires high temperature and long mixing time. In this context, alternatives materials such as Reacted and Activated Rubber - RAR and Pellet rubber were developed with the purpose to simplify the manufacturing process (as in the asphalt mixture obtained by the dry process) and to enhance the performance of the asphalt mixture (as the asphalt mixture obtained by the wet process). Recent researches have adopted less empirical and more mechanistic criteria for the evaluation of materials used in flexible pavements. Therefore, the present research analyzed the rheological behavior and the fatigue resistance of a neat binder (CAP 50/70), modified binders and gap-graded mixtures produced with addition of Pellet and RAR. The binders and asphalt mixtures rheological characterization tests were based on the Linear Viscoelasticity Theory and the principle of time-temperature superposition, which made it possible to create the so-called master curves. Binder fatigue was determined using the Linear Amplitude Sweep (LAS) test and behavior analyses were performed under the Viscoelastic Continuum damage - VECD concept, while the mixtures produced were evaluated based on the traditional Whöler curves. All the rheological characterization and fatigue tests on the binders were performed using the dynamic shear rheometer (DSR) and asphalt mixtures tested in the four-point bending (4PB) beam equipment. The results showed that modification of the conventional binder CAP 50/70 by Pellet and RAR increases the values of dynamic shear modulus  $|G^*|$  and reduces susceptibility to frequency / temperature. These results imply increased fatigue life and decreased sensitivity to damage in the studied asphalt binders. In the asphalt mixtures the modification by alternatives

materials resulted in reduction of the values of  $|E^*|$  and consequent increase in the fatigue life compared to field blend asphalt mixture.

# ÍNDICE

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>19</b> |
| 1.1      | Relevância da pesquisa.....   | 21        |
| 1.2      | Objetivos e metodologia.....  | 22        |
| 1.3      | Organização do trabalho.....  | 23        |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>  | <b>25</b> |
| 2.1      | Cimento asfáltico de petróleo modificado .....  | 25        |
| 2.2      | Asfalto-borracha.....   | 27        |
| 2.2.1    | Processos de incorporação de borracha a misturas asfálticas .....                     | 30        |
| 2.2.2    | Asfaltos-borracha de 4ª geração.....  | 32        |
| 2.3      | Comportamento viscoelástico de ligantes e misturas asfálticas .....                   | 36        |
| 2.4      | Comportamento à fadiga em ligantes asfálticos.....                                    | 40        |
| 2.5      | Comportamento à fadiga em misturas asfálticas.....                                    | 43        |
| 2.5.1    | Ensaio de fadiga à flexão em viga quatro pontos .....                                 | 46        |
|          | Norma americana AASHTO T 321/07 .....   | 47        |
|          | Norma americana ASTM D 7460/10 .....  | 48        |
|          | Norma europeia EN 12697-24:2004.....  | 49        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS.....</b>  | <b>51</b> |
| 3.1      | Programa experimental .....   | 51        |
| 3.1.1    | Matriz experimental.....  | 52        |
| 3.2      | Caracterização do agregado mineral .....  | 53        |
| 3.3      | Caracterização dos ligantes asfálticos .....  | 55        |
| 3.4      | Dosagem <i>SUPERPAVE</i> .....  | 57        |
| 3.5      | Misturas asfálticas utilizadas e preparação dos corpos de prova prismáticos.....      | 60        |
| 3.6      | Ensaio de caracterização reológica e de fadiga acelerada nos ligantes asfálticos ..   | 63        |
| 3.6.1    | Descrição do equipamento utilizado.....   | 63        |
| 3.6.2    | Programa experimental e configurações utilizadas nos ensaios .....                    | 64        |
| 3.6.3    | Equações para a determinação da vida de fadiga segundo a teoria VECD no ensaio LAS 66 |           |
| 3.7      | Ensaio de caracterização reológica e de fadiga à flexão das misturas asfálticas....   | 68        |
| 3.7.1    | Descrição do equipamento utilizado.....   | 68        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 3.7.2    | Programa experimental e configurações utilizadas nos ensaios ..... | 70         |
| <b>4</b> | <b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>                     | <b>72</b>  |
| 4.1      | Caracterização do agregado mineral .....                           | 72         |
| 4.2      | Caracterização física dos ligantes .....                           | 75         |
| 4.3      | Dosagem SUPERPAVE.....   | 76         |
| 4.4      | Caracterização viscoelástica dos ligantes.....                     | 78         |
| 4.5      | Comportamento à fadiga dos ligantes .....                          | 84         |
| 4.6      | Parâmetros volumétricos e grau de compactação das amostras .....   | 89         |
| 4.7      | Caracterização viscoelástica das misturas asfálticas .....         | 93         |
| 4.8      | Comportamento à fadiga das misturas asfálticas .....               | 103        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES.....</b>   | <b>109</b> |
| 5.1      | Pesquisas futuras .....  | 111        |
|          | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                            | <b>112</b> |
|          | <b>APÊNDICE .....</b>  | <b>118</b> |

## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 2.1- Propriedades físicas dos asfaltos-borrachas segundo a ASTM D 6114/09.....   | 31  |
| Tabela 3.1- Matriz de ensaios realizados na pesquisa para ligantes e misturas asfálticas com RAR e <i>Pellet</i> .....  | 53  |
| Tabela 3.2- Composição dos ligantes estudados, tempo e temperatura de mistura. ....   | 57  |
| Tabela 3.3- Seleção do número de giros para o compactador SUPERPAVE (Asphalt Institute, 2007).....  | 58  |
| Tabela 3.4- Composição das misturas asfalto-borracha produzidas. ....   | 60  |
| Tabela 4.1- Distribuição granulométrica da mistura e faixas de limite do ADOT e DNIT. ....  | 73  |
| Tabela 4.2- Propriedades ensaiadas nos agregados, normativas, especificações e valores. ....  | 75  |
| Tabela 4.3- Propriedades físicas das composições em estudo e limitações ASTM D 6114. ....   | 76  |
| Tabela 4.4- Parâmetros volumétricos para os teores de dosagem SUPERPAVE. ....   | 76  |
| Tabela 4.5- Propriedades volumétricas para misturas asfalto-borracha. ....  | 78  |
| Tabela 4.6Tabela 4.7Tabela 4.8- Valores da inclinação da parte linear central da curva mestra do módulo dinâmico dos ligantes. ....                             | 84  |
| Tabela 4.9- Coeficientes obtidos do ensaio LAS para os ligantes em estudo. ....   | 85  |
| Tabela 4.10- Dados de entrada do ensaio LAS para o modelo de fadiga para o ligante convencional e os ligantes mofificados. ....                                 | 88  |
| Tabela 4.11- Resultados da densidade aparente das vigotas, Vv, VAM, RBV e GC das vigotas moldadas com a mistura MAB-P. ....                                     | 90  |
| Tabela 4.12- Resultados da densidade aparente, Vv, VAM, RBV e GC das vigotas moldadas com a mistura MAB-R25. ....   | 90  |
| Tabela 4.13- Resultados da densidade aparente, Vv, VAM, RBV e GC das vigotas moldadas com a mistura MAB-R30-1. ....   | 90  |
| Tabela 4.14- Resultados da densidade aparente, Vv, VAM, RBV e GC das vigotas moldadas com a mistura MAB-R30-2. ....   | 91  |
| Tabela 4.15- Resultados da densidade aparente, Vv, VAM, RBV e GC das vigotas moldadas com a mistura MAB-R30-3. ....   | 91  |
| Tabela 4.16- Resultado ANOVA para as vigas das misturas MAB-R25, MAB-R30-1 e MAB-R30-3, compactadas por placa vibratória, considerando o volume de vazios. .... | 92  |
| Tabela 4.17- Resultados dos ensaios de módulo dinâmico para duas amostras da mistura MAB-RJ-122. ....   | 94  |
| Tabela 4.18- Resultados dos ensaios de módulo dinâmico para três amostras da mistura MAB-P. ....  | 96  |
| Tabela 4.19- Variáveis do modelo sigmoidal e coeficientes do fator de translação. ....  | 101 |
| Tabela 4.20- Valores da inclinação da parte linear centra da curva mestra do módulo dinâmico das misturas asfalto-borracha. ....                                | 103 |
| Tabela 4.21- Coeficientes obtidos nos ensaios à flexão sob deformação controlada considerando critério de ruptura de 50% da rigidez inicial. ....               | 104 |
| Tabela 4.22- Valores dos coeficientes $k_1$ , $k_2$ e $k_3$ para a mistura com 30% de RAR. ....   | 107 |
| <br>  |     |
| Tabela A 1- Módulo dinâmico e ângulo de fase para o ligante CAP 50/70 condição virgem. ....   | 118 |
| Tabela A 2- Módulo dinâmico e ângulo de fase para o ligante AB-P condição virgem. ....  | 120 |
| Tabela A 3- Módulo dinâmico e ângulo de fase para o ligante AB-R25 condição virgem. ....  | 123 |
| Tabela A 4- Módulo dinâmico e ângulo de fase para o ligante AB-R30 condição virgem. ....  | 125 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela B 1- Módulo dinâmico e ângulo de fase para o ligante CAP 50/70 condição envelhecida.         | 128 |
| Tabela B 2- Módulo dinâmico e ângulo de fase para o ligante AB-P condição envelhecida. ....         | 130 |
| Tabela B 3- Módulo dinâmico e ângulo de fase para o ligante AB-R25 condição envelhecida. .          | 133 |
| Tabela B 4- Módulo dinâmico e ângulo de fase para o ligante AB-R30 condição envelhecida. .          | 136 |
| <br>  |     |
| Tabela C 1- Resultados dos ensaios de módulo dinâmico para três amostras da mistura MAB-R25. ....   | 138 |
| Tabela C 2- Resultados dos ensaios de módulo dinâmico para três amostras da mistura MAB-R30-1. .... | 139 |
| Tabela C 3- Resultados dos ensaios de módulo dinâmico para três amostras da mistura MAB-R30-2. .... | 140 |
| Tabela C 4- Resultados dos ensaios de módulo dinâmico para três amostras da mistura MAB-R30-3. .... | 141 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1- Partes constituintes dos pneus automotivos (Michelan, 2003 – modificado). .....   | 29 |
| Figura 2.2- Processo seco para modificação das misturas asfálticas com borracha (Dantas Neto, 2004).....  | 30 |
| Figura 2.3- Processo úmido para a fabricação do asfalto-borracha (Dantas Neto, 2004). .....   | 31 |
| Figura 2.4- Constituintes da RAR (a) asfalto, (b) granulado de borracha e (c) AMBS (Sousa <i>et al.</i> , 2012-modificado).....   | 34 |
| Figura 2.5- Reação de ativação na superfície da partícula de sílica por troca de cátions (Wu <i>et al.</i> ,2012). .....  | 35 |
| Figura 2.6- Modelo sugerido para descrever a estrutura e comportamento da RAR como modificadora do asfalto (Sousa <i>et al.</i> , 2012).....                                  | 35 |
| Figura 2.7- Asfaltos-borracha de 4ª geração utilizados na pesquisa, RAR a esquerda e <i>Pellet</i> a direita.....   | 36 |
| Figura 2.8- Representação esquemática das várias componentes de deformação (Sides <i>et al.</i> , 1985).....  | 37 |
| Figura 2.9- Comportamento de um material viscoelástico em ensaio sob solitação harmônica (Mello, 2008).....   | 38 |
| Figura 2.10- Exemplo de determinação da curva mestra de misturas asfálticas para a temperatura de referência de 25°C. ....  | 39 |
| Figura 2.11- (a) Incremento de deformação em degraus sugerido por Johnson (2010) e (b) incremento de deformação do LAS modificado sugerido por Hintz (2012).....              | 42 |
| Figura 2.12- Parâmetro de fadiga $N_f$ (normalizado para 1 milhão de ESALs) versus deformação cisalhante aplicada ao ligante (AASHTO TP 101, 2014 – modificado). ....         | 43 |
| Figura 2.13- Características dos ensaios à fadiga comumente utilizados (Di Benedetto <i>et al.</i> , 2004 – modificado). ....   | 44 |
| Figura 2.14- Configuração do equipamento de fadiga quatro pontos (AASHTO T 321/07 – modificado). ....   | 47 |
| Figura 2.15- Ilustração do formato de onda: senoidal e <i>haversine</i> . (ASTM D 7460/10 – modificado). ....   | 49 |
| Figura 3.1- Organização das atividades experimentais desenvolvidas nos agregados, ligantes e misturas asfálticas. ....  | 51 |
| Figura 3.2- (a) Ensaio de granulometria por peneiramento; (b) Ensaio de índice de forma e (c) Ensaio de abrasão. ....   | 54 |
| Figura 3.3- Paquímetro para a determinação de partículas alongadas e achatadas nos agregados graúdos. ....  | 54 |
| Figura 3.4- (a) Ensaio de massa específica dos agregados miúdos, ASTM C 128; (b) Ensaio de angularidade, ASTM C 1252 e (c) Ensaio do equivalente de areia, ASTM D 2419 . .... | 55 |
| Figura 3.5- (a) Ensaio de penetração e (b) ensaio do ponto de amolecimento. ....  | 56 |
| Figura 3.6- (a) Ensaio de viscosidade rotacional e (b) ensaio do ponto de fulgor. ....  | 56 |
| Figura 3.7- Compactador giratório SUPERPAVE.....  | 57 |
| Figura 3.8- Corpos de prova produzidos pela metodologia SUPERPAVE, duas réplicas por teor, 150 mm de diâmetro.....  | 58 |
| Figura 3.9- Curva de compactação para os corpos de prova 3A, 3B e média.....  | 59 |
| Figura 3.10- (a) Molde metálico e (b) Placa vibratória unidirecional, compactação.....  | 62 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.11- (a) Aferição da densidade e grau de compactação da placa e (b) Divisão preliminar da placa em vigas para o corte. ....   | 62 |
| Figura 3.12- (a) Realização do corte preliminar, (b) Corte em serra de bancada com gabarito adaptado e (c) Vigotas após os processos de corte.....  | 63 |
| Figura 3.13- (a) Placas superior e inferior do DSR, placa de 25 mm de diâmetro à esquerda e 8 mm de diâmetro à direita e (b) Equipamento com acessórios encaixados e amostra posicionada. | 64 |
| Figura 3.14- (a) Envelhecimento dos ligantes asfálticos, RTFOT e (b) molde e produção das amostras cilíndricas. ....  | 65 |
| Figura 3.15- Instalações do equipamento de fadiga a flexão quatro pontos: aquisitor de dados, câmara climática e reservatório de ar-comprimido. ....                                      | 69 |
| Figura 3.16- Detalhes do equipamento de fadiga à flexão quatro pontos. ....   | 69 |
| Figura 4.1- Curva granulométrica adotada e limites máximo e mínimo segundo a faixa do ADOT. ....  | 73 |
| Figura 4.2- Curva granulométrica adotada e limites máximo e mínimo segundo a faixa do DNIT. ....  | 74 |
| Figura 4.3- Curva de tendência para a variação dos parâmetros $V_v$ x Teor de ligante para a mistura asfalto-borracha modificada com ligante <i>Pellet</i> (MAB-P). ....                  | 77 |
| Figura 4.4- Curva de tendência para a variação dos parâmetros RBV x Teor de ligante para a mistura asfalto-borracha modificada com o ligante <i>Pellet</i> (MAB-P). ....                  | 77 |
| Figura 4.5- Curva de tendência para a variação dos parâmetros Densidade aparente x Teor de ligante para a mistura asfalto-borracha modificada com o ligante <i>Pellet</i> (MAB-P). ....   | 78 |
| Figura 4.6- Curvas mestras para o módulo cisalhante dinâmico ( $ G^* $ ) a temperatura de 52°C para o ligante CAP 50/70 e os ligantes modificados, condição virgem. ....                  | 79 |
| Figura 4.7- Curvas mestras para o módulo cisalhante dinâmico ( $ G^* $ ) a temperatura de 52°C para o ligante CAP 50/70 e os ligantes modificados, condição pós-RTFOT. ....               | 80 |
| Figura 4.8- Curva mestra para o módulo de cisalhamento dinâmico ( $ G^* $ ) a temperatura de 52°C para o ligante CAP 50/70 nas condições virgem e envelhecido. ....                       | 81 |
| Figura 4.9- Curva mestra para o módulo de cisalhamento dinâmico ( $ G^* $ ) a temperatura de 52°C para o ligante AB-P nas condições virgem e envelhecido. ....                            | 82 |
| Figura 4.10- Curva mestra para o módulo de cisalhamento dinâmico ( $ G^* $ ) a temperatura de 52°C para o ligante AB-R25 nas condições virgem e envelhecido. ....                         | 83 |
| Figura 4.11- Curva mestra para o módulo de cisalhamento dinâmico ( $ G^* $ ) a temperatura de 52°C para o ligante AB-R30 nas condições virgem e envelhecido. ....                         | 83 |
| Figura 4.12- Curva de tensão deformação para o CAP 50/70 e os ligantes modificados no ensaio LAS. ....  | 86 |
| Figura 4.13- Curva de dano característica do ensaio LAS para o ligante CAP 50/70 e os ligantes modificados. ....  | 87 |
| Figura 4.14- Vida de fadiga $N_f$ em função dos valores de deformação cisalhante aplicada no ligante convencional e demais ligantes modificados. ....                                     | 88 |
| Figura 4.15- Curva mestra na temperatura de referência de 25°C para a mistura MAB-R-122 e relação entre o fator de translação e a temperatura. ....                                       | 95 |
| Figura 4.16- Variação do ângulo de fase com a frequência reduzida para a mistura MAB-RJ-122. ....   | 95 |
| Figura 4.17- Curva mestra na temperatura de referência de 25°C para a mistura MAB-P e relação entre o fator de translação e a temperatura. ....   | 97 |
| Figura 4.18- Variação do ângulo de fase com a frequência reduzida para a mistura MAB-P. ....  | 97 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.19- (a) Comparação das curvas mestras para as duas amostras e média para misturas MAB-RJ-122 e (b) Comparação das curvas mestras para as três amostras e média para mistura MAB-P. ....        | 98  |
| Figura 4.20- Comparação das curvas mestras para as três amostras e média das misturas (a) MAB-R25; (b) MAB-R30-1; (c) MAB-R30-2 e (d) MAB-R30-3. ....   | 99  |
| Figura 4.21- Variação do ângulo de fase com a frequência reduzida (a) mistura MAB-R25; (b) mistura MAB-R30-1; (c) mistura MABR30-2 e (d) mistura MAB-R30-3. ....  | 100 |
| Figura 4.22- Curvas mestras do módulo dinâmico para todas as misturas em estudo. ....   | 102 |
| Figura 4.23- Curvas de Whöler que representa os resultados dos ensaios de fadiga à flexão nas misturas ensaiadas a temperatura de 20°C e frequência de 10 Hz. ....                                      | 105 |
| Figura 4.24- Comparação entre ensaios de fadiga para dois tipos de carregamento. ....   | 106 |
| Figura 4.25- Curvas de Whöler que representa os resultados dos ensaios de fadiga à flexão nas misturas midificadas com 30% de RAR ensaiadas a temperatura de 5; 12,5 e 20°C à frequência de 10 Hz. .... | 107 |

## LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

|              |  |
|--------------|--|
| 4PB          | <i>Four Point Bending;</i>   |
| AASHTO       | <i>American Association of State Highway and Transportation Officials;</i> |
| AB-P         | Asfalto-Borracha com <i>Pellet</i> ;                                       |
| AB-R25       | Asfalto-Borracha com 25% de RAR;   |
| AB-R30       | Asfalto-Borracha com 30% de RAR;   |
| ADOT         | Departamento de Transporte do Arizona;                                     |
| AMBS         | <i>Activated Mineral Binder Stabilizer;</i>                                |
| ANIP         | Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos;                           |
| ANOVA        | Análise de variância simples;  |
| APL          | <i>Advanced Pavement Laboratory;</i>                                       |
| <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;   |
| LAS          | <i>Linear Amplitude Sweep;</i>   |
| kN           | Quilo Newton;  |
| kPa          | Quilo Pascal;  |
| Máx          | Máximo;  |
| MPa          | Mega Pascal;   |
| Mín          | Mínimo;  |
| mm           | Milímetros;  |
| µm           | Micrómetro;  |
| µε           | Microdeformação;   |
| MPa          | Mega Pascal;   |
| MAB-P        | Mistura Asfalto-Borracha com <i>Pellet</i> ;                               |
| MAB-R25      | Mistura Asfalto-Borracha com 25% de RAR;                                   |
| MAB-R30      | Mistura Asfalto-Borracha com 30% de RAR;                                   |
| NCHRP        | <i>National Cooperative Highway Research Program;</i>                      |

|                |  |
|----------------|--|
| NM             | Módulo Normalizado;                        |
| PG             | <i>Performance Grade;</i>                  |
| PQI            | <i>Pavement Quality Indicator;</i>         |
| R <sup>2</sup> | Coefficiente de correlação linear;         |
| RAR            | <i>Reacted and Activated Rubber;</i>       |
| RBV            | Relação Betume Vazios;                     |
| RTFOT          | <i>Rolling Thin Film Oven Test;</i>        |
| 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>     |
| UnB            | Universidade de Brasília;                  |
| VAM            | Vazios no Agregado Mineral;                |
| VCB            | Vazios Com Betume;                         |
| VECD           | <i>Viscoelastic Continuum Damage;</i>      |
| V <sub>v</sub> | 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            |
| b       | largura da vigota                                  |
| $C_i$   | 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                         |
| h       | altura da vigota                                   |
| i       | número imaginário                                  |
| $k_j$   | coeficientes dos modelos                           |
| $L_e$   | comprimento da vigota entre apoios externos        |
| $L_i$   | comprimento da vigota entre apoios internos        |
| m       | inclinação da parte linear central da curva mestra |

|                    |  |
|--------------------|--|
| $N$                | número de ciclos                                   |
| $N_f$              | vida de fadiga                                     |
| $r$                | raio da amostra                                    |
| $S_0$              | rigidez à flexão inicial                           |
| $T$                | 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                    |
| $W_N$              | energia dissipada acumulada                        |
| $\alpha$           | coeficiente da lei de evolução do dano             |
| $\beta$            | parâmetro da curva sigmoideal                      |
| $\varepsilon$      | 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                          |
| $\delta_{MS}$      | parâmetro da curva sigmoideal                      |
| $\delta_S$         | deslocamento exercido pelo equipamento             |
| $\varphi$          | 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                       |
| $\gamma_{MS}$      | parâmetro da curva sigmoideal                      |
| $\vartheta$        | parâmetro da curva sigmoideal                      |
| $\pi$              | número Pi  |
| $\sigma$           | tensão   |
| $\sigma_0$         | amplitude de tensão                                |
| $\tau$             | tensão cisalhante                                  |
| $\nu$              | coeficiente de Poisson                             |

# 1 INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário no Brasil é responsável pela circulação de bens e pessoas apresentando 61,1% de participação na modalidade de transporte de cargas seguido pelos modais ferroviário (20,7%), aquaviário (13,6%), dutoviário (4,2%) e aéreo (0,4%). No transporte de passageiros, as rodovias predominam com participação de 95%. Entre os anos de 2006 e 2016 as rodovias pavimentadas da região Centro-Oeste do Brasil apresentaram crescimento de 67,6%, enquanto no mesmo período o crescimento da frota veicular na região foi de 129,6%. Em relação ao aspecto geral, 14,6% das rodovias federais e 39,3% das rodovias estaduais estão classificadas em condições ruins ou péssimas (CNT, 2016).

A causa dos danos atribuídos à malha rodoviária brasileira pode ser associada aos diversos fatores que agravam a condição do pavimento, como falta de manutenção, excesso de cargas, utilização de material que não apresenta a qualidade demandada em projeto, deficiência no controle de qualidade na construção, ausência de dispositivos de drenagem e geometria inadequada. Em relação ao revestimento, a principal causa de danos se relaciona à repetição do carregamento que leva ao trincamento por fadiga e à deformação permanente que se reflete em afundamentos excessivos nas trilhas de rodas.

Ao longo dos anos, muitas tecnologias ou metodologias de projeto evoluíram para melhorar o desempenho do pavimento, de forma a obter vida útil prolongada a um menor custo. Para pavimentos flexíveis, algumas destas melhorias foram feitas com a modificação do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), adicionando polímeros (EVA, SBS etc), fibras sintéticas e borracha granulada de pneus usados. A adição da borracha granulada de pneu teve início na década de 60, nos EUA e nos dias atuais é largamente empregada na indústria de pavimentação desse país, principalmente nos estados do Texas, Califórnia, Arizona e Flórida. No Brasil pesquisas recentes mostraram as melhorias da incorporação de borracha às misturas asfálticas (Specht, 2004; Dantas Neto, 2004; Pinheiro, 2004; Mello, 2008 e Camargo, 2016).

A utilização de asfalto-borracha leva a consideráveis melhorias ao pavimento, entre elas: redução do custo de manutenção das vias, aumento da resistência à derrapagem, diminuição da reflexão de trincas em reforços estruturais, além de redução nos níveis de poluição sonora quando se empregam misturas de graduação descontínua ou aberta (Way, 2000). Além de possibilitar a

melhoria do desempenho de pavimentos, a utilização da borracha granulada de pneus usados apresenta-se como alternativa de reciclagem, uma vez que no Brasil, segundo dados da ANIP (Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos) foram produzidos no terceiro trimestre do ano de 2016 cerca de 17,5 milhões de novos pneus (passeio e carga), em que 45% deste total destinaram-se à venda para reposição (ANIP, 2016).

A obtenção de asfalto-borracha se dava até recentemente por via seca ou por via úmida. Na via seca, os grãos de borracha são adicionados na usina como parte dos agregados. Na via úmida o ligante base é previamente modificado com borracha. A modificação do ligante pode ocorrer na usina de concreto asfáltico, imediatamente antes do lançamento no misturador (*field blend* ou via úmida local), ou imediatamente após a produção do ligante base na refinaria (*terminal blend* ou via úmida no terminal).

Diante deste contexto, novos materiais como os grânulos de borracha pré-ativados (RAR-*Reacted and Activated Rubber*) e borracha peletizada (*Pellet*) surgiram com a proposta de simplificação do processo de usinagem (como o realizado na mistura asfáltica obtida pelo via seca) e obtenção de desempenho da mistura asfáltica superior (como a mistura asfáltica obtida pela via úmida), 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 asfalto-borracha, normatizado pela ASTM D 6114/09.

A RAR é composta por um asfalto convencional, granulado fino de borracha e por um estabilizador de ligante mineral ativo (*Activated Mineral Binder Stabilizer - AMBS*) em porcentagens devidamente otimizadas (Sousa *et al.*, 2012). O *Pellet* é a combinação de um asfalto convencional base, borracha moída de pneus (BMP), modificadores, aditivos e *fillers* (Asphalt Magazine, 2014). Além de apresentar desempenho mecânico igual ou superior às misturas modificadas com polímeros e borracha granulada, os asfaltos-borracha de 4ª geração apresentam a grande vantagem de possibilitar a estocagem e transporte à temperatura ambiente, não necessitando de aquecimento prévio à mistura, sendo adicionados ao queimador ou misturador no momento da usinagem.

Pesquisas experimentais realizadas no Arizona (Kaloush *et al.*, 2002) e no Brasil (Wickboldt, 2005) comprovam que misturas com asfalto-borracha resistem à propagação de trincas oriundas de outras camadas (reflexão de trincas) e possuem maior resistência ao envelhecimento. O

trincamento por fadiga está entre os principais danos do revestimento asfáltico e ocorre devido às deformações de tração na fibra inferior do revestimento. A evolução de trincas causadas a partir desta solicitação pode levar a falha mecânica e estrutural do pavimento.

Recentemente, Camargo (2016), em seu trabalho de doutorado, estudou as propriedades de um ligante convencional e ligantes modificados com SBS e borracha granulada de pneus usados. O asfalto-borracha foi obtido pela via úmida (*field blend*) incorporado em uma mistura asfáltica de granulometria descontínua e aplicado pela primeira vez no Brasil em um trecho da rodovia RJ-122. Os resultados obtidos pelo autor constataam, tanto no ligante quanto na mistura asfáltica, os benefícios da adição de borracha granulada tanto para deformação permanente quanto para fadiga.

## 1.1 Relevância da pesquisa

Devido às grandes solicitações de tráfego e carregamento nas rodovias brasileiras é necessária a utilização de materiais que as tornem mais resistentes e duráveis, com baixo custo de produção. A utilização da borracha como modificadora do ligante asfáltico tem como finalidade a melhoria de propriedades físicas do ligante e dos parâmetros de desempenho das misturas asfálticas.

Os asfaltos-borracha de 4ª geração em estudo na execução desta pesquisa, RAR e *Pellet*, são materiais muito recentes no mercado de pavimentação, sendo que no Brasil a prática é pioneira. Frente aos desafios anteriormente citados no emprego de asfalto-borracha obtido pela via úmida (*field blend*) em que a modificação do ligante é um dos processos de fabricação da mistura em usina, no país é comum a utilização do asfalto-borracha estocável produzido em refinaria (*terminal blend*), que consome menor quantidade de borracha e adiciona óleos extensores durante sua produção. Apesar de facilitar a aplicação de asfalto-borracha durante a produção, misturas do tipo *terminal blend* apresentam desempenho mecânico inferior quando comparadas com misturas *field blend* (Shatnawi, 2011). Assim é necessário o estudo de novas tecnologias que facilitem e estimulem a aplicação de asfalto-borracha no Brasil, bem como a viabilidade da produção destes novos materiais no país.

Historicamente, as propriedades empíricas dos ligantes asfálticos tem sido utilizadas para indicar o desempenho de misturas asfálticas. Airey (1997), destaca que essas propriedades são

particularmente inadequadas para descrever o comportamento de ligantes modificados, pois a modificação de um ligante pode conduzir a significativas alterações das suas propriedades reológicas e estas não são necessariamente descritas por propriedades empíricas. O programa de pesquisa desenvolvido durante a década de 90 nos Estados Unidos, *Strategic Highway Research Program* (SHRP), que culminou nas especificações denominadas *Superior Performance Pavements* (SUPERPAVE), estabeleceu parâmetros de comportamento reológico que associados as propriedades empíricas dos ligantes passaram a especificar sua resistência à deformação permanente e à fadiga. Desde então até os dias atuais, há grande empenho por parte dos pesquisadores em estabelecer parâmetros de classificação e metodologias de ensaios que se aproximem das solicitações as quais são submetidos os pavimentos asfálticos. Assim, a pesquisa apresenta os resultados obtidos pelo reômetro de cisalhamento dinâmico que permite a caracterização reológica em uma ampla gama de temperaturas e tempos de carregamento e, mais recentemente, tem sido utilizado para a avaliação da resistência de ligantes à deformação permanente e fadiga.

Do mesmo modo, a mistura asfáltica é um material viscoelástico muito complexo, cujas propriedades mudam sob diferentes condições de carregamento e temperatura. Portanto, é importante uma caracterização adequada do desempenho de sua resposta a estas solicitações. Os ensaios de módulo dinâmico e os ensaios de fadiga à flexão em viga quatro pontos foram realizados para atingir o escopo desta pesquisa na caracterização das misturas asfálticas produzidas, gerando modelos específicos para os materiais utilizados.

## **1.2 Objetivos e metodologia**

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a influência dos asfaltos-borracha de 4ª geração, RAR e *Pellet*, nos resultados de desempenho à fadiga entre misturas asfálticas de granulometria descontínua usinadas à quente, produzidas em laboratório. São realizados ensaios de caracterização reológica e ensaios de fadiga em viga à flexão quatro pontos.

As propriedades reológicas dos asfaltos podem influenciar significativamente o desempenho das misturas asfálticas durante o processo de usinagem, compactação e vida de serviço. Assim, de forma a complementar as informações sobre o comportamento dos materiais utilizados, também se estabeleceu como objetivo o estudo das características reológicas e comportamento à fadiga do CAP convencional e dos ligantes modificados produzidos pela adição de RAR e *Pellet*.

A caracterização reológica permite a obtenção das curvas mestras das misturas asfálticas e dos ligantes, analisadas com base nos conceitos da Teoria da Viscoelasticidade e no princípio de superposição tempo-temperatura. Nos ligantes, os resultados dos ensaios acelerados de fadiga são utilizados para ajustar um modelo de fadiga baseado no princípio de dano contínuo viscoelástico (VECD). Os resultados dos ensaios de fadiga nas misturas são aplicados em modelos de previsão de vida de fadiga utilizando conceitos tradicionais.

Inicialmente é realizada a seleção dos materiais e ensaios de caracterização pela metodologia tradicional e SUPERPAVE, dos agregados, do ligante convencional e dos ligantes modificados com RAR e *Pellet*. Em seguida é conduzido o estudo de dosagem para a composição da mistura descontínua pela metodologia SUPERPAVE. Os corpos de prova prismáticos foram obtidos de placas de mistura asfáltica compactadas em um molde de dimensões 700 x 600 x 70 mm e cortadas após o resfriamento. Para atingir os objetivos, os ensaios de módulo dinâmico e fadiga nos ligantes foram conduzidos no reômetro de cisalhamento dinâmico Anton Paar SmartPave, modelo MCR 102. Os ensaios de fadiga e módulo dinâmico nas misturas asfálticas foram realizados no equipamento de flexão em viga quatro pontos da IPC Global.

### **1.3 Organização do trabalho**

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, os quais estão descritos a seguir.

No Capítulo 1 introduz-se o tema proposto para a pesquisa destacando seus principais pontos com um breve apanhado do estado da arte sobre o assunto. É apresentada a relevância da pesquisa e os objetivos a serem atingidos, bem como explica a estruturação da dissertação em capítulos.

No Capítulo 2 é realizada a revisão bibliográfica abordando temas inerentes a esta dissertação. Trata-se sobre asfaltos modificados, asfalto-borracha e as formas de incorporação de borracha à mistura/ligante asfáltico. São apresentados os conceitos e ensaios de fadiga e de caracterização reológica em ligantes e misturas asfálticas utilizando o reômetro de cisalhamento dinâmico e o ensaio de viga em flexão quatro pontos.

No Capítulo 3 apresenta-se a caracterização dos materiais que foram utilizados, a metodologia para obtenção dos corpos de prova prismáticos e para as realizações dos ensaios assim como descreve-se os equipamentos utilizados.

No Capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios realizados. É feita a análise desses resultados, visando à obtenção de elementos para as conclusões.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões da pesquisa e algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os princípios teóricos sob os quais foram desenvolvidas as análises desta dissertação. Primeiramente, são colocados os conceitos sobre a modificação de ligantes convencionais e os materiais utilizados. A teoria da viscoelasticidade, seus conceitos e aplicações na caracterização de ligantes e misturas asfálticas, é tratada de forma breve, bem como a superposição tempo-temperatura para obtenção da curva mestra de um determinado material.

Na segunda metade deste capítulo, consta o fenômeno da fadiga em ligantes e misturas asfálticas com as respectivas metodologias e ensaios recentes para tal determinação e, por fim, os diferentes tipos de ensaios realizados para a determinação da vida de fadiga para ligantes, utilizando-se o reômetro de cisalhamento dinâmico e também o equipamento de viga em flexão quatro pontos, para misturas asfálticas.

### 2.1 Cimento asfáltico de petróleo modificado

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.

Segundo Yildirim (2007) a execução de pavimentos flexíveis com modificação do asfalto por polímeros tem mostrado melhoria no desempenho destes, apresentando resistência à deformação permanente e trincamento térmico, diminuição dos danos de fadiga e menor suscetibilidade à ação térmica.

Lewandowski (1994) *apud* Pinheiro (2004) descreve que os papéis principais dos modificadores de ligante é o aumento da resistência dos asfaltos às deformações permanentes em altas temperaturas sem afetar as propriedades do asfalto em outras temperaturas. Isto é, conseguindo enrijecer o asfalto de forma que a resposta viscoelástica total seja reduzida ou aumentando a componente elástica do asfalto.

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 Airey (1997) 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.

## **2.2 Asfalto-borracha**

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 tem aderido a pesquisas e utilização de asfalto-borracha em obras de pavimentação.

Na década de 60 um engenheiro da cidade de Phoenix, Charles McDonald, começou a experimentar a adição de grânulos de borracha de pneus no asfalto. O processo de produção de asfalto-borracha foi então patenteado por McDonald, levando o seu nome ou simplesmente processo úmido (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).

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. 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 asfaltos-borracha como Specht (2004), Dantas Neto (2004), Pinheiro (2004), Wickboldt (2005), Mello (2008) e Camargo (2016).

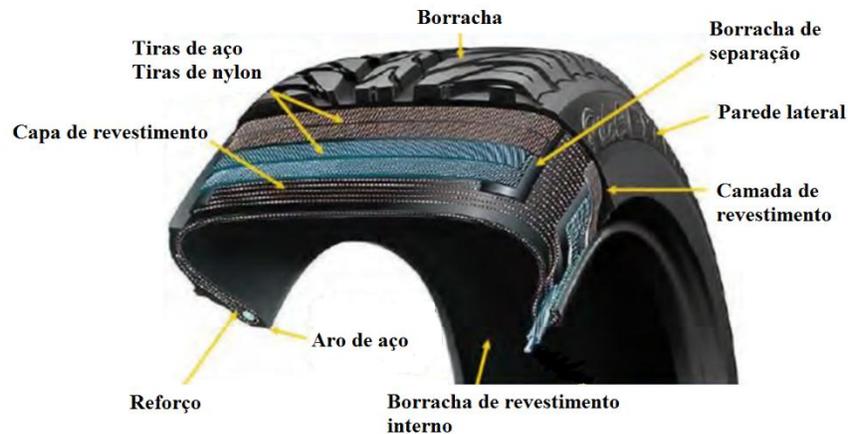
Specht (2004) ressalta que apesar das técnicas de execução e manutenção de pavimentos utilizando o asfalto-borracha serem basicamente as mesmas daquelas com misturas convencionais, devido às maiores viscosidades dos asfaltos-borracha, as bombas e canalizações devem possuir dimensões maiores que as usuais, bem como proteção térmica (em caso de temperaturas externas baixas). Ainda segundo o autor, o asfalto-borracha possui muitas possibilidades de utilização na engenharia rodoviária, praticamente as mesmas dos ligantes asfálticos convencionais e modificados com outros tipos de polímeros.

Embora a utilização de borracha de pneu seja bastante difundida e apresente crescentes avanços em países da Europa (Portugal e Suécia) e no Estados Unidos (Arizona, Califórnia e Flórida), no Brasil, data-se do ano 2001 a primeira aplicação de asfalto-borracha em uma rodovia, apesar do início das pesquisas com asfalto-borracha terem ocorrido no fim da década de 90 no CENPES/Petrobrás. Trata-se de um trecho da BR-116, localizado entre Guaíba e Camaquã no estado do Rio Grande do Sul (Greca Asfaltos, 2016). Ceratti (2011) registra o recapeamento de mais de 3000 km de rodovias brasileiras executadas com a tecnologia asfalto-borracha. Segundo pesquisa realizada pela Greca Asfaltos, a produção de asfalto-borracha no Brasil desde o ano de sua primeira execução até o ano de 2013 consumiu cerca de seis milhões de pneus inservíveis.

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 granulada 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 (Michelan, 2003 – modificado).

A borracha granulada utilizada na modificação dos ligantes asfálticos pode ser obtida por processos de moagem a temperatura ambiente e por 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 realizada 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 partida facilmente em uma prensa, na granulometria desejada. Em geral, as partículas da borracha granulada resultantes têm superfície específica menor do que aquelas de mesma distribuição granulométrica obtidas pelo processo de moagem à temperatura ambiente (RPA, 2011).

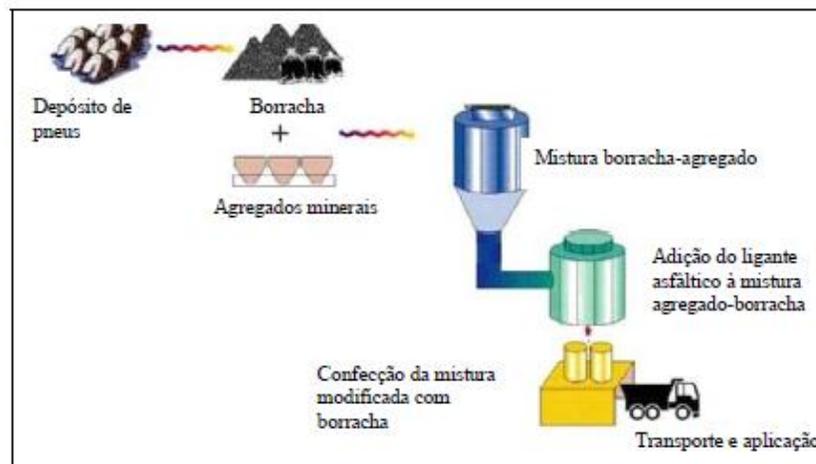
Dantas Neto (2004) estudou a influência do tipo da borracha granulada nas propriedades físicas dos ligantes asfalto-borracha. Segundo o autor a redução na superfície específica da borracha obtida pelo processo criogênico faz com que a absorção das frações leves existentes no ligante asfáltico convencional 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.

### 2.2.1 Processos de incorporação de borracha a misturas asfálticas

Takallou e Takallou (2003), descrevem três processos de incorporação de borracha granulada ao ligante asfáltico: o processo seco, o processo úmido e o processo terminal.

No processo seco ou asfalto-borracha de 1ª geração, a BMP é introduzida na mistura como parte dos agregados, sendo adicionados diretamente no misturador da usina de asfalto. 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. O método de incorporação pelo processo seco não requer a instalação de equipamentos especiais ou mudanças significativas na usina. A Figura 2.2 mostra o esquema de produção de asfalto-borracha pelo processo seco.



**Figura 2.2-** Processo seco para modificação das misturas asfálticas com borracha (Dantas Neto, 2004)

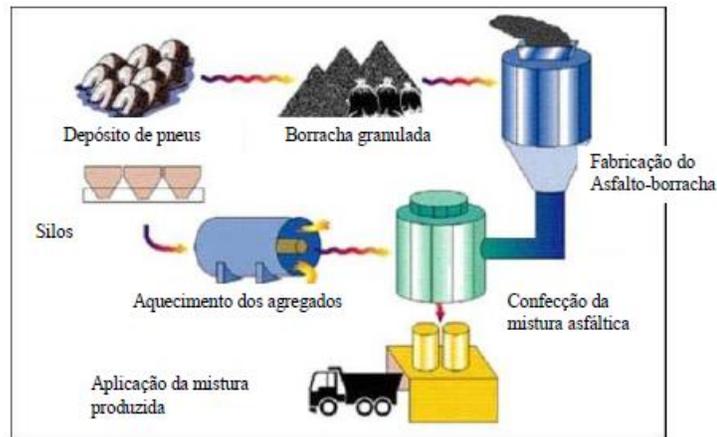
A ASTM D 6114/09 define o processo úmido que dá origem ao ligante asfalto-borracha como uma combinação de cimento asfáltico, BMP e outros aditivos, caso necessário. A borracha será misturada e interage com o ligante asfáltico aquecido, de forma a causar um inchamento das partículas de borracha. A norma 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 2.1 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.

Visser & Verhaeghe (2000) apontam que no processo úmido, ou asfalto-borracha de 2ª geração, 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 borracha granulada 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. A Figura 2.3 esquematiza o processo úmido para a fabricação dos asfaltos-borracha.

**Tabela 2.1-** Propriedades físicas dos asfaltos-borrachas segundo a ASTM D 6114/09.

| Propriedades físicas                  | Tipo I    | Tipo II   | Tipo III  |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 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       |



**Figura 2.3-** Processo úmido para a fabricação do asfalto-borracha (Dantas Neto, 2004).

Leite *et al.* (2000) citando Abdelrahman (1996) e outros autores, explicam que 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. 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.

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 & 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.

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.

### **2.2.2 Asfaltos-borracha de 4ª geração**

Atualmente existem diversos tipos de modificantes (*fillers*, fibras, polímeros e borracha granulada de pneu) que são adicionados aos ligantes asfálticos de forma a melhorar a resposta às solicitações impostas. Dentre os materiais recentemente empregados, estudos mostram que a borracha granulada de pneu vem apresentando os melhores resultados de desempenho como modificante do ligante asfáltico (Leite *et al.*, 2000, Bahia *et al.*, 2001, Bahia *et al.*, 2012,

Camargo, 2016). Apesar das vantagens obtidas pela modificação do ligante, sua fabricação requer instalação de equipamentos específicos na usina, além de elevada temperatura e tempo de mistura (cerca de 190 °C e tempo de mistura entre 45 minutos e 1 hora). Neste contexto, os asfaltos-borracha de 4ª geração, RAR e *Pellet*, surgiram de forma a simplificar o processo de obtenção de asfalto-borracha.

Sousa *et al.* (2012) definem a RAR como um extensor elastômero do asfalto que permite, quando adicionada a um asfalto convencional, obter propriedades superiores comparativamente a um asfalto modificado com polímeros e até mesmo outros asfalto-borracha.

Avanços com a utilização desta nova tecnologia de asfalto-borracha remontam a pesquisas realizadas com *Activated Mineral Binder Stabilizer* - AMBS, ou estabilizador de ligante mineral ativo. O AMBS foi desenvolvido para evitar o escorrimento excessivo do ligante em misturas do tipo 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 água, resistência à deformação em altas temperaturas, resistência ao trincamento em baixas temperaturas e aumento na vida de fadiga (Wu *et al.*, 2012).

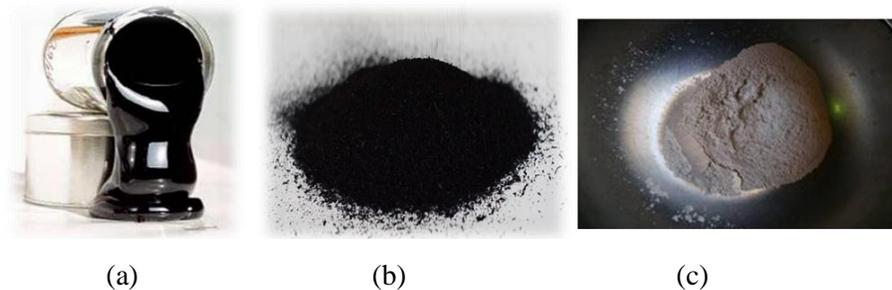
A RAR é composta por asfalto convencional, granulado fino de borracha (usualmente passando na peneira Nº 30) e por AMBS em porcentagens devidamente otimizadas. Sousa *et al.* (2012) descrevem os constituintes da RAR:

- Ligante asfáltico: asfaltos com índice de penetração entre 100/200 a 35/50, ou CAP 20, ou PG 52 a PG 70, podem ser utilizados. A utilização de asfaltos menos viscosos permite a utilização de temperaturas de mistura e de compactação mais baixas, da mesma ordem das utilizadas para as misturas convencionais sem se perder uma adequada trabalhabilidade, apesar da adição do granulado de borracha;
- Granulado de borracha: é usualmente composto por borracha proveniente de pneus usados que são reciclados e transformados em granulado ou pó de borracha obtido por um determinado processo de reciclagem. Os pneus usados são habitualmente provenientes de veículos leves e comerciais, devendo ser removidos os arames de aço e fibras antes da trituração. Para a produção de RAR, as partículas de borracha trituradas devem ter uma dimensão inferior a 1,0 mm. O

tamanho máximo das partículas de borracha é determinado pela peneira N° 30. A borracha utilizada pode ser obtida por meio do processo de reciclagem criogênica ou ambiental;

- O estabilizador de ligante mineral ativo (AMBS): consiste em micro-partículas de sílica mineral (dimensão igual ou inferior a 40  $\mu\text{m}$ ), as quais são um resíduo 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.

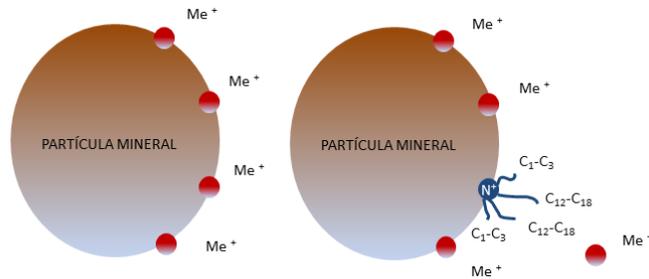
Em média uma mistura típica de RAR contém 62% de borracha, 22% de asfalto convencional e 16% de AMBS. Para um envolvimento final de cada partícula de RAR, após o seu arrefecimento, é adicionado 10 % de AMBS no misturador. A Figura 2.4 ilustra os componentes da RAR.



**Figura 2.4-** Constituintes da RAR (a) asfalto, (b) granulado de borracha e (c) AMBS (Sousa *et al.*, 2012-modificado).

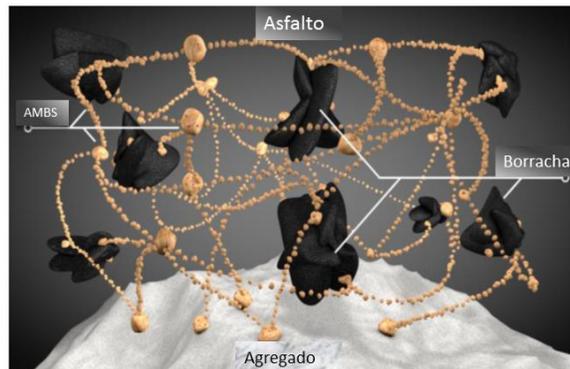
Wu *et al.* (2012) descrevem o mecanismo microscópico da modificação do AMBS em que a reação de ativação ocorre mediante a substituição dos íons metálicos presentes na superfície do mineral por moléculas de cadeia longa (ligações de carbono C1-C3 e C12-C18) como ilustrado na Figura 2.5. Essa troca proporciona uma malha de interação entre a partícula de mineral e o asfalto, aumentando a viscosidade da mistura.

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 AMBS, tal interação cria uma malha com grande caráter apolar, favorecendo então a aproximação e conseqüente interação hidrofóbica entre o asfalto e a borracha.



**Figura 2.5-** Reação de ativação na superfície da partícula de sílica por troca de cátions (Wu *et al.*,2012).

Segundo Sousa *et al.* (2012) a RAR é igualmente envolvida com uma fórmula especial de AMBS 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, o material elastómero e as partículas de AMBS, como ilustra a Figura 2.6. Tal estrutura não pode ser formada quando apenas se mistura asfalto com borracha (sem AMBS) como sucede na atual tecnologia de produção de asfalto-borracha pelo processo úmido ou terminal.



**Figura 2.6-** Modelo sugerido para descrever a estrutura e comportamento da RAR como modificadora do asfalto (Sousa *et al.*, 2012).

O *Pellet* é um sistema de modificação do ligante diferente da empregada pela modificação direta por polímeros e por borracha granulada. Segundo o fabricante, nesse sistema de produção, borracha granulada de pneus usados e polímeros são adicionados ao ligante, assim como outros aditivos (fibras e fílers minerais), anteriormente ao processo de peletização.

O material resultante da peletização pode ser ensacado e estocado na forma seca à temperatura ambiente, não necessitando aquecimento constante. O *Pellet* pode ser formulado com a concentração exata de ligante asfáltico e aditivos para produzir misturas asfálticas à quente, ou

pode ser utilizado proporcionalmente à massa da mistura, modificando o ligante asfáltico durante a produção da mistura.

Ambos materiais apresentam vantagens de logística no transporte e produção, pelo fato de poderem ser armazenados de forma ensacada em grandes quantidades, não dependerem instalações específicas na planta de usinagem e não necessitarem 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.



**Figura 2.7-** Asfaltos-borracha de 4ª geração utilizados na pesquisa, RAR a esquerda e *Pellet* a direita.

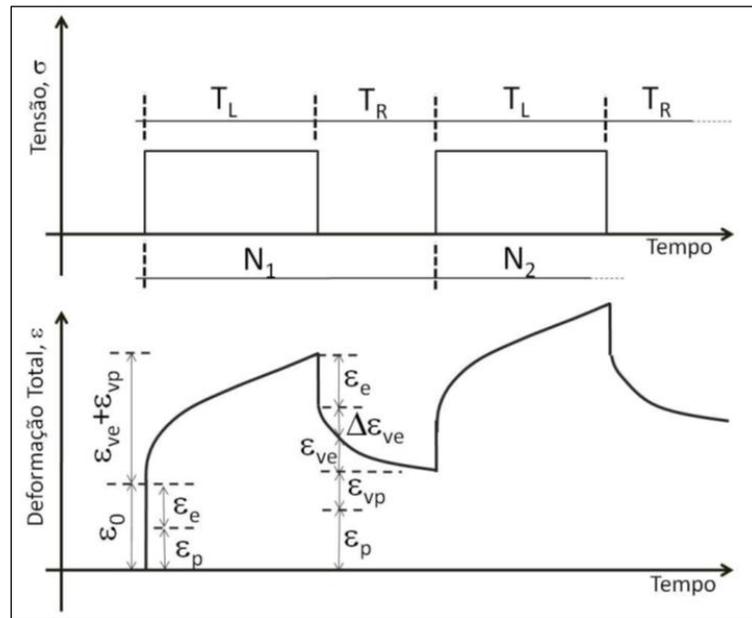
### **2.3 Comportamento viscoelástico de ligantes e misturas asfálticas**

A fim de prever o comportamento de qualquer material é necessário entender sua resposta às solicitações de tensão-deformação. Para determinar como um dado material responderá a um carregamento aplicado, podem ser realizados ensaios de laboratório, e os resultados serem resumidos em uma forma pronta a ser aplicada em métodos de dimensionamento (Tayebali *et al.*, 1994).

Christensen (2003) *apud* Mello (2008) explica que os materiais que possuem o comportamento viscoelástico estão fora do escopo de teorias como a elasticidade linear e a viscosidade. Os materiais viscoelásticos possuem a propriedade de dissipar e armazenar energia mecânica. Um material com essas características exibe uma elasticidade instantânea e também características de fluência, sendo necessária uma teoria específica que contemple particularidades da elasticidade e da viscosidade.

Sides *et al.* (1985) mostram a separação das 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 ( $\varepsilon_e$ ) e plástica ( $\varepsilon_p$ ), ocorre instantaneamente. Em seguida, deformações viscoelásticas ( $\varepsilon_{ve}$ ) e viscoplásticas ( $\varepsilon_{vp}$ ) 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. A Figura 2.8 representa as várias componentes de deformação.



**Figura 2.8-** Representação esquemática das várias componentes de deformação (Sides *et al.*, 1985).

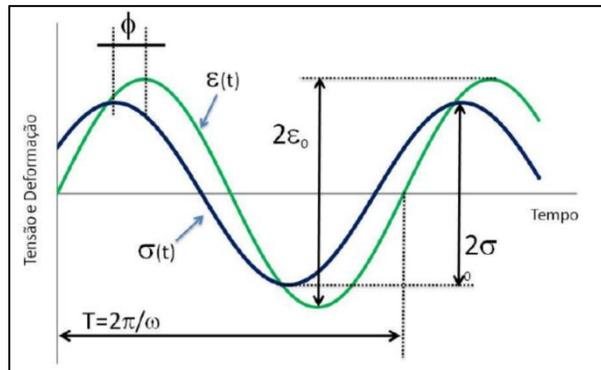
As propriedades mecânicas de um material viscoelástico dependem do tempo de carregamento e esta dependência pode ser observada na realização de ensaios dinâmicos. Quando materiais viscoelásticos são submetidos a ensaios dinâmicos sob carregamento harmônico ou oscilatório, a caracterização é realizada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

A Figura 2.9 ilustra o comportamento de um material viscoelástico. Quando submetido a uma deformação senoidal Equação 2.1 este apresenta uma resposta de tensão também senoidal Equação 2.2, porém defasada por certo ângulo de fase ( $\varphi$ ).

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (2.1)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (2.2)$$

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.



**Figura 2.9-** Comportamento de um material viscoelástico em ensaio sob solitação harmônica (Mello, 2008).

Há diferentes simbologias adotadas para caracterizar o comportamento de um material viscoelástico. Uma vez que a característica viscoelástica da mistura é decorrente do ligante asfáltico, é correto assumir que o comportamento relatado e as equações utilizadas a seguir, para a mistura asfáltica sejam cabíveis também ao ligante asfáltico, realizando as devidas alterações na simbologia.

O módulo complexo, possui partes reais e imaginárias e é definido por:

$$E^* = E' + i \cdot E'' \quad (2.3)$$

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos(\varphi) = |E^*| \cdot \cos(\varphi) \quad (2.4)$$

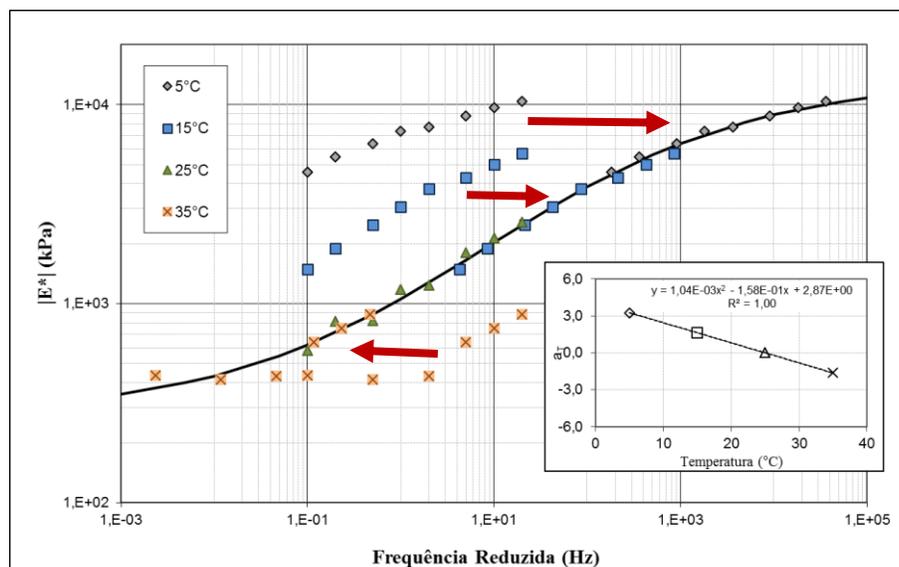
$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \text{sen}(\varphi) = |E^*| \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (2.5)$$

A parcela  $E'$  é conhecida como módulo de armazenamento e a parcela  $E''$  é conhecida como módulo de perda como mostra as Equações 2.4 e 2.5, respectivamente. 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:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2.6)$$

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. A Figura 2.10 mostra o esquema de obtenção da curva mestra nos ensaios de módulo dinâmico em quatro temperaturas e oito frequências.



**Figura 2.10-** Exemplo de determinação da curva mestra de misturas asfálticas para a temperatura de referência de \$25^\circ\text{C}\$.

A determinação dos fatores de translação \$a\_T\$ (*shift factors*) pode ser feita por diferentes processos, sendo que para esta pesquisa utilizou-se o ajuste de uma função sigmoideal:

$$\log|E^*| = \delta_{MS} + \frac{\vartheta}{1 + \exp\left(\beta + \gamma_{MS} \cdot \log \frac{1}{\omega_r}\right)} \quad (2.7)$$

onde  $\delta_{MS}$  é o valor mínimo do módulo dinâmico  $|E^*|$ ,  $\delta_{MS} + \vartheta$  é o valor máximo do módulo dinâmico  $|E^*|$ ,  $\beta$  e  $\gamma_{MS}$  são parâmetros que descrevem a forma do modelo sigmoideal e  $\omega_r$  é a frequência reduzida. Para as misturas asfálticas Sotil (2005) *apud* Mello (2008) afirma que os coeficientes  $\delta_{MS}$  e  $\vartheta$  dependem da granulometria, da quantidade de ligante e de vazios na amostra. Já os coeficientes  $\beta$  e  $\gamma_{MS}$  estão relacionados com as características do ligante e com a magnitude de  $\delta_{MS}$  e  $\vartheta$ .

O fator de translação  $\alpha_T$  define o deslocamento necessário a uma determinada temperatura em que:

$$\alpha_T = \frac{t}{t_r} = \frac{\omega_r}{\omega} \quad (2.8)$$

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

$$\log \alpha_T(T_i) = a.T_i^2 + b.T_i + c \quad (2.9)$$

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

## 2.4 Comportamento à fadiga em ligantes asfálticos

No *Strategic Highway Research Program* (SHRP), no fim dos anos 90 durante o desenvolvimento das especificações SUPERPAVE, houve grande empenho por parte dos pesquisadores em criar parâmetros que caracterizassem os fenômenos de fadiga e deformação permanente em ligantes asfálticos. A especificação para caracterização da resistência à fadiga do ligante asfáltico, partiu do pressuposto de que ligantes menos viscosos e mais elásticos apresentavam maior resistência à fadiga. Assim foi estabelecido um limite máximo de 5000 kPa para o valor de  $|G^*| \sin \delta$ , parâmetro de fadiga, (em que  $|G^*|$  é o módulo de cisalhamento dinâmico e  $\delta$  é o ângulo de fase), medidos com uma amplitude de deformação de 1% e frequência de 10 rad/s no *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) ou reômetro de cisalhamento dinâmico.

A especificação não considera a estrutura do pavimento ou o nível do tráfego (por apresentar resultados medidos em um nível de deformação muito baixa durante poucos ciclos de

carregamento) e, além disso, os parâmetros foram desenvolvidos baseados na ideia de que os ligantes apresentavam um comportamento delimitado à região da viscoelasticidade linear, quando na verdade o fenômeno ocorre sob grandes deformações, sob domínio da viscoelasticidade não-linear (Bahia *et al.*, 2001).

Assim, buscando soluções para as limitações da especificação, Bahia *et al.* (2001) no Projeto 9-10 do *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) propuseram o ensaio chamado *time sweep*, ou varredura de tempo. O método consiste em aplicar carregamento senoidal cíclico a uma amplitude fixada em uma amostra de ligante asfáltico no DSR. No ensaio, a geometria geralmente empregada é a de placas paralelas com 8 mm de diâmetro com um espaçamento fixo de 2 mm entre as placas. As mudanças ocorridas em  $|G^*|$  e  $\delta$  no número de ciclos são utilizados para determinar a vida de fadiga. O procedimento permite a seleção da amplitude do carregamento, considerando assim a estrutura do pavimento e o nível do tráfego. O *time sweep* tem mostrado uma boa correlação com os resultados de vida de fadiga de misturas asfálticas, indicando que é capaz de capturar a contribuição do ligante asfáltico sobre a resistência à fadiga das misturas asfálticas (Bahia *et al.*, 2001). Apesar das vantagens, este ensaio pode ser inviável pelo período de tempo necessário para que o material seja levado à ruptura. É importante lembrar que não há especificações que normatizam a execução deste ensaio.

Recentemente, Johnson (2010) *apud* Hintz (2012) desenvolveu o ensaio *Linear Amplitude Sweep* (LAS) a fim de substituir o *time sweep*. O ensaio LAS é similar ao *time sweep* no que consiste da aplicação do carregamento cíclico no DSR utilizando a mesma geometria de ensaio. No entanto, no ensaio LAS, as amplitudes de carregamento são sistematicamente aumentadas para acelerar o dano. Além disso, a teoria do dano contínuo viscoelástico (VECD - *Viscoelastic Continuum Damage*) é utilizado na análise dos dados e na determinação do modelo de fadiga do ligante asfáltico. O ensaio é dividido em duas etapas, na primeira etapa que compreende a varredura de frequência, as propriedades viscoelásticas na região linear são determinadas com o intuito de estabelecer uma referência para a avaliação do acúmulo de dano na amostra. Na segunda etapa, que compreende a varredura de amplitude de deformação, é realizado um ensaio em que o material é levado à ruptura determinando assim os parâmetros do modelo de fadiga.

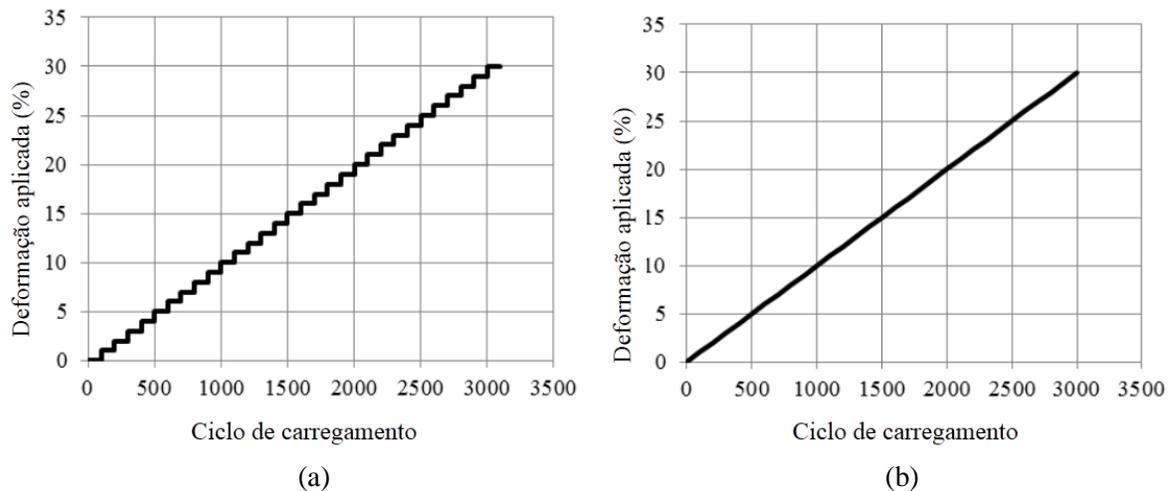
Hintz (2012) em sua tese de doutorado propôs algumas modificações no ensaio LAS criado por Johnson (2010). No seu estudo a autora concluiu que ocorrem macrofraturas durante a

realização do ensaio, devido às mudanças relativamente grandes e bruscas na amplitude de deformação. Assim, Hintz (2012) propôs que os resultados fossem analisados utilizando o modelo baseado em teorias de fratura ao invés do dano contínuo viscoelástico e que o aumento do carregamento ocorra de maneira linear em cada ciclo de carregamento, como mostra a Figura 2.11.

Atualmente, a proposta feita por Hintz (2012) em relação à sequência de carregamento foi incorporada à normatização do ensaio LAS que é protocolizada pela AASHTO TP 101/14. A norma utiliza a lei de fadiga:

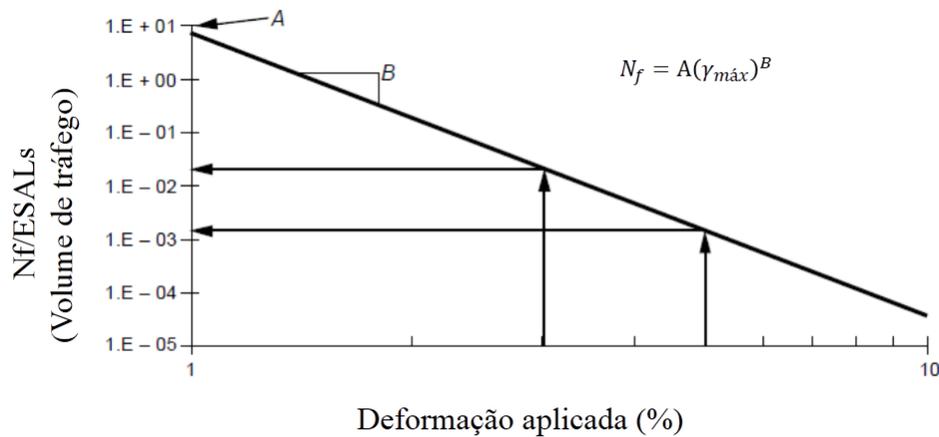
$$N_f = A \cdot (\gamma_{m\acute{a}x})^B \quad (2.8)$$

onde os parâmetros  $A$  e  $B$  são característicos do material e  $\gamma_{m\acute{a}x}$  é a deformação máxima esperada para uma dada estrutura do pavimento.



**Figura 2.11-** (a) Incremento de deformação em degraus sugerido por Johnson (2010) e (b) incremento de deformação do LAS modificado sugerido por Hintz (2012).

Os resultados segundo a Equação 2.10 podem ser visualizados como é mostrado na Figura 2.12 em que são plotados o parâmetro de fadiga  $N_f$  (normalizado para 1 milhão de ESALs) versus a deformação de cisalhamento aplicada em uma escala log-log.



**Figura 2.12-** Parâmetro de fadiga  $N_f$  (normalizado para 1 milhão de ESALs) versus deformação cisalhante aplicada ao ligante (AASHTO TP 101, 2014 – modificado).

## 2.5 Comportamento à fadiga em misturas asfálticas

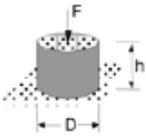
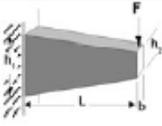
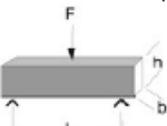
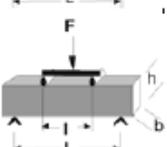
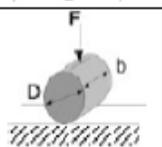
O dano em pavimentos flexíveis devido a tensões e deformações causadas pelo tráfego e por fatores ambientais é manifestado em grande parte dos casos em trincamento por fadiga. Segundo Tayebali *et al.* (1994), a resitência à fadiga das misturas asfálticas é a habilidade de suportar carregamentos repetidos em flexão sem que haja o desenvolvimento de trincas. Devido a isto, as características que envolvem o comportamento à fadiga da estrutura de um pavimento são consideradas como um importante parâmetro de projeto.

Witczak (1975) e Bounnare *et al.* (1980) ressaltam que as deformações e tensões críticas que ocasionam a fadiga também são em 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.

Di Benedetto *et al.* (2004) afirmam a importância de ensaios laboratoriais para a determinação dos modelos de fadiga, 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 de ruptura. Durante os ensaios são aplicadas cargas repetidas com diferentes níveis de tensão ou deformação, devendo reproduzir o mais próximo possível as condições estabelecidas em campo para as misturas asfálticas.

Existem diferentes tipos de ensaios para determinação da vida de fadiga em misturas asfálticas atualmente. Estes podem ser uniaxiais de tração/compressão 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. A Figura 2.13 apresenta 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.

| Tipo Teste | Geometria   | Tipo Carregamento                       |
|------------|---|---|
| T/C        |   | Tensão – Compressão<br>Homogêneo        |
| 2PB        |  | Flexão - dois pontos<br>Não Homogêneo   |
| 3PB        |  | Flexão - três pontos<br>Não Homogêneo   |
| 4PB        |  | Flexão - quatro pontos<br>Não Homogêneo |
| IDT        |  | Tração indireta<br>Não Homogêneo        |

**Figura 2.13-** Características dos ensaios à fadiga comumente utilizados (Di Benedetto et al., 2004 – modificado).

Geralmente o ensaio de fadiga consiste em submeter amostras de misturas asfálticas a um carregamento cíclico, registrando o número de ciclos para a ruptura. A ruptura pode ser definida

de várias formas e o valor estabelecido dependerá da forma de carregamento. Comumente no ensaios realizados sob o modo de deformação controlada, diversos autores definem a ruptura quando o módulo de rigidez é reduzido a metade de seu valor inicial (Pronk & Hopman, Tayebali *et al.*, 1994 e Van Dijk & Visser, 1977).

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 2.11, relaciona o número de ciclos com a amplitude de deformação inicial imposta ao material:

$$N_f = k_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_0}\right)^{k_2} \quad (2.9)$$

em que  $N_f$  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 2.12:

$$N_f = k_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_0}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{1}{S_0}\right)^{k_3} \quad (2.10)$$

em que  $S_0$  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). Este conceito tem por base a característica materiais viscoelásticos, como visto no item 2.3 deste Capítulo, nos quais ocorre o fenômeno da histerese. 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 & Visser (1977)

também reportaram que os resultados dos diferentes tipos de ensaios dinâmicos em vigas poderiam ser descritos para uma mistura específica por uma relação entre os ciclos para ruptura,  $N_f$ , e a energia dissipada acumulada por unidade de volume até o ponto de fadiga,  $W_N$ :

$$W_N = A \cdot N_f^z \quad (2.11)$$

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.

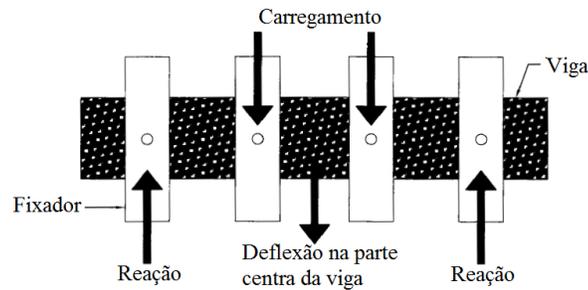
O modelo desenvolvido por Tayebali *et al.* (1994) baseado na energia dissipada inicial que ocorre durante os ensaios de fadiga a flexão, relaciona o número de ciclos até a ruptura com a porcentagem de vazios preenchidos com ligante:

$$N_f = 2,365 \cdot \exp^{0,069 \cdot VAM} \cdot w_0^{-1,882} \quad (R^2 = 0,76) \quad (2.12)$$

### 2.5.1 Ensaio de fadiga à flexão em viga quatro pontos

Os ensaios de fadiga são influenciados pelas condições de carregamento e pelas configurações utilizadas, por isso, é extremamente importante a calibração dos transdutores, o alinhamento das faces dos corpos de prova, a adequação dos sinais de carregamento impostos, a rigidez do equipamento (Di Benedetto *et al.*, 2004).

O ensaio de fadiga em viga quatro pontos é normatizado pela AASHTO T 321, ASTM D 7460 e pela norma européia EN 12697-24. O ensaio é um mecanismo de avaliação em que o material trabalha apenas a flexão, sem influência de esforços normais ou cortantes. O 4PB, outro nome dado ao ensaio, é realizado de forma a permitir que no centro da viga haja momento constante máximo ou mínimo (quando da inversão do sentido da força) e cortante igual a zero, em outras palavras, condição de flexão pura. A Figura 2.14 mostra o esquema de aplicação de carga e reação do equipamento.



**Figura 2.14-** Configuração do equipamento de fadiga quatro pontos (AASHTO T 321/07 – modificado).

A inversão do sentido da força, que ocasiona os valores de momentos máximo e mínimo, gera tração nas fibras inferiores da viga por um determinado momento e durante o mesmo intervalo de tempo, gera tração nas fibras superiores. O tempo total entre as inversões do sentido da força equivale a um ciclo. Tayebali *et al.* (1994) relatam que, desta forma, o ensaio é considerado adequado para representar o comportamento de campo em relação à resistência a fadiga das misturas asfálticas.

A IPC Global desenvolveu um mecanismo que possibilita a aplicação do carregamento harmônico contínuo à flexão em vigotas, de modo que os apoios estejam sem restrições de rotação e translação e que seja possível reposicionar o corpo de prova na posição original.

Ressalta-se que no Brasil não existe normativas quanto à realização deste ensaio, sendo necessário a utilização de normativas especificadas por outros países. A seguir é realizada a descrição das principais normas para o ensaio de fadiga em viga quatro pontos para misturas asfálticas, destacando as principais características e configurações.

### **Norma americana AASHTO T 321/07**

Os ensaios de fadiga a flexão realizados segundo as recomendações da AASHTO T 321 devem ocorrer sob pulso de carregamento senoidal, com valores de frequência variando entre 5 e 10 Hz. As amostras devem possuir todas os lados faceados e superfícies paralelas tendo dimensões de  $380 \pm 6$  mm de comprimento,  $50 \pm 6$  mm de altura e  $63 \pm 6$  mm de largura.

O equipamento deverá submeter as amostras à flexão em quatro pontos com livre rotação e translação horizontal em todos os carregamentos e pontos, forçando a amostra a voltar a sua posição original (deflexão igual a zero) no fim de cada pulso de carregamento. Durante cada ciclo de carregamento o sistema de aquisição deverá ser capaz de medir a deflexão da amostra,

computar sua deformação e ajustar o carregamento aplicado pelo dispositivo de forma que esta permaneça sob nível de deformação constante em cada ciclo.

A norma determina a utilização de um gabarito para o travamento das distâncias entre os pontos de apoio da viga e o modo de inserção e fixação da amostra no equipamento. Primeiramente, os fixadores externos devem ser fechados aplicando pressão suficiente para manter a amostra no local, e em seguida os fixadores internos devem ser fechados.

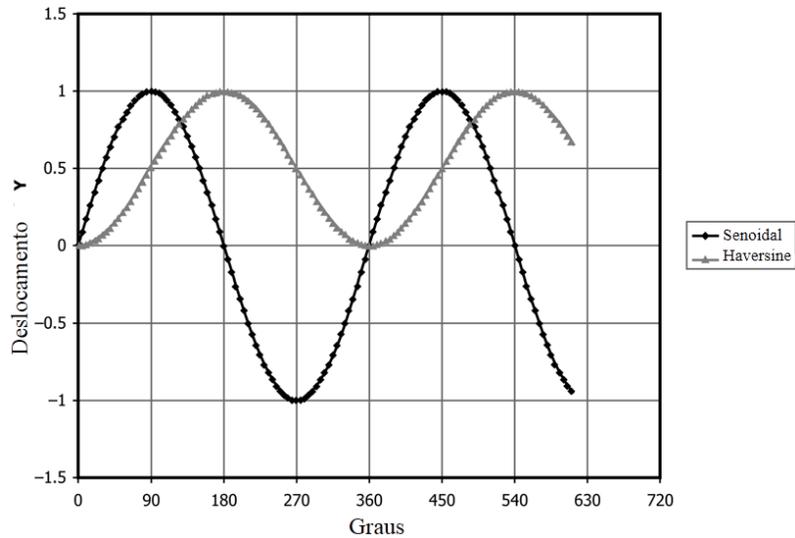
As amostras devem ser mantidas em uma temperatura de  $20,0 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  durante o ensaio, sendo que para a garantia de estabilidade da temperatura, as amostras devem ser colocadas em uma câmara climática duas horas antes do início do ensaio.

O nível de deformação aplicado ao corpo de prova deve variar de 250 a  $750\mu\epsilon$ , a rigidez inicial é determinada ao fim de 50 ciclos de carga. A ruptura, assim como o término do ensaio, é definida na norma como a redução de 50% da rigidez inicial do corpo de prova.

A norma disponibiliza por fim as equações para se determinar a máxima tensão de tração, máxima deformação de tração, rigidez à flexão, ângulo de fase, energia dissipada e energia dissipada acumulada.

### **Norma americana ASTM D 7460/10**

Exigindo os mesmo aparato de dispositivo e aquisição de dados recomendado pela norma anterior, segundo a ASTM D7460 o ensaio deve ser realizado com pulso de carregamento *haversine* mostrado na Figura 2.15, à temperatura controlada de  $20 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  podendo apresentar frequência de carregamento entre 5 e 10 Hz. Na realização do ensaio com o modo de deformação controlada para misturas asfálticas o nível de deformação varia comumente entre 200 e  $800\mu\epsilon$ .



**Figura 2.15-** Ilustração do formato de onda: senoidal e *haversine*. (ASTM D 7460/10 – modificado).

A amostra deve apresentar dimensões de  $380 \pm 6$  mm de comprimento,  $50 \pm 2$  mm de altura e  $63 \pm 2$  mm de largura. Para minimizar a dispersão dos resultados, a norma recomenda que sejam marcados o topo e a lateral das amostras, em relação ao processo de compactação. A norma determina a produção de nove corpos de prova idênticos e a realização do ensaio de fadiga em diferentes níveis de deformação em no mínimo seis amostras, podendo as demais serem utilizadas para eventual perda de amostra ou discrepância nos resultados. Também é recomendado que as amostras sejam mantidas na câmara climática em temperatura estabilizada a  $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$  por um período de duas horas de forma que estas atinjam a temperatura de ensaio.

O ponto de ruptura corresponde ao máximo valor do módulo normalizado x ciclo de carga quando plotado versus número de ciclos. O módulo normalizado (NM) é calculado segundo:

$$NM = \frac{S_i \cdot N_i}{S_0 \cdot N_0} \quad (2.13)$$

em que  $S_i$  é a rigidez à flexão da viga para o ciclo  $i$  em  $Pa$ ,  $N_i$  é o ciclo  $i$ ,  $S_0$  é a rigidez à flexão inicial da viga em  $Pa$  estimado no ciclo de número 50 e  $N_0$  é o real número do ciclo em que a rigidez à flexão inicial da viga é determinada.

#### **Norma européia EN 12697-24:2004**

A norma EM 12697-24 é abrangente em relação a diversos ensaios de fadiga em flexão permitindo a utilização de diferentes procedimentos. Em relação ao ensaio de fadiga em viga a flexão quatro pontos, deve ser adotado um carregamento senoidal, porém a norma não fixa a

frequência para a realização dos ensaios. A escolha da frequência, que pode variar de 5 a 60 Hz, está diretamente relacionada com a velocidade da carga existente em campo e varia com a profundidade no interior do pavimento.

Os ensaios podem ser realizados a deformação ou tensão controlada e devem ser estabelecidos três diferentes níveis de deformação ou tensão. Recomenda-se a realização do ensaio em seis amostras para cada nível, sendo os níveis de tensão e deformação devem ser escolhidos de maneira que a vida de fadiga fique entre  $10^4$  a  $2 \times 10^6$  ciclos. A rigidez à flexão inicial é determinada no ciclo de carga número 100, e o critério de ruptura depende do modo de carregamento, sendo correspondente a 50% da rigidez inicial ou quando ocorre o rompimento total do corpo de prova.

As dimensões da altura e da base das amostras devem ser de, no mínimo, três vezes maior que o diâmetro máximo dos agregados. O comprimento efetivo, distância entre os fixadores externos, deve ser no mínimo seis vezes o maior valor entre a altura ou a largura e, ainda, recomenda que o comprimento total não deva exceder o comprimento efetivo em mais de 10%.

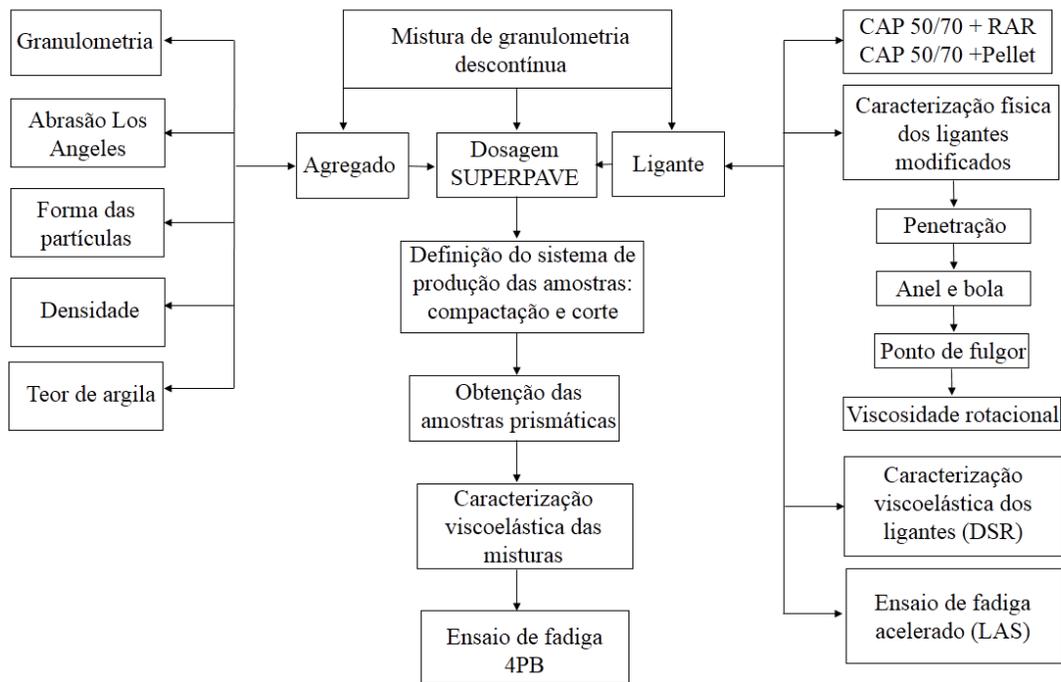
Sendo o período de aclimatização máximo igual a seis horas, a norma preconiza que para ensaios a temperatura de  $0^{\circ}\text{C}$  as amostras devem ser mantidas na câmara climática por um período mínimo de duas horas antes do início do ensaio e no caso de temperatura de ensaio de  $20^{\circ}\text{C}$ , o tempo de deverá ser de uma hora.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

Neste capítulo do trabalho serão descritos os tipos de materiais e as metodologias de ensaio empregadas que serão apresentados e discutidos mais adiante. É feita uma breve descrição dos procedimentos de caracterização dos materiais, assim como dos métodos adotados para obtenção dos resultados, os procedimentos para elaboração das misturas asfálticas utilizadas e confecção dos corpos de prova. Os ensaios laboratoriais foram realizados pela autora no Laboratório de Infraestrutura – INFRALAB da Universidade de Brasília – UnB.

#### 3.1 Programa experimental

O fluxograma da Figura 3.1 mostra a organização do programa experimental realizado durante o trabalho.



**Figura 3.1-** Organização das atividades experimentais desenvolvidas nos agregados, ligantes e misturas asfálticas.

O procedimento para elaboração das misturas asfálticas demandou o estudo e caracterização dos materiais envolvidos. As etapas de caracterização física dos agregados e dos ligantes foram realizadas de forma paralela e forneceram informações para a etapa de dosagem. A seguir é realizada a descrição das atividades realizadas.

- Determinação da faixa granulométrica descontínua utilizada;
- Caracterização dos agregados minerais para determinação de propriedades físicas e atendimento à limites estabelecidos por normas;
- Análise da proporção de adição de RAR e *Pellet* ao ligante CAP 50/70 de forma que o produto final apresentasse características de asfalto-borracha segundo a ASTM D6114/09;
- Realização dos ensaios de módulo dinâmico e fadiga acelerado nos ligantes asfálticos;
- Análise do projeto de dosagem SUPERPAVE para a composição de concreto asfáltico com CAP 50/70 modificado por *Pellet*, que serviu como base para a elaboração das demais misturas asfálticas utilizadas neste trabalho;
- Determinação do sistema de compactação da mistura asfáltica em molde e posterior corte para obtenção dos corpos de prova para realização dos ensaios;
- Definição do protocolo de ensaio de fadiga à flexão e módulo dinâmico a ser utilizado nas misturas asfálticas;
- Realização dos ensaios de módulo dinâmico e fadiga à flexão quatro pontos nas misturas asfálticas.

### **3.1.1 Matriz experimental**

A matriz experimental desta pesquisa foi definida levando-se em consideração os ensaios alvo para obtenção de características reológicas, para determinação do módulo dinâmico e ângulo de fase nos ligantes e misturas asfálticas. Posteriormente, ensaios de fadiga acelerada para os ligantes e fadiga à flexão quatro pontos para misturas. A Tabela 3.1 apresenta as configurações empregadas durante a realização destes ensaios.

**Tabela 3.1-** Matriz de ensaios realizados na pesquisa para ligantes e misturas asfálticas com RAR e *Pellet*.

| <b>Ligantes</b>                           |                    |                         |   |
|---|--------------------|-------------------------|---|
| <b>Ensaio de Módulo Dinâmico</b>          | 52, 64, 76 e 88 °C | Frequências             | 1,0 a 100 rad/s (0,159 a 15,9 Hz)         |
|   |                    | Deformação de ensaio    | 0,1%                                      |
|   |                    | Modo de carregamento    | Deformação controlada                     |
| <b>Ensaio de Fadiga Acelerado</b>         | 20°C               | Frequência              | 10 Hz                                     |
|   |                    | Deformação de ensaio    | 0,1%                                      |
|   |                    | Modo de carregamento    | Deformação controlada                     |
| <b>Misturas</b>                           |                    |                         |   |
| <b>Ensaio de Módulo Dinâmico</b>          | 5,15,25 e 35°C     | Frequências             | 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 15; 20; 25 Hz |
|   |                    | Deformação de ensaio    | 50 µε                                     |
|   |                    | Modo de carregamento    | Deformação controlada                     |
|   |                    | Forma do pulso de carga | Senoidal                                  |
| <b>Ensaio de Fadiga à Flexão 4 Pontos</b> | 5; 12,5 e 20°C     | Frequência              | 10 Hz                                     |
|   |                    | Deformação de ensaio    | 300 a 1000 µε                             |
|   |                    | Modo de carregamento    | Deformação controlada                     |
|   |                    | Forma do pulso de carga | Senoidal                                  |

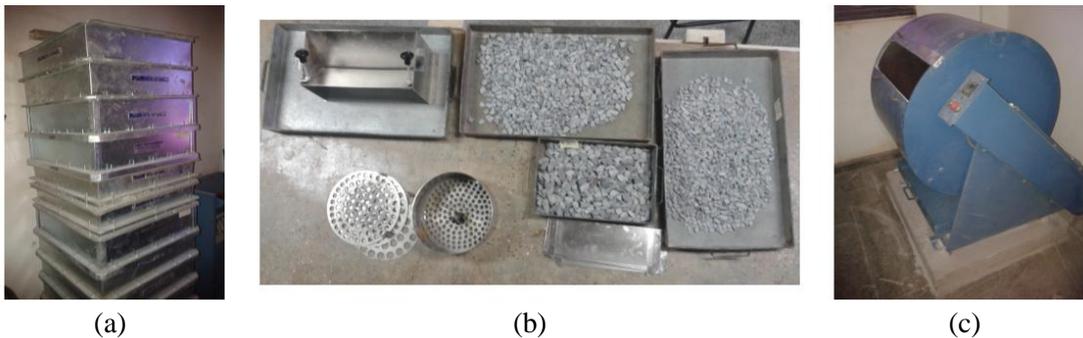
### 3.2 Caracterização do agregado mineral

A brita 1, brita 0 e fração miúda utilizados no presente estudo são de origem calcária, do Distrito Federal. O cimento ou fíler artificial foi utilizado como material de enchimento. Na caracterização dos agregados foram adotados procedimentos convencionais preconizados pelo DNIT além de testes da especificação SUPERPAVE.

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 vazios no agregado mineral-VAM.

De acordo com as especificações nacionais, para os agregados graúdos foram realizados os ensaios de granulometria por peneiramento (DNER ME 083/98), índice de forma (DNER ME

086/94) e abrasão Los Angeles (DNER ME 078/94). A Figura 3.2 ilustra os aparatos utilizados durante a realização destes ensaios.



**Figura 3.2-** (a) Ensaio de granulometria por peneiramento; (b) Ensaio de índice de forma e (c) Ensaio de abrasão.

Seguindo as especificações SUPERPAVE, nos agregados graúdos foram realizados os ensaios para determinação da massa específica (ASTM C 127/07) e de partículas alongadas e achatadas pelo protocolo da ASTM D 4791/10 que utiliza um paquímetro especial denominado *Caliper* (Figura 3.3).



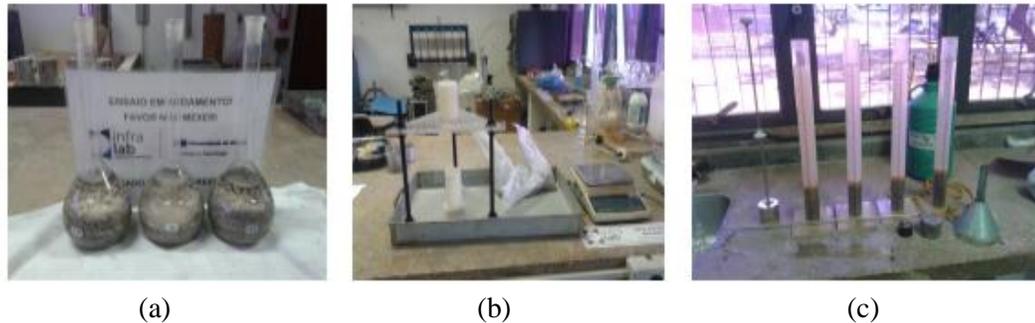
**Figura 3.3-** Paquímetro para a determinação de partículas alongadas e achatadas nos agregados graúdos.

Para a determinação de partículas alongadas e achatadas segundo o procedimento descrito na ASTM D 4791/10, método B, ajusta-se a maior abertura do paquímetro para o comprimento do agregado. A partícula é considerada achatada e alongada se a espessura máxima puder ser colocada através da menor abertura, caso contrário esta é considerado de forma cúbica.

O ensaio de massa específica dos agregados graúdos é semelhante ao procedimento descrito na norma DNER ME 081/98 em que os agregados devem permanecer em imersão em água por

24 horas, posteriormente pesados na condição superfície saturada seca (SSS) e na condição imersa em água.

Nos agregados miúdos seguiram os ensaios de granulometria por peneiramento, densidade e absorção (ASTM C 128/97), angularidade (ASTM C 1252/03) e teor de argila (ASTM D 2419/09). A Figura 3.4 mostra uma das etapas de realização destes ensaios.



**Figura 3.4-** (a) Ensaio de massa específica dos agregados miúdos, ASTM C 128; (b) Ensaio de angularidade, ASTM C 1252 e (c) Ensaio do equivalente de areia, ASTM D 2419 .

O ensaio de angularidade avalia o efeito do agregado miúdo na trabalhabilidade da mistura, por meio dos vazios medidos. O ensaio pode ser realizado de três maneiras distintas. O método A é adotado para agregados precisamente graduados, o método B para as frações isoladas (entre as peneiras N° 8 e a peneira N° 50) e o método C para a fração passante na peneira N° 4, sendo mantida a granulometria das frações abaixo da mesma.

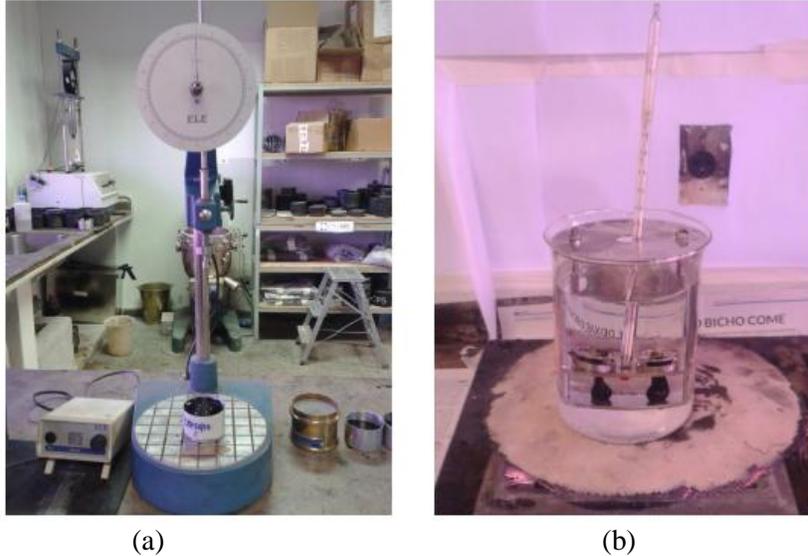
Na determinação da massa específica dos agregados miúdos, a condição de superfície saturada seca não é simples de ser observada visualmente como nos agregados graúdos. Desta forma, a condição de superfície saturada seca segundo a ASTM C 128 é obtida quando um tronco de cone de agregado resultante da moldagem com um molde padronizado mantém-se intacto após ser desmoldado. Este resultado possibilita a obtenção da absorção dos agregados miúdos.

A massa específica do material de enchimento foi determinada pela DNER-ME 085/95.

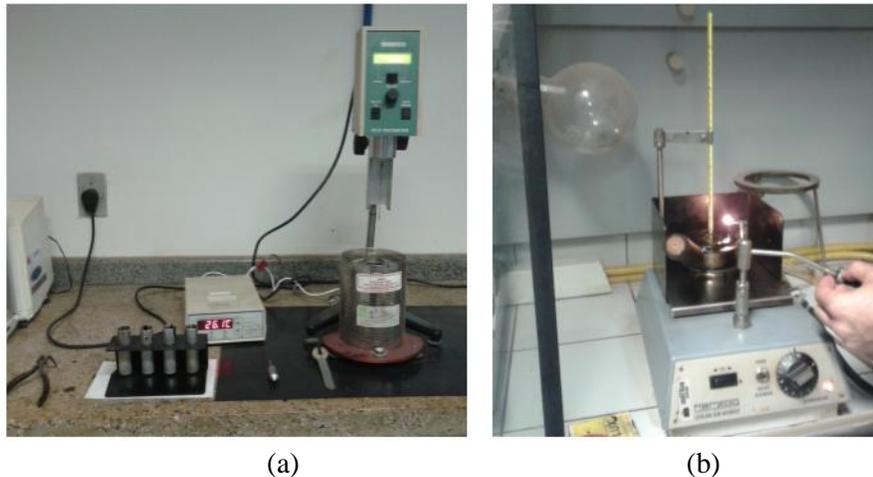
### 3.3 Caracterização dos ligantes asfálticos

No preparo das amostras foi utilizado como ligante asfáltico base o CAP 50/70 fornecido pela Centro Oeste Asfaltos. No intuito de produzir ligantes modificados que atendessem as especificações da ASTM D 6114, em um primeiro momento, foram realizados ensaios para a caracterização física dos ligantes. Os ensaios realizados foram: penetração (DNER ME 003/09),

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). A Figura 3.5 e Figura 3.6 mostram uma etapa da realização destes ensaios.



**Figura 3.5-** (a) Ensaio de penetração e (b) ensaio do ponto de amolecimento.



**Figura 3.6-** (a) Ensaio de viscosidade rotacional e (b) ensaio do ponto de fulgor.

Desta forma, a princípio, caracterizou-se o CAP 50/70 e seguindo as recomendações dos fabricantes de RAR e *Pellet* estudou-se a porcentagem de modificante a ser adicionada ao ligante base. A determinação das composições ocorreu segundo a Tabela 3.2 que aponta a proporção em massa adicionada, tempo e temperatura de mistura. As formulações foram nomeadas como:

- AB-P: CAP+*Pellet* com adição de 30 % de *Pellet* em massa;
- AB-R25: CAP+RAR com adição de 25% de RAR em massa;

- AB-R30: CAP+RAR com adição de 30% de RAR em massa.

**Tabela 3.2-** Composição dos ligantes estudados, tempo e temperatura de mistura.

| Formulação | Modificante<br>(% em massa) | Tempo<br>de<br>mistura<br>(min) | Temperatura<br>(°C) |
|------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------|
| CAP+Pellet | 30                          | 15                              | 170                 |
| CAP+RAR    | 25                          | 10                              | 160                 |
| CAP+RAR    | 30                          | 10                              | 160                 |

A fim de garantir maior uniformidade nos resultados esperados foram produzidos no total e em uma mesma remessa, um quilograma de ligante modificado para cada uma das alterações apresentadas na Tabela 3.2. Os ligantes modificados foram ensaiados na condição virgem para atendimento à ASTM D 6114 e parte da produção foi destinada ao ensaio *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT). Os ligantes, virgem e envelhecido, foram submetidos posteriormente à ensaios de caracterização reológica, assunto que será tratado na seção 4.4.

### 3.4 Dosagem SUPERPAVE

Na dosagem SUPERPAVE a compactação da mistura é realizada por amassamento (giros). No presente trabalho utilizou-se o compactador giratório do INFRALAB - UnB, um Troxler modelo 5850, como pode ser visto na Figura 3.7. 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 3.7-** 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 3.3 mostra a definição do número de giros para tráfego o qual se destina a aplicação da mistura asfáltica.

**Tabela 3.3-** Seleção do número de giros para o compactador SUPERPAVE (Asphalt Institute, 2007).

| Tráfego, ESALs<br>( $10^6$ ) | 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          |

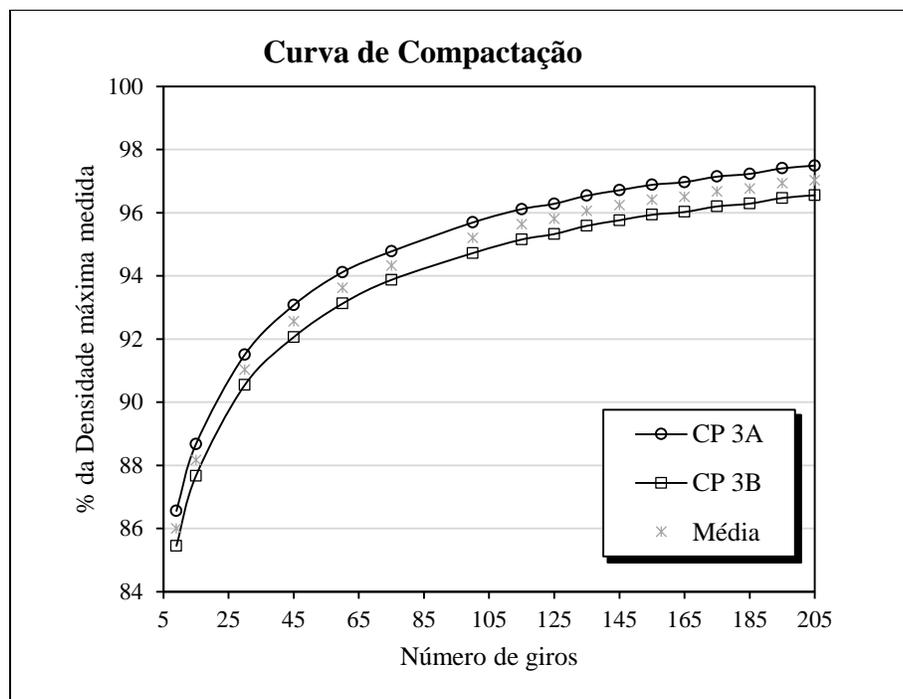
Devido à maior gama de ensaios necessários para a realização dos projetos Superpave Nível 2 e Superpave Nível 3, para este trabalho foi realizado a dosagem baseada apenas em parâmetros volumétricos, conforme é previsto para o Nível 1. A partir de experiências de dosagens anteriores com a utilização de asfalto-borracha e da granulometria estabelecida, foram definidos os teores a serem testados para a definição 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  $N_{máximo}$ .

O teor considerado como teor ótimo para início dos trabalhos de dosagem foi de 8,3 % de ligante, os demais teores variaram segundo a recomendação SUPERPAVE que define as variações de  $T\% \pm 0,5$  e  $T\% + 1,0$ , sendo estes de 7,8 % e 8,8 % e 9,3 %, respectivamente. Foram produzidos no mínimo dois corpos de prova para cada teor utilizando-se o molde de 150 mm de diâmetro. A Figura 3.8 mostra os corpos de prova produzidos.



**Figura 3.8-** Corpos de prova produzidos pela metodologia SUPERPAVE, duas réplicas por teor, 150 mm de diâmetro.

Os corpos de prova produzidos foram pesados segundo a AASHTO T 166 para a determinação da densidade aparente. Após esta etapa foi determinada a densidade máxima medida (Densidade *Rice*) método ASTM D 2041, para cada corpo de prova. Na compactação SUPERPAVE o compactador registra a altura do corpo de prova a cada giro do equipamento, sendo possível estimar a densidade aparente do corpo de prova a cada giro. Este valor foi posteriormente corrigido em relação à densidade aparente e densidade máxima medida. Ao final do processo é possível plotar os gráficos da curva de compactação dos corpos de prova em que a porcentagem da densidade máxima medida é função do número de giros como mostra o exemplo da Figura 3.9, para os corpos de prova confeccionados para o teor de 8,8% de ligante denominados 3A e 3B.



**Figura 3.9-** Curva de compactação para os corpos de prova 3A, 3B e média.

Em virtude da limitada quantidade de material RAR destinada à completa execução deste trabalho de dissertação, a dosagem foi realizada com o asfalto-borracha obtido pela adição de *Pellet* ao CAP 50/70 na proporção de 30% em massa em relação ao teor de ligante. Assim, os resultados do estudo de dosagem para a mistura asfáltica de granulometria descontínua elaborada com ligante AB-P foram extensivos às demais misturas asfálticas produzidas nesta pesquisa com os ligantes modificados AB-R25 e AB-R30.

### 3.5 Misturas asfálticas utilizadas e preparação dos corpos de prova prismáticos

Após a definição da curva granulométrica e do teor ótimo de ligante, foi necessário estabelecer a metodologia para obtenção dos corpos de prova prismáticos. Todos os processos de usinagem e compactação das misturas foram realizados no INFRALAB-UnB.

A Tabela 3.4 mostra a composição e as nomenclaturas adotadas para as misturas asfalto-borracha produzidas neste trabalho de dissertação. A mistura asfalto-borracha a qual se utilizou o ligante AB-P foi designada MAB-P. A mistura asfalto-borracha produzidas a partir do ligante AB-R25 é chamada de MAB-R25 e as misturas produzidas a partir do ligante AB-R30 foram designadas MAB-R30-1, MAB-R30-2 e MAB-R30-3. Pelos motivos explicados no item 3.4 os valores obtidos na dosagem para a mistura MAB-P foram adotados para a elaboração das demais misturas com adição de RAR produzidas.

**Tabela 3.4-** Composição das misturas asfalto-borracha produzidas.

| Nome da mistura | Modificante (%) | Composição (em 100% de mistura) |                     |                       |                    |                 |
|-----------------|-----------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|-----------------|
|                 |                 | Agregado (%)                    | Teor de ligante (%) | Teor de CAP 50/70 (%) | Teor de Pellet (%) | Teor de RAR (%) |
| MAB-P           | 30              | 91,2                            | 8,8                 | 6,2                   | 2,6                | -               |
| MAB-R25         | 25              | 91,2                            | 8,8                 | 6,6                   | -                  | 2,2             |
| MAB-R30-1       | 30              | 91,2                            | 8,8                 | 6,2                   | -                  | 2,6             |
| MAB-R30-2       | 30              | 91,2                            | 8,8                 | 6,2                   | -                  | 2,6             |
| MAB-R30-3       | 30              | 91,2                            | 8,8                 | 6,2                   | -                  | 2,6             |

As temperaturas de mistura e compactação seguiram as recomendações dos fabricantes dos modificantes, que alertam para a utilização de temperaturas mais baixas para ligantes menos viscosos e temperaturas mais altas para ligantes mais viscosos, a depender do asfalto utilizado como base. Neste trabalho, que possui por ligante base o CAP 50/70, sendo um ligante menos viscoso, as temperaturas para mistura variaram entre 160 e 175 °C e para a compactação entre 150 e 160 °C.

As empresas que comercializam os materiais em questão recomendam as formas de adição destes à mistura no momento da usinagem. Segundo Sousa *et al.* (2012), a RAR deve ser adicionada à mistura de agregado e ligante no misturador após os agregados serem encobertos

por um filme de ligante. O tempo para que a RAR se encontrasse totalmente dispersa na mistura não ultrapassou cinco minutos.

Segundo a Phoenix Industries, o *Pellet* pode ser projetado para ser misturado diretamente aos agregados ou em determinadas composições, modificando o ligante asfáltico. O *Pellet* foi adicionado primeiramente ao ligante (produção de AB-P, tempo de mistura de 15 minutos a 170°C) e depois aos agregados no momento de cada ciclo de produção. Isto se deve ao fato de que a alteração realizada por adição dos *Pellets* diretamente na cuba térmica envolveria maior gasto de tempo, devido a sua granulometria e tempo de reação, fazendo com que a mistura rapidamente perdesse temperatura.

Devido a capacidade do misturador, as misturas foram produzidas em ciclos de dez quilogramas, para todos os casos, os passos envolviam:

- pesagem dos agregados pós-estufa à temperatura de 175 a 190°C;
- correção da massa total de ligante a ser adicionada;
- para misturas MAB-R25, MAB-R30-1, MAB-R30-2 e MAB-R30-3: Adição de CAP 50/70, corrigida em relação a substituição por RAR em 25% e 30% e posterior adição de RAR diretamente no misturador. Para a mistura MAB-P: adição do ligante modificado por *Pellet*, AB-P, 30% em massa em relação ao ligante;
- disposição da mistura produzida em bandejas. Após a finalização do último ciclo de produção, as bandejas foram levadas à estufa a temperatura constante de 170 °C, mantidas nesta condição por duas horas;
- fixação do molde no local da compactação; preparação do molde para receber a massa asfáltica, colocação de papel filtro no fundo e aplicação de desmoldante nas paredes do molde e fundo;
- após o tempo de envelhecimento da mistura à temperatura de 170 °C, as bandejas eram transportadas ao local do molde e a mistura imediatamente transferidas a este;
- compactação da mistura entre as temperatura de 150 e 160 °C;
- desmolde da placa, no mínimo vinte e quatro horas depois do processo de compactação, e cortes preliminares.

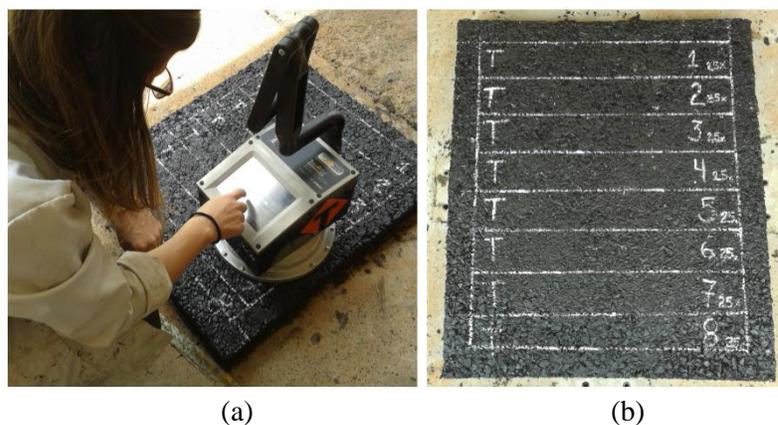
Uma vez que o INFRALAB disponibilizava de espaço e recursos utilizados no trabalho de Obando (2016), para este estudo foram adotadas as mesmas metodologias na confecção das

amostras. Neste caso, fez-se uso de um dos moldes metálico bipartido de dimensões 700 x 600 x 50 mm e a compactação foi realizada por meio da placa vibratória unidirecional da marca Webber, modelo CF2, na área externa do INFRALAB. A Figura 3.10 ilustra o molde e o compactador utilizados. O controle da temperatura de compactação foi realizado por um termômetro digital do tipo espeto e outro termômetro a laser. O fim do processo de compactação foi ditado principalmente pela temperatura e pelas aferições do densímetro elétrico PQI 380 da TransTech. Além da temperatura, o aparato indica a densidade aparente e o grau de compactação da massa asfáltica. A Figura 3.11 (a) mostra o aparelho em operação.

As placas compactadas eram desmoldadas com o tempo mínimo de vinte e quatro horas para resfriamento completo da mistura. A placa era devidamente marcada e numerada para extração preliminar dos corpos de prova, como mostra a Figura 3.11 (b). Uma vez que o molde não possuía fundo e era fixado ao chão, o corte preliminar constituiu uma etapa do processo de desmolde, pois desta forma era possível a retirada dos corpos de prova sem que houvesse danos ou deformações.



**Figura 3.10-** (a) Molde metálico e (b) Placa vibratória unidirecional, compactação.



**Figura 3.11-** (a) Aferição da densidade e grau de compactação da placa e (b) Divisão preliminar da placa em vigas para o corte.

A primeira mistura a ser compactada nesta configuração foi a MAB-P. Para as demais massas asfálticas o processo de compactação foi realizado da mesma forma descrita, tendo como única diferença a altura do molde empregado, que passou a ser de 70 mm. Isto ocorreu com o propósito de melhorar o processo de compactação e corte das amostras, melhorando assim as propriedades finais, de forma que estas atingissem os parâmetros estabelecidos em projeto.

Buscando atender as dimensões e critérios de faceamento recomendados pela da AASHTO T 321/07, as vigas obtidas por cortes preliminares (Figura 3.12 a) foram submetidas a outra etapa de corte (Figura 3.12 b). Para a realização deste procedimento utilizou-se uma serra de bancada com gabarito adaptável, com disco diamantado de velocidade constante. A Figura 3.12 c mostra as vigotas obtidas no fim do processo.



**Figura 3.12-** (a) Realização do corte preliminar, (b) Corte em serra de bancada com gabarito adaptado e (c) Vigotas após os processos de corte.

### **3.6 Ensaios de caracterização reológica e de fadiga acelerada nos ligantes asfálticos**

#### **3.6.1 Descrição do equipamento utilizado**

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 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 3.13. 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.

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

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



(a)

(b)

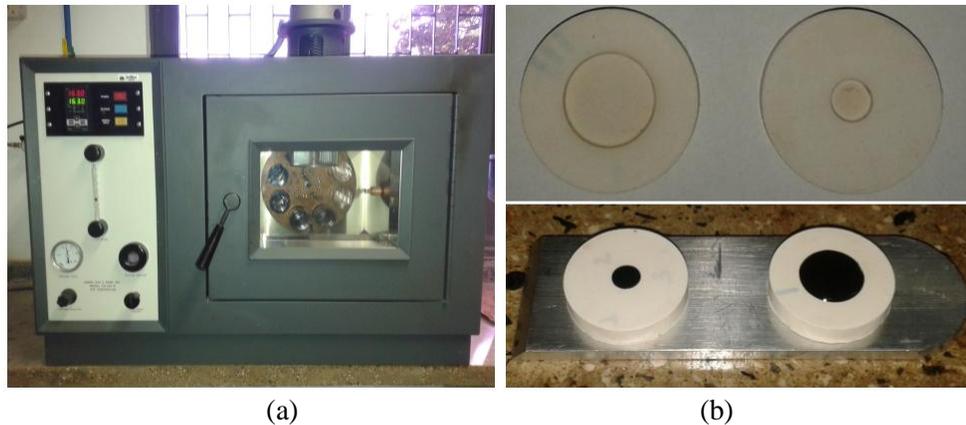
**Figura 3.13-** (a) Placas superior e inferior do DSR, placa de 25 mm de diâmetro à esquerda e 8 mm de diâmetro à direita e (b) Equipamento com acessórios encaixados e amostra posicionada.

Utilizou-se o reômetro de cisalhamento dinâmico do INFRALAB da marca Anton Paar, modelo MCR 102. Foram conduzidos os ensaios de caracterização das propriedades reológicas e ensaio de fadiga no CAP 50/70 e nos ligantes modificados AB-P, AB-R25 e AB-R30.

### 3.6.2 Programa experimental e configurações utilizadas nos ensaios

Foram produzidos corpos de prova nas condições virgem e envelhecido, em moldes de silicone, segundo as especificações de norma para cada ensaio. O envelhecimento dos ligantes asfálticos foi realizado segundo o procedimento ASTM D 2872/13. 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). A Figura 3.14 mostra o processo de envelhecimento dos ligantes, os moldes utilizados e a produção das amostras.



**Figura 3.14-** (a) Envelhecimento dos ligantes asfálticos, RTFOT e (b) molde e produção das amostras cilíndricas.

Para esta caracterização a geometria de placas paralelas de 25 mm de diâmetro foi configurada no reômetro. Recomenda-se o espaçamento de 1 mm entre as placas superior e inferior, 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 a 0,1%. Os valores de frequência configurados foram de 1,0 a 100,0 rad/s (0,159 a 15,9 Hz), e os valores de temperatura ensaiados foram de 52°C a 88°C, com incremento de 12°C a cada variação. As varreduras de temperatura e frequência foram realizadas em um mínimo de três amostras por ligante. A caracterização reológica foi realizada conforme o modelo sigmoidal e as equações apresentadas no item 2.3 do Capítulo 2.

O ensaio LAS foi conduzido segundo as recomendações da AASHTO TP 101/14 em uma temperatura constante de  $20,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$  em no mínimo três réplicas por ligante. A amostra foi ensaiada utilizando a geometria de placas paralelas de 8 mm de diâmetro com espaçamento de 2 mm entre placas. O ensaio é dividido em duas etapas: (1) uma varredura de frequência entre 0,1 e 30 Hz é realizada para determinar as propriedades reológicas na região da viscoelasticidade

linear, utilizando amplitude de deformação de 0,1% e (2) uma varredura de amplitude de deformação entre 0,1 e 30% é realizada a uma frequência fixa de 10 Hz. A sequência de carregamento consiste em intervalos de 10 segundos a uma amplitude de deformação constante, sendo cada intervalo seguido por outro com uma amplitude de deformação maior, o incremento ocorre de forma linear como proposto por Hintz (2012).

### 3.6.3 Equações para a determinação da vida de fadiga segundo a teoria VECD no ensaio LAS

Para que os dados sejam processados e o parâmetro de fadiga seja calculado de acordo com a Equação 2.10 mostrada na seção 2.4, primeiramente, os dados do módulo dinâmico ( $|G^*|$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ) obtidos pela varredura de frequências, são convertidos em módulo de armazenamento,  $G'$ , para cada frequência:

$$G'(\omega) = |G^*(\omega) \cdot \cos\delta(\omega) \quad (3.3)$$

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

$$\log G'(\omega) = m(\log \omega) + b \quad (3.4)$$

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

$$\alpha = \frac{1}{m} \quad (3.5)$$

Com os resultados do ensaio LAS, o dano acumulado na amostra é calculado pela soma:

$$D(t) = \sum_{i=1}^N [\pi \gamma_0^2 (C_{i-1} - C_i)]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (3.6)$$

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 como:

$$C_{(t)} = C_0 - C_1(D)^{C_2} \quad (3.7)$$

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):

$$\log(C_0 - C(t)) = \log(C_1) + C_2 \cdot \log(D(t)) \quad (3.8)$$

Usando a Equação 3.8,  $C_1$  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 por:

$$D_f = \left( \frac{C_0 - C_{Tensão\ de\ Pico}}{C_1} \right)^{\frac{1}{C_2}} \quad (3.9)$$

Assim, o parâmetro  $A$  da lei de fadiga segundo a Equação 2.10 é definido por:

$$A = \frac{f(D_f)^k}{k(\pi C_1 C_2)^\alpha} \quad (3.10)$$

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 2.10, é definido pela Equação 3.11:

$$B = 2\alpha. \quad (3.11)$$

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 a teoria VECD. Esta planilha em *Excel*, utilizada na etapa de processamento dos resultados deste trabalho, utiliza as equações aqui apresentadas.

### **3.7 Ensaios de caracterização reológica e de fadiga à flexão das misturas asfálticas**

#### **3.7.1 Descrição do equipamento utilizado**

O equipamento pneumático de fadiga em viga flexão quatro pontos, ou 4PB, como também é chamado, foi desenvolvido pela IPC Global e adquirido pelo INFRALAB. Este aparato atende aos requisitos das normas AASHTO T 321, ASTM D 7460 e EN 1267-24, reportadas no Capítulo 2.

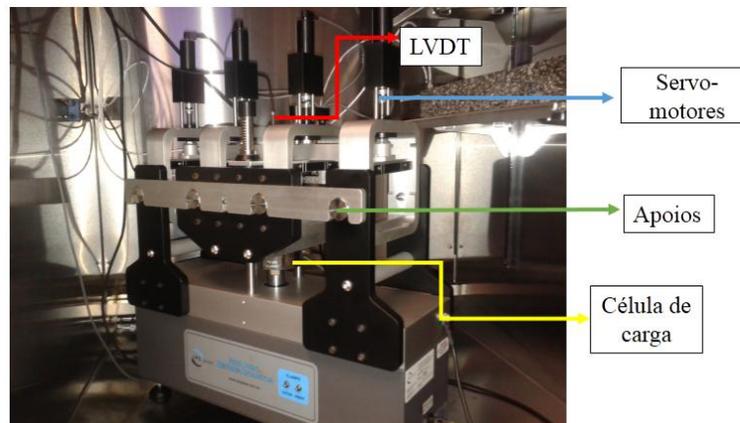
A aplicação de carga do equipamento ocorre por meio de um sistema pneumático atuando também no sistema dos fixadores laterais. Os quatro servo-motores, acionados no posicionamento do corpo de prova garantem o travamento necessário durante a realização do ensaio. O sistema permite a aplicação do carregamento senoidal ou *haversine* em diferentes frequências e modo, sendo tensão ou deformação controlada.

A deflexão é medida pelo LVDT posicionado no centro da viga, sendo que a referência de cálculo situa-se a  $\frac{3}{4}$  do comprimento da mesma. Assim é possível calcular a deflexão real que causa a flexão da viga durante o carregamento e não sua deflexão total (Mello, 2008).

O aparato 4PB foi alocado no interior de uma câmara climática de forma que o ensaio ocorresse sob uniformidade de temperatura dentro da amostra. A câmara possui um sistema de medição da temperatura no centro e na superfície de um corpo de prova para controle durante todo o andamento do ensaio. A Figura 3.15 mostra as instalações do equipamento e a Figura 3.16 mostra em detalhe o equipamento de fadiga.



**Figura 3.15-** Instalações do equipamento de fadiga a flexão quatro pontos: aquisitor de dados, câmara climática e reservatório de ar-comprimido.



**Figura 3.16-** Detalhes do equipamento de fadiga à flexão quatro pontos.

O equipamento permite o manuseio ao operador por meio de dois *softwares*, UTS015 e UTS018. Para os ensaios de módulo dinâmico e ângulo de fase das misturas asfálticas foi utilizado o *software* UTS018 e para os ensaios de fadiga à deformação controlada, UTS015.

Todo ensaio é monitorado pelo sistema de aquisição de dados com o auxílio dos *softwares* da IPC Global. Os sinais dos LVDT's e da célula de carga são enviados ao programa e convertidos em valores de deslocamento e força a cada milissegundo do ensaio. Estas informações são convertidas em valores de tensão e deformação de acordo com a teoria da flexão pura em vigas. Desta forma podem ser calculados a tensão de tração nas fibras externas da viga pela Equação 3.12:

$$\sigma_t = \frac{L_e \cdot F_S}{h^2 \cdot b} \quad (3.12)$$

onde  $\sigma_t$  é a tensão de tração,  $L_e$  é o comprimento da amostra entre os apoios externos,  $F_s$  é a força exercida pelo equipamento,  $h$  é a altura média e  $b$  é a largura média da amostra.

A deformação atuante nas fibras externas na terça parte da amostra é determinada pela Equação 3.13:

$$\varepsilon_t = \frac{12 \cdot \delta_s \cdot h}{3 \cdot L_e^2 - 4 \cdot L_i^2} \quad (3.13)$$

onde  $\varepsilon_t$  é a deformação de tração,  $L_i$  é o comprimento da vigota entre os apoios internos e  $\delta_s$  é o deslocamento exercido pelo equipamento.

A rigidez a flexão da amostra é então determinada pela Equação 3.14:

$$S = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \quad (3.14)$$

O módulo de elasticidade pode ser calculado pela Equação 3.15:

$$E_{el} = \left( \frac{F_s \cdot L_e}{\delta_s \cdot b \cdot h} \right) \cdot \left[ \frac{(3 \cdot L_e^2 - 4 \cdot L_i^2)}{4 \cdot h^2} + k \cdot (1 + \nu) \right] \quad (3.15)$$

onde  $E_{el}$  é o módulo de elasticidade,  $k$  é uma variável que leva em consideração a tensão cisalhante (assumida como 1,5) e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson.

O ângulo de fase e a energia dissipada são calculado segundo a Equação 3.16 e Equação 3.17, respectivamente:

$$\varphi = 360 \cdot f \cdot s \quad (3.16)$$

$$w = \pi \cdot \sigma_t \cdot \varepsilon_t \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (3.17)$$

onde  $\varphi$  é o ângulo de fase,  $f$  é a frequência de aplicação do carregamento,  $s$  é o tempo de defasagem entre a aplicação da carga  $F_s$  e o deslocamento e  $w$  é a energia dissipada.

### 3.7.2 Programa experimental e configurações utilizadas nos ensaios

O UTS018 configura as especificações das normas europeias para ensaios de fadiga, EN 12967-24 e módulo dinâmico, EN 12967-26, e a opção de um ensaio de flexão que não segue o padrão das normas mencionadas. Porém, para os ensaios de fadiga realizados sob o protocolo da

EN 12967-24, o *software* permite a configuração de um pré-teste no qual podem ser configuradas as varreduras de frequência, o valor da deformação e o número de ciclos para a determinação do módulo da mistura, sem ocasionar dano prematuro à amostra. Desta forma, no mínimo três amostras prismáticas referentes a cada mistura foram ensaiadas sob a varredura de frequência nos valores de 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 15; 20; 25 Hz e temperaturas de 5, 15, 25 e 35°C para a determinação do módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) e ângulo de fase ( $\phi$ ). A deformação aplicada às amostras foi de 50 $\mu\epsilon$  de forma a evitar o dano prematuro, o modo de pulso senoidal e com 200 repetições por ciclo de carregamento.

No programa UTS015 são carregados as configurações de ensaio das normas AASHTO T 321, ASTM D 7460, AST 03/00 (norma australiana para vida de fadiga) e EN 12697-24. Para o ensaio de fadiga, foram carregadas as configurações do software com o protocolo AASHTO T 321. Segundo esta norma, foram cumpridas as configurações do modo de carregamento à deformação controlada, a forma do pulso senoidal, as dimensões do corpo de prova, a temperatura de ensaio e tempo de aclimatização da amostra na câmara climática. No entanto, o procedimento a respeito da adoção dos níveis de sollicitação para a execução do ensaio na obtenção das curvas de Whöler foi inspirado na metodologia adotada pelo *Advanced Pavement Laboratory* (APL) /ASU no Arizona. Segundo Mello (2008), esse procedimento visa à obtenção de três curvas de Whöler, considerando a metodologia tradicional de análise. Para isso os ensaios de fadiga são realizados com uma frequência de 10 Hz e em três temperaturas diferentes.

O ensaio foi realizado a temperatura de 5°C; 12,5°C e 20°C, os níveis de deformação variaram de 300 a 1000 $\mu\epsilon$ , sendo que neste trabalho foram necessárias em média seis amostras ensaiadas em diferentes níveis de sollicitação para se obter uma variabilidade aceitável do modelo.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios laboratoriais realizados para os ligantes e para as misturas asfálticas produzidas.

Inicialmente são apresentados os resultados da caracterização física dos agregados minerais e dos ligantes (CAP 50/70, AB-P, AB-R25 e AB-R30), segundo as normativas e metodologias expostas no Capítulo 3. São apresentados os resultados das curva mestra dos ligantes asfálticos conforme os resultados do módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) obtidos, ajustados ao modelo sigmoidal Equação 2.7 mostrado na seção 2.3. Posteriormente é apresentado o comportamento à fadiga dos ligantes asfálticos de acordo com os dados obtidos no ensaio LAS conforme a normatização AASHTO TP 101.

Para as misturas asfálticas apresentam-se os dados dos parâmetros volumétricos obtidos para as vigotas. Esta etapa visa à avaliação do método de produção das placas e dos valores dos parâmetros volumétricos obtidos para as vigas comparados aos parâmetros de projeto. Foram fabricadas 5 misturas asfálticas de granulometria descontínua (MAB-P, MAB-R25, MAB-R30-1, MAB-R30-2 e MAB-R30-3) que após o processo de corte forneceram 37 vigotas para o ensaio de módulo dinâmico e fadiga. Em seguida são apresentadas as curvas mestras das misturas asfálticas produzidas, com base nos resultados dos ensaios de módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) descritos no item 3.7.2 do Capítulo 3, também ajustados segundo o modelo sigmoidal. Posteriormente são apresentados os resultados de vida de fadiga à flexão sob os conceitos da análise tradicional, por meio das curvas de Whöler.

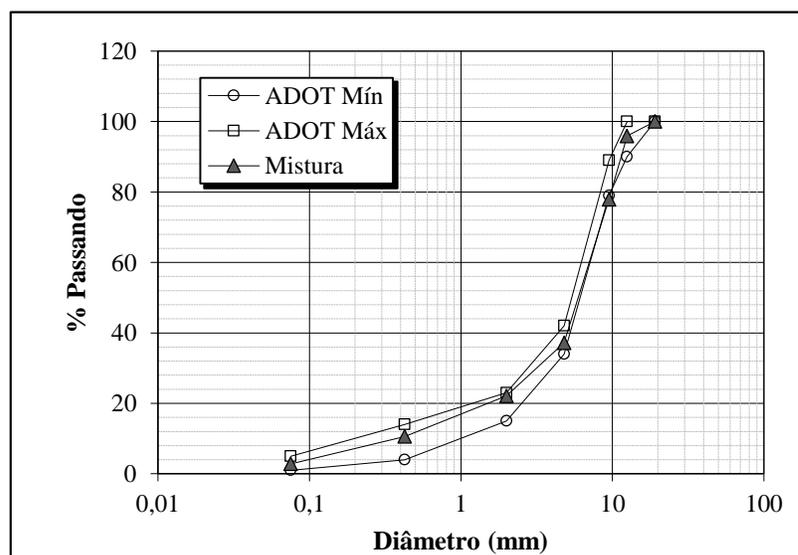
### 4.1 Caracterização do agregado mineral

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 mostra a Tabela 4.1, a Figura 4.1 e a Figura 4.2.

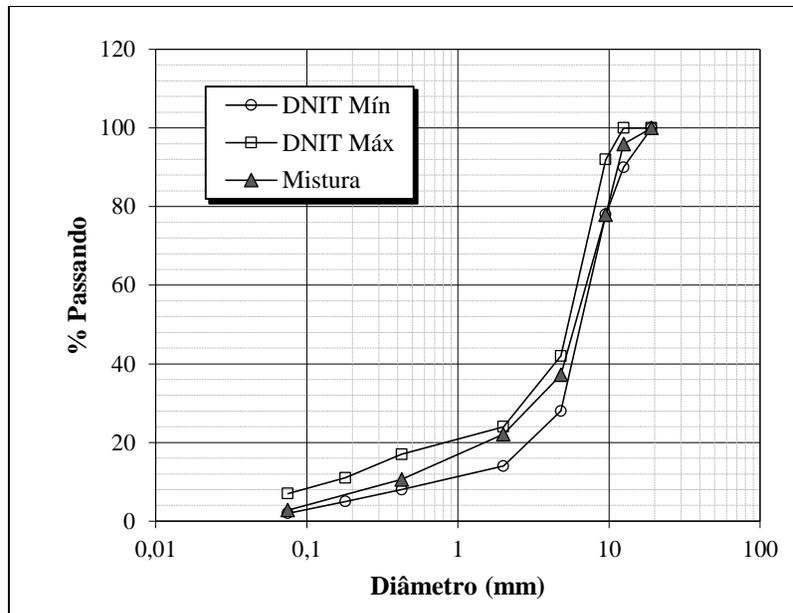
Segundo a metodologia SUPERPAVE a peneira de tamanho máximo nominal (TMN) é uma peneira de tamanho imediatamente acima da primeira peneira que reter mais de 10% do agregado combinado e a dimensão máxima é um tamanho acima da peneira de tamanho máximo nominal. A composição granulométrica deste trabalho apresenta tamanho máximo nominal de 12,5 mm e dimensão máxima de 19,1 mm.

**Tabela 4.1-** Distribuição granulométrica da mistura e faixas de limite do ADOT e DNIT.

| Tamanho da malha |       | Porcentagem passando (%) |     |      |     |         |
|------------------|-------|--------------------------|-----|------|-----|---------|
| ASTM             | (mm)  | ADOT                     |     | DNIT |     | Mistura |
| 3/4"             | 19.1  | 100                      | 100 | 100  | 100 | 100     |
| 1/2"             | 12.5  | 90                       | 100 | 90   | 100 | 95.9    |
| 3/8"             | 9.5   | 79                       | 89  | 78   | 92  | 77.9    |
| N° 4             | 4.8   | 34                       | 42  | 28   | 42  | 37.2    |
| N° 10            | 2     | 15                       | 23  | 14   | 24  | 22.1    |
| N° 40            | 0.425 | 4                        | 14  | 8    | 17  | 10.6    |
| N° 80            | 0.18  | -                        | -   | 5    | 11  | -       |
| N° 200           | 0.075 | 1                        | 5   | 2    | 7   | 2.8     |



**Figura 4.1-** Curva granulométrica adotada e limites máximo e mínimo segundo a faixa do ADOT.



**Figura 4.2-** Curva granulométrica adotada e limites máximo e mínimo segundo a faixa do DNIT.

A fração graúda apresentou resultados satisfatórios para o ensaio de índice de forma e abrasão Los Angeles, com respectivos valores de 0,9 e 16%, estando estes dentro do limite especificado pela norma. A metodologia SUPERPAVE (Asphalt Institute, 2007) especifica limite de lamelaridade de 10% em massa para a proporção de 1/5. Desta forma os valores obtidos, 1,6% para a fração retida na peneira 1/2" e 2,3% para a fração retida na peneira 3/8", encontram-se dentro dos limites da especificação.

Para o ensaio de angularidade dos agregados miúdos, adotou-se o método B nas frações N° 10 – N° 40 e N° 40 – N° 200 com resultados de 49% e 55% respectivamente, todos dentro do limite exigido nas especificações SUPERPAVE.

A Tabela 4.2 exibe o resumo dos resultados para todos os ensaios realizados e os respectivos limites estabelecidos pelas normas. Todos os ensaios foram conduzidos segundo o número de réplicas e amostragem definidos pelas respectivas normas. Os valores de massa específica para agregados graúdo, miúdos e material de enchimento, bem como as propriedades de índice de forma, abrasão Los Angeles e teor de argila encontram-se em conformidade com os dados encontrados na literatura para agregados calcários nos trabalhos de Martinez (2014), Quiñones (2014) e Obando (2016).

**Tabela 4.2-** Propriedades ensaiadas nos agregados, normativas, especificações e valores.

| 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" (%)<br>5 para 1 | ASTM D 4791               | máx 10        | 1,6   |
| Chatos e alongados, 1/2"-3/8" (%)<br>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<br>(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 |

## 4.2 Caracterização física dos ligantes

A Tabela 4.3 apresenta as características físicas, segundo as normativas utilizadas, para o CAP 50/70, AB-P, AB-R25 e AB-R30 bem como os limites de valores estabelecido pela norma ASTM D 6114. É importante comentar que os resultados apresentados nesta tabela são valores médios representados por no mínimo três réplicas para cada teste.

Para os ligantes AB-R25 e AB-R30 não foi possível determinar o ponto de fulgor, devido ao fato do ligante modificado com a RAR expandir seu volume, extravasando o recipiente Cleveland em temperaturas acima de 200°C. Os resultados de CAP 50/70 apresentados na Tabela 4.3 atendem às especificações da norma DNIT EM 095/06. Nos ligantes AB-R25 e AB-R30, estes valores condizem com os resultados do estudo realizado por Sousa *et al.* (2012).

**Tabela 4.3-** Propriedades físicas das composições em estudo e limitações ASTM D 6114.

| Característica                         | CAP 50/70 | AB-P  | AB-R25 | AB-R30 | ASTM D 6114 |
|--|-----------|-------|--------|--------|-------------|
| Penetração (0,1 mm)                    | 51        | 25    | 41     | 39     | 25-75       |
| Ponto de amolecimento (°C)             | 49        | 57    | 56     | 58     | 54          |
| Viscosidade Rotacional a 175°C (mPa.s) | 55        | 1750  | 1163   | 3090   | 1500-5000   |
| Ponto de fulgor (°C)                   | 325       | 335   | -      | -      | mín 232     |
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> )         | 1,014     | 1,058 | 1,045  | 1,065  | -           |

As modificações do CAP 50/70 resultaram em aumento do ponto de amolecimento, da viscosidade rotacional, do ponto de fulgor e da densidade, além de redução da penetração. As alterações destas propriedades nos asfaltos-borracha podem significar melhorias no comportamento à fadiga e às deformações permanentes. Elevadas viscosidades apresentadas pelos ligantes asfálticos modificados podem ser atribuídas ao aumento na espessura do filme de ligante necessário para haver o recobrimento completo das partículas de agregado. Este fato ocasiona o aumento da porcentagem de ligante empregada na confecção das misturas asfálticas confeccionadas com asfalto-borracha.

### 4.3 Dosagem SUPERPAVE

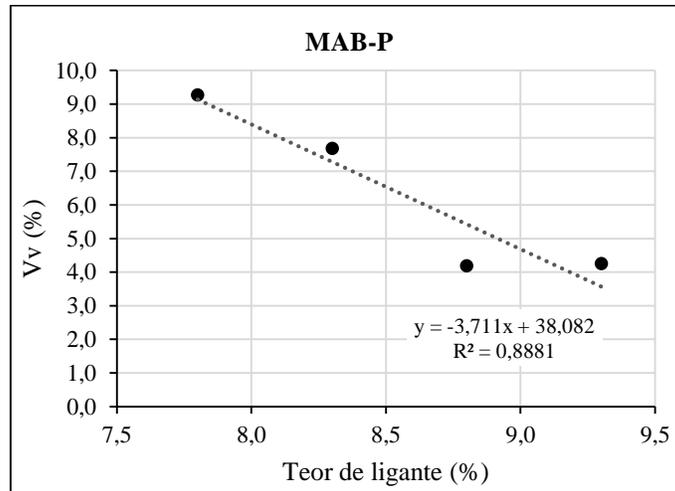
A Tabela 4.4 apresenta o resumo dos resultados da dosagem para a média de dois corpos de prova por teor. Os valores dos parâmetros volumétricos de volume de vazios (Vv), vazios com betume (VCB), vazios no agregado mineral (VAM), relação betume vazios (RBV) e densidade aparente são referentes a  $N_{projeto}$ .

**Tabela 4.4-** Parâmetros volumétricos para os teores de dosagem SUPERPAVE.

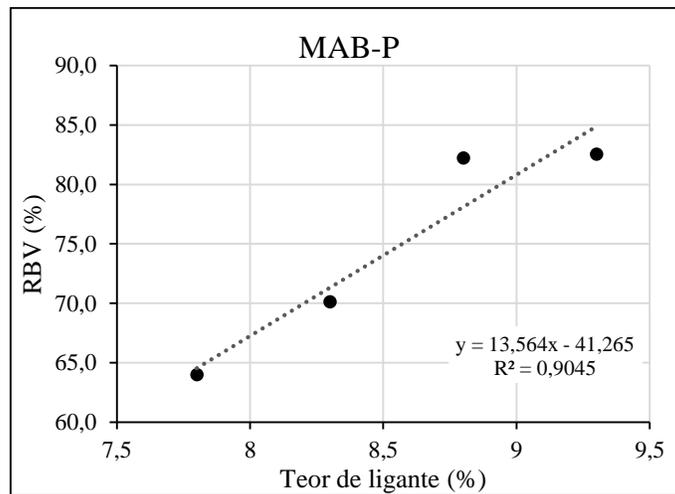
| Ligante (%) | %Gmm @N <sub>inicial</sub> (N=9) | %Gmm @N <sub>projeto</sub> (N=125) | %Gmm @N <sub>máximo</sub> (N=205) | Vv (%) | VCB (%) | VAM (%) | RBV (%) | Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------|---------|---------|---------|---|
| 7,8         | 81,8                             | 90,7                               | 90,1                              | 9,3    | 16,5    | 25,7    | 64,0    | 2,234                                   |
| 8,3         | 82,6                             | 92,3                               | 91,7                              | 7,7    | 18,0    | 25,7    | 70,1    | 2,298                                   |
| 8,8         | 86,0                             | 95,8                               | 95,2                              | 4,2    | 19,4    | 23,6    | 82,2    | 2,333                                   |
| 9,3         | 85,9                             | 95,7                               | 95,1                              | 4,3    | 20,1    | 24,4    | 82,5    | 2,288                                   |

Os dados de parâmetros volumétricos apresentados na Tabela 4.4 foram plotados em função do teor de ligante asfáltico. Os gráficos representados na Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.5 a seguir mostram o ajuste dos pontos que representa o comportamento dos parâmetros volumétricos da mistura asfalto-borracha modificada por *Pellet*, MAB-P, com a variação do teor

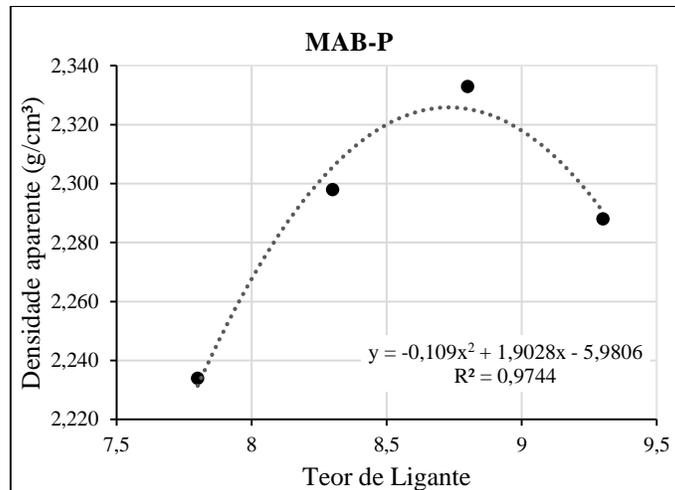
de ligante. A partir da curva de tendência apresentada por estes pontos o teor ótimo foi definido, respeitando os limites estabelecidos para a mistura *gap-graded* em DNIT ES 112/09 como mostra a Tabela 4.5.



**Figura 4.3-** Curva de tendência para a variação dos parâmetros Vv x Teor de ligante para a mistura asfalto-borracha modificada com ligante *Pellet* (MAB-P).



**Figura 4.4-** Curva de tendência para a variação dos parâmetros RBV x Teor de ligante para a mistura asfalto-borracha modificada com o ligante *Pellet* (MAB-P).



**Figura 4.5-** Curva de tendência para a variação dos parâmetros Densidade aparente x Teor de ligante para a mistura asfalto-borracha modificada com o ligante *Pellet* (MAB-P).

**Tabela 4.5-** Propriedades volumétricas para misturas asfalto-borracha.

| Propriedade    | Mistura | Limites (DNIT 112/09) |
|----------------|---------|-----------------------|
| Vv (%)         | 5,4     | 4-6                   |
| Teor ótimo (%) | 8,8     | 5-8                   |
| VAM (%)        | 23,6    | >14                   |
| RBV (%)        | 78      | 65-78                 |

Assim, foram estabelecidos como parâmetros volumétricos de projeto para todas as misturas o volume de vazios de 5,4%; o teor ótimo de ligante de 8,8%; os vazios nos agregados minerais de 23,6% e a relação betume vazios de 78%.

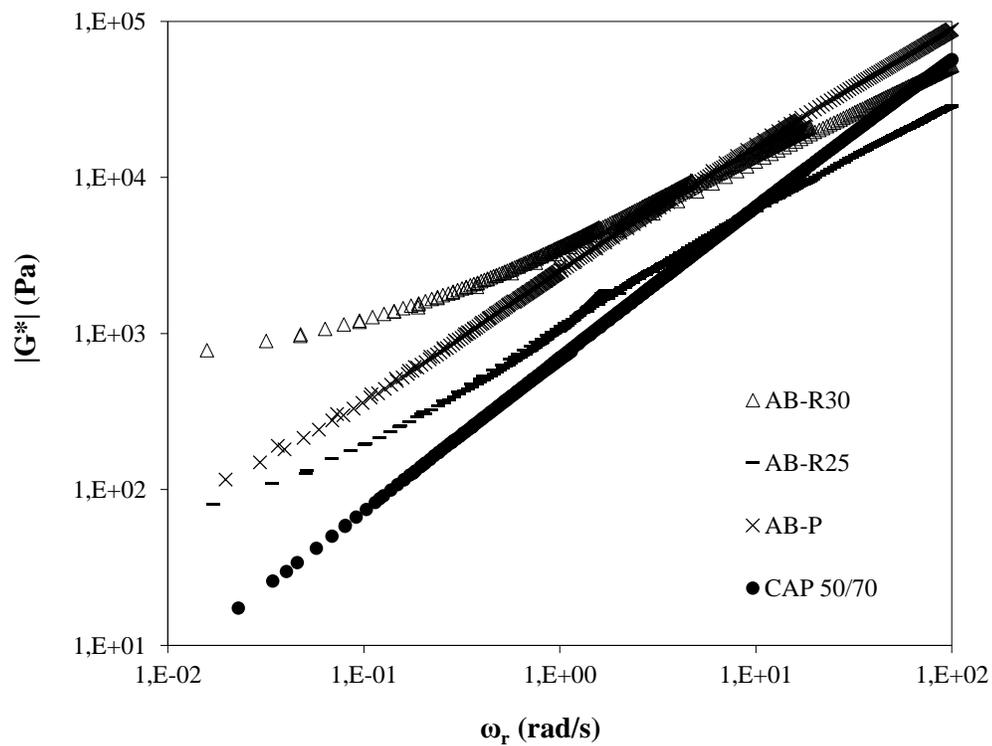
A Especificação de Serviço DNIT ES 112/09 regulamenta a produção de concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo *terminal blending*. Este tipo de ligante é, em geral menos viscoso, que outros tipos de asfalto-borracha. Portanto, é esperado que o teor ótimo de ligante para a mistura asfalto-borracha modificada por *Pellet*, MAB-P, exceda os limites da referida especificação.

#### 4.4 Caracterização viscoelástica dos ligantes

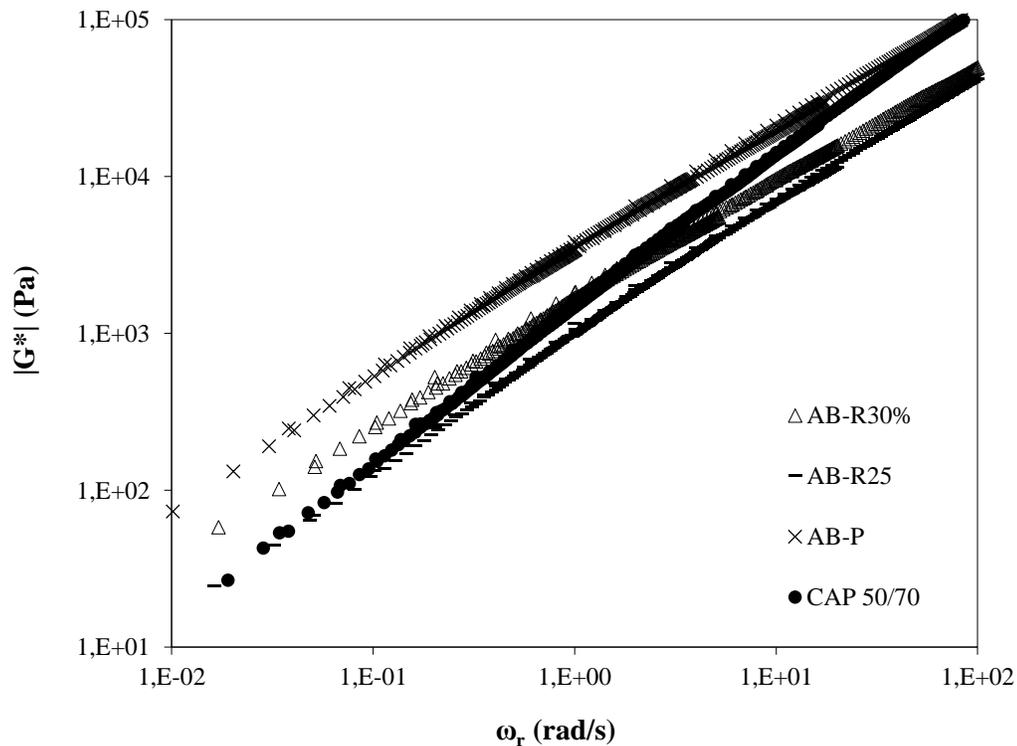
A construção da curva mestra foi realizada com base na metodologia aplicada por Pellinen (2001), com o auxílio da função *Solver* do MS Excel. Esta função é utilizada para realizar a otimização de dados com técnicas de regressão de mínimos quadrados não lineares. O procedimento consiste em minimizar a soma do erro quadrático entre o  $|G^*|$  medido durante o

ensaio e o valor de  $|G^*|$  modelado. Os coeficientes  $\vartheta$ ,  $\delta_{MS}$ ,  $\beta$ ,  $\gamma_{MS}$  e  $\alpha_T$  mostrados nas Equações 2.7, 2.8 e 2.9 são ajustados durante o processo de minimização.

As curvas mestras do módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) para o CAP 50/70 e os ligantes AB-P, AB-R25 e AB-R30 são mostradas na Figura 4.6, para a condição virgem, e Figura 4.7, para a condição pós-RTFOT. As figuras mostram o ajuste do modelo sigmoidal para a temperatura de referência de 52°C.



**Figura 4.6-** Curvas mestras para o módulo cisalhante dinâmico ( $|G^*|$ ) a temperatura de 52°C para o ligante CAP 50/70 e os ligantes modificados, condição virgem.

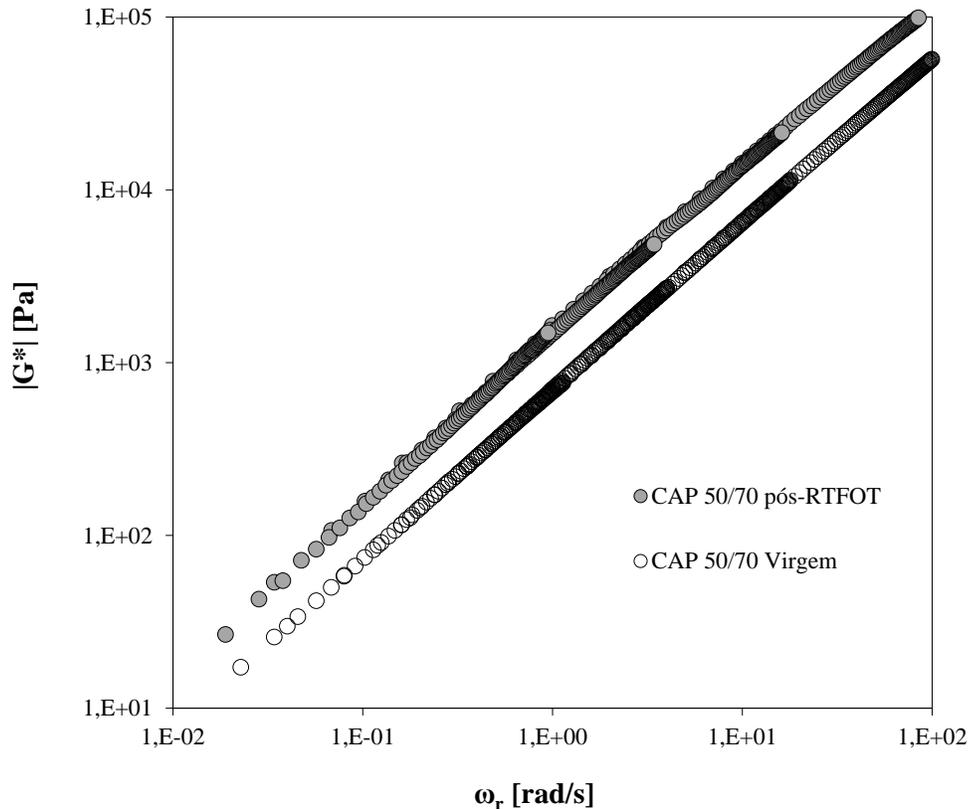


**Figura 4.7-** Curvas mestras para o módulo cisalhante dinâmico ( $|G^*|$ ) a temperatura de 52°C para o ligante CAP 50/70 e os ligantes modificados, condição pós-RTFOT.

De uma forma geral, na condição virgem, as modificações do CAP 50/70 por *Pellet* e RAR aumentaram os valores de  $|G^*|$ , mais significativamente para a faixa de baixas frequências/altas temperaturas. No mesmo sentido, como é possível observar na Figura 4.6 a não linearidade das curvas mestras dos ligantes modificados a baixas frequências indica redução da dependência de  $|G^*|$  em relação à frequência/temperatura, o que não acontece com ligante base, CAP 50/70.

Em relação aos modificadores *Pellet* e RAR, ainda na condição virgem, percebe-se que a modificação realizada pela RAR, tanto no AB-R25 quanto no AB-R30, apresenta menor inclinação da curva mestra para todas as frequências ensaiadas. Este fato demonstra a redução da suscetibilidade à frequência/temperatura dos ligantes asfálticos devido às modificações. A modificação por *Pellet*, avaliada segundo o comportamento do AB-P, mostra que em altas frequências o ligante na condição virgem apresenta valores de  $|G^*|$  mais elevados que o CAP 50/70 na mesma condição.

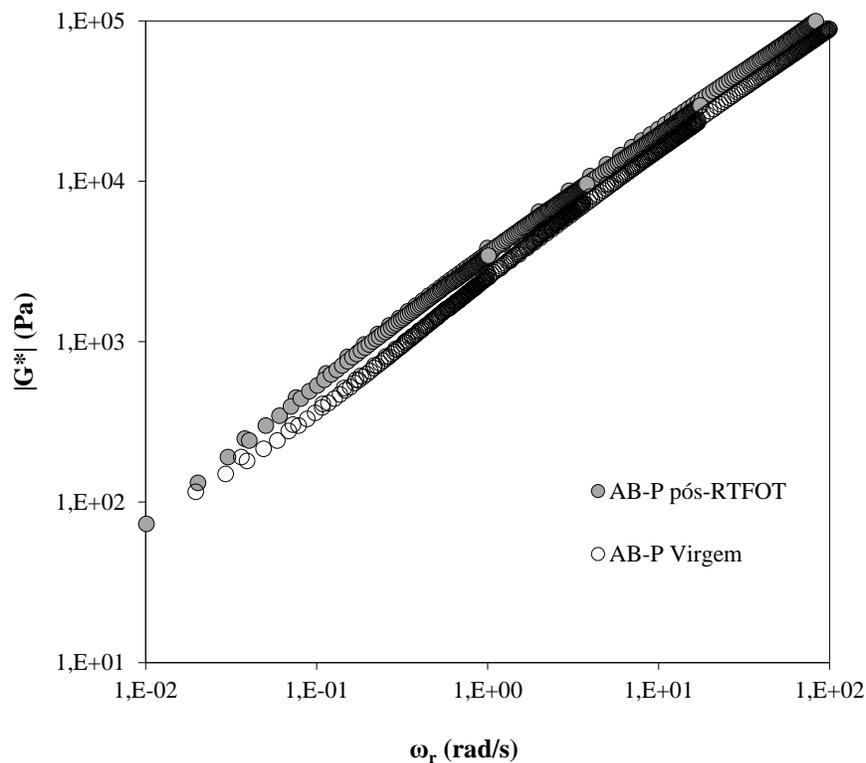
No intuito de comparar e melhor observar as mudanças que ocorreram nos ligantes após o envelhecimento, a seguir são mostradas as mesmas curvas mestras apresentadas anteriormente (Figura 4.6 e Figura 4.7), separadas para cada ligante na condição virgem e envelhecida.



**Figura 4.8-** Curva mestra para o módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) a temperatura de  $52^\circ\text{C}$  para o ligante CAP 50/70 nas condições virgem e envelhecido.

A Figura 4.8 mostra o comportamento reológico do CAP 50/70 virgem e após o envelhecimento de curto prazo. Nota-se que o envelhecimento aumenta a rigidez do ligante, mas não altera sua suscetibilidade à frequência/temperatura, o que pode ser afirmado pela observação da inclinação das curvas mestras.

Para a modificação realizada com a adição de *Pellet*, nota-se pela análise da Figura 4.9 que há um aumento discreto na rigidez do ligante após o envelhecimento à curto prazo e este não provoca alterações consideráveis na dependência dos valores de  $|G^*|$  à frequência/temperatura.

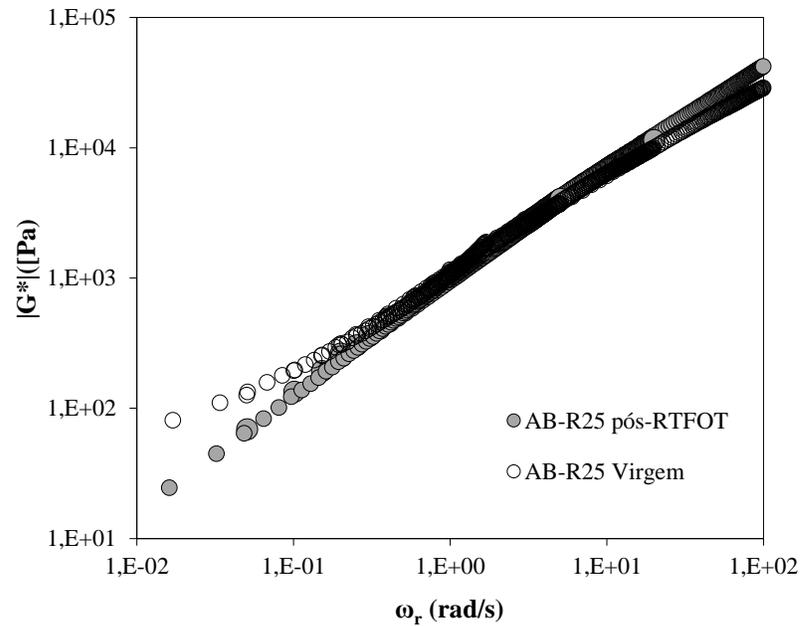


**Figura 4.9-** Curva mestra para o módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) a temperatura de  $52^\circ\text{C}$  para o ligante AB-P nas condições virgem e envelhecido.

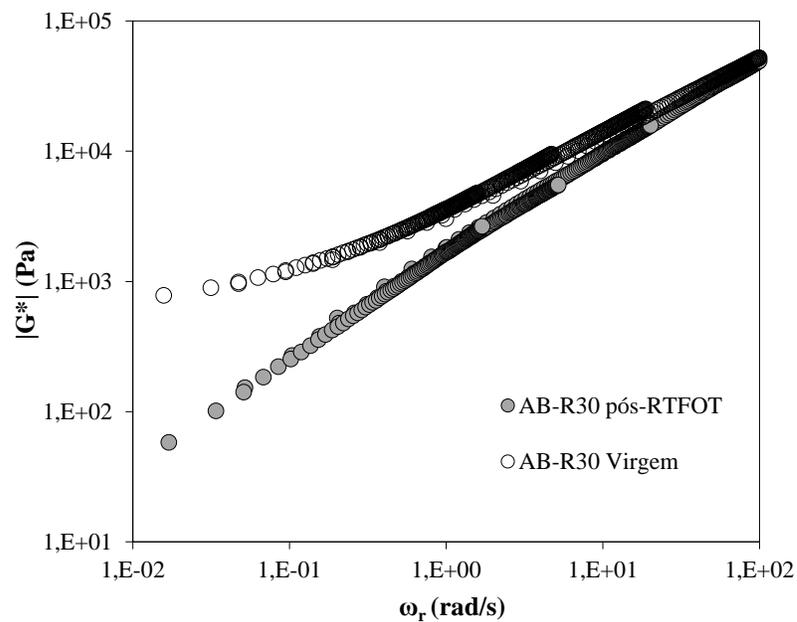
Na Figura 4.10 e na Figura 4.11 são apresentados os comportamentos dos ligantes modificados AB-R25 e AB-R30 respectivamente. Diferentemente do que acontece com o AB-P, a adição de RAR diminui a rigidez do ligante a baixas frequências/altas temperaturas nas duas composições após o envelhecimento. Este comportamento pode ser interpretado como atípico, pois estes ligantes apresentaram maiores valores de viscosidade rotacional, o que levaria a maiores valores de  $|G^*|$ . Este fato pode estar associado às propriedades de tixotropia com redução da rigidez por cisalhamento imprimida à RAR pelo processo de ativação do AMBS. Os fabricantes da RAR recomendam a etapa de envelhecimento para que haja a ativação do AMBS, o que não ocorreu nos ligantes modificados com RAR na condição virgem, explicando os valores mais elevados de rigidez encontrados nesta condição.

A adição de 25% de RAR em massa de ligante representou alterações significativas nos valores de  $|G^*|$ , principalmente na faixa de baixas frequências, como mostra as curvas mestras

pós-RTFOT. Apesar do aumento na rigidez, os ligantes AB-R30 e AB-P são menos suscetíveis à frequência/temperatura quando comparados ao ligante AB-R25.



**Figura 4.10-** Curva mestra para o módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) a temperatura de 52°C para o ligante AB-R25 nas condições virgem e envelhecido.



**Figura 4.11-** Curva mestra para o módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) a temperatura de 52°C para o ligante AB-R30 nas condições virgem e envelhecido.

A fim de justificar as afirmações realizadas sobre a inclinação da curva mestra e maior ou menor suscetibilidade dos ligantes ao efeito da taxa de carregamento e da temperatura, a Tabela 4.6 mostra os valores das inclinações da parte linear central das curvas mestras.

**Tabela 4.6-** Valores da inclinação da parte linear central da curva mestra do módulo dinâmico dos ligantes.

| <b>Ligante</b> | <i>m</i> <sub>Virgem</sub> | <i>m</i> <sub>Pós-RTFOT</sub> |
|----------------|----------------------------|-------------------------------|
| CAP 50/70      | 0,973                      | 0,976                         |
| AB-P           | 0,820                      | 0,790                         |
| AB-R25         | 0,750                      | 0,850                         |
| AB-R30         | 0,637                      | 0,723                         |

Não há registro na literatura de estudos reológicos realizados para os modificantes empregados nesta pesquisa, *Pellet* e RAR. Porém, diversos estudos comprovam que, em geral, a modificação do asfalto por polímeros e BMP aumenta o módulo de rigidez dos ligantes (Airey, 1997; Bahia *et al.*, 2001; Yusoff *et al.*, 2013 e Camargo, 2016). Os valores encontrados de  $|G^*|$  para os ligantes modificados se aproximam dos valores obtidos no estudo de Camargo (2016) para o ligante modificado com BMP.

O modelo sigmoidal é usualmente empregado para a construção da curva mestra de misturas asfálticas, e mais especificamente para a determinação da curva mestra em relação ao módulo dinâmico (Pellinen & Witczak, 2002). Neste sentido, não se obteve êxito na tentativa de modelar a curva mestra para o ângulo de fase dos ligantes. Estudos anteriores também verificaram a não aplicabilidade de outros modelos baseados no princípio da sobreposição tempo-temperatura para a curva mestra do ângulo de fase, principalmente para ligantes modificados por polímeros (PMB) (Airey, 1997; Olard & Di Benedetto, 2003 e Yusoff, 2012).

## 4.5 Comportamento à fadiga dos ligantes

Os resultados obtidos no ensaio LAS foram analisados conforme a teoria VECD e as equações apresentadas na seção 3.6.3 do Capítulo 3. A Tabela 4.7 apresenta 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.

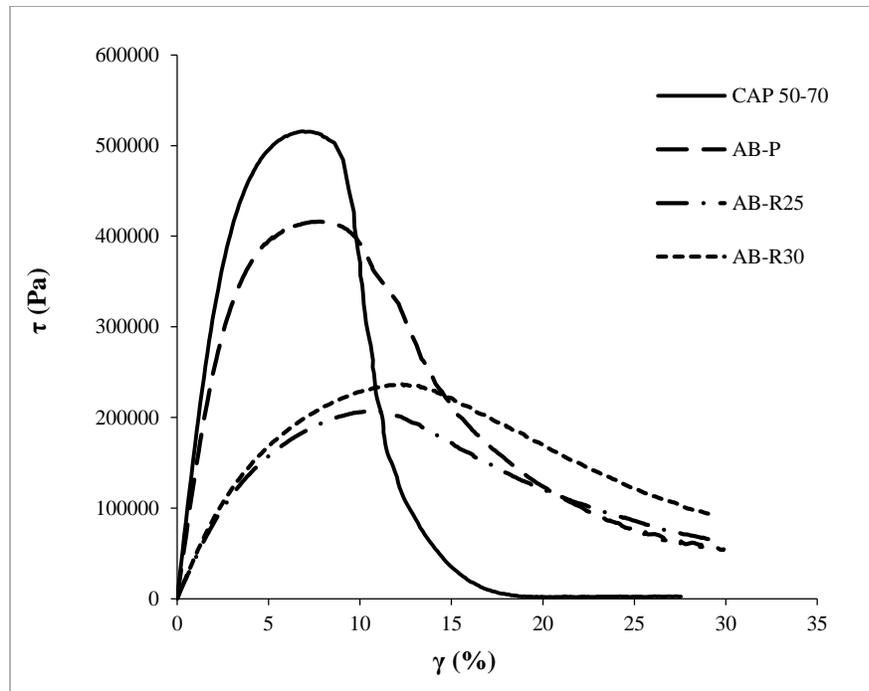
**Tabela 4.7-** Coeficientes obtidos do ensaio LAS para os ligantes em estudo.

| Ligante   | $m$   | $\alpha$ | $C_1$ | $C_2$  | $D_f$ | $A$      | $B$      |
|-----------|-------|----------|-------|--------|-------|----------|----------|
| CAP 50/70 | 0,710 | 1,408    | 0,126 | 0,4108 | 39,3  | 5,83E+04 | -2,81547 |
| AB-P      | 0,560 | 1,785    | 0,188 | 0,3091 | 49,8  | 5,74E+05 | -3,56901 |
| AB-R25    | 0,683 | 1,463    | 0,114 | 0,3740 | 76,1  | 4,00E+05 | -2,92633 |
| AB-R30    | 0,664 | 1,506    | 0,118 | 0,3599 | 94,6  | 8,04E+05 | -3,01145 |

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 os ligantes AB-P e AB-R30 indicam que estes ligantes serão menos sensíveis à amplitude de deformação imposta do que os ligantes CAP 50/70 e AB-R25.

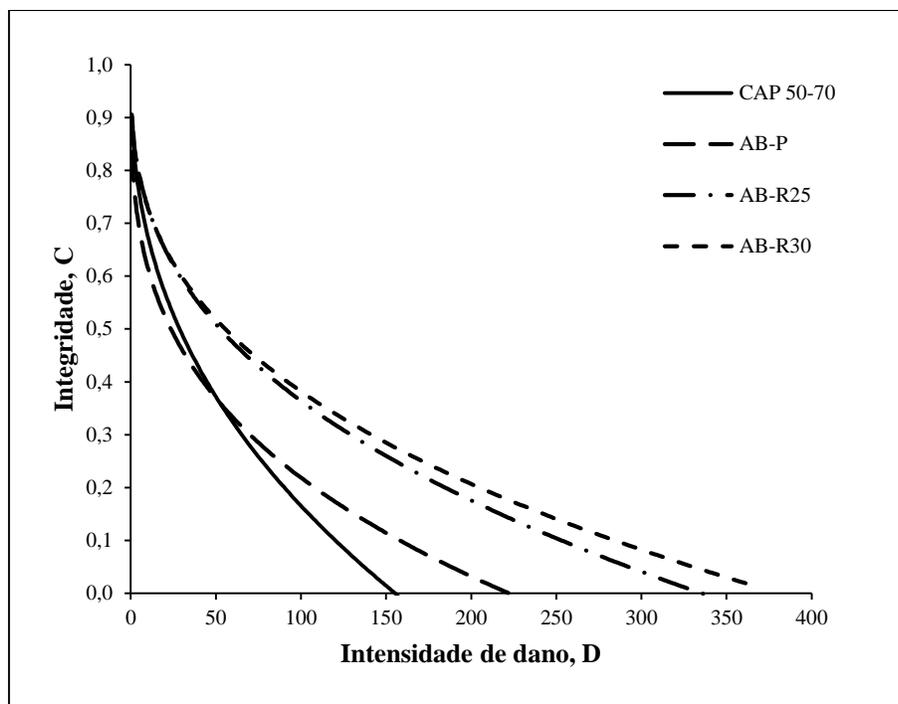
Pode-se afirmar que os resultados obtidos na primeira etapa do ensaio LAS estão em conformidade com a caracterização viscoelástica dos ligantes apresentada no item 4.4. As análises destes resultados também mostraram que os ligantes AB-P e AB-R30 são menos suscetíveis aos valores de frequência/temperatura que os ligantes CAP 50/70 e AB-R25.

O valor do parâmetro  $A$  indica a integridade do material em função do dano acumulado e do módulo complexo 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. Observa-se que a modificação do CAP 50/70 resulta em aumento de todos os valores de  $A$ , como mostra a Tabela 4.8. A Figura 4.12 mostra as curvas de tensão cisalhante versus deformação cisalhante para todos os ligantes em estudo. O ligante CAP 50/70 apresenta maior valor de tensão cisalhante na ruptura e maior valor de rigidez quando comparado aos ligantes modificados.



**Figura 4.12-** Curva de tensão deformação para o CAP 50/70 e os ligantes modificados no ensaio LAS.

O cruzamento dos valores do parâmetro de dano (D) com a integridade (C) representa a evolução do dano no ligante, caracterizado pela denominada curva característica. As curvas características de dano são mostradas para todos os ligantes na Figura 4.13. Para a mesma redução de integridade (C), o parâmetro de dano (D) acumulado pelos ligantes modificados é muito mais elevado se comparado ao ligante convencional. Os resultados de acúmulo de dano mostraram-se dependentes da rigidez do ligante, sendo maior para aqueles que apresentaram menor rigidez. O CAP 50/70 apresenta rápida diminuição da integridade sendo muito sensível ao parâmetro de dano, que pode estar relacionada ao comportamento do mesmo na curva tensão cisalhante versus deformação cisalhante apresentada na Figura 4.12.



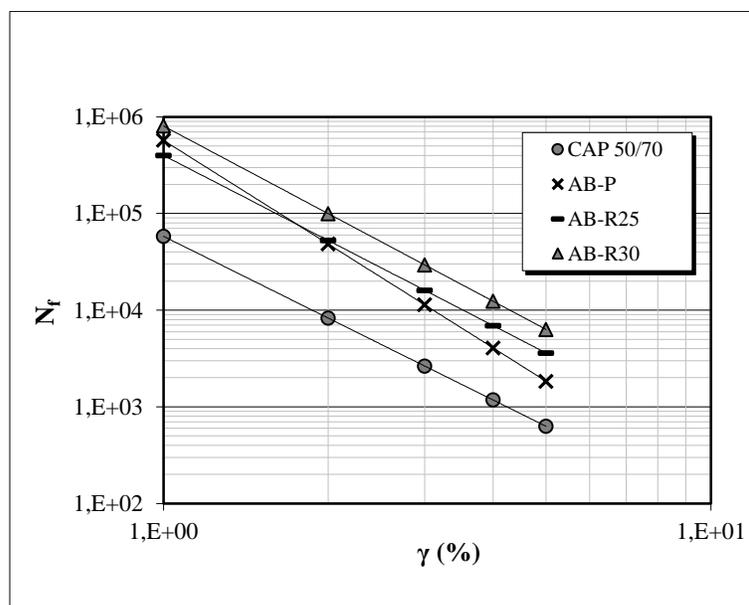
**Figura 4.13-** Curva de dano característica do ensaio LAS para o ligante CAP 50/70 e os ligantes modificados.

Assim como para a análise de fadiga em misturas asfálticas, há diversas discussões ente os pesquisadores sobre a adoção de um bom critério de ruptura para análise de fadiga nos ligantes. O critério muito aceito é a redução em 50% de  $|G^*|$ . Para a análise de fadiga nos ligantes, tem-se observado a correlação entre os resultados do ensaio de varredura no tempo e o ensaio de fadiga acelerada. Jhonson (2010) observou que a redução de 35% no valor de  $G^*.sen\delta$  proporciona uma correlação satisfatória entre os dois tipos de ensaios. Hintz (2012) analisou os resultados do ensaio de varredura no tempo e estabeleceu o critério de fadiga com base na energia dissipada. A comparação do número de ciclos que levam a ruptura ( $N_f$ ) e o comprimento da fissura propagada na amostra de ligante, na tensão cisalhante de pico, revelaram uma boa correlação entre os resultados. Segundo a autora, as análises de fadiga típicas dependem de definições de ruptura arbitrárias e, portanto, o critério de falha proposto é vantajoso em relação às análises tradicionais, uma vez que considera a resistência do material ao dano.

A determinação dos parâmetros  $A$  e  $B$  da lei de fadiga (Equação 2.10) pela teoria VECD permite prever o número de ciclos que causará a ruptura do ligante asfáltico. Na Tabela 4.8 apresenta-se 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.

**Tabela 4.8-** Dados de entrada do ensaio LAS para o modelo de fadiga para o ligante convencional e os ligantes modificados.

| Ligante   | A        | B      | $N_f$ 1% | $N_f$ 2% | $N_f$ 3% | $N_f$ 4% | $N_f$ 5% |
|-----------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| CAP 50/70 | 5,83E+04 | -2,815 | 5,83E+04 | 8,28E+03 | 2,64E+03 | 1,18E+03 | 6,27E+02 |
| AB-P      | 5,74E+05 | -3,569 | 5,74E+05 | 4,83E+04 | 1,14E+04 | 4,07E+03 | 1,84E+03 |
| AB-R25    | 4,00E+05 | -2,926 | 4,00E+05 | 5,26E+04 | 1,61E+04 | 6,92E+03 | 3,60E+03 |
| AB-R30    | 8,04E+05 | -3,011 | 8,04E+05 | 9,98E+04 | 2,94E+04 | 1,24E+04 | 6,32E+03 |



**Figura 4.14-** Vida de fadiga  $N_f$  em função dos valores de deformação cisalhante aplicada no ligante convencional e demais ligantes modificados.

Em relação aos valores apresentados na Tabela 4.8 e análise da Figura 4.14, pode-se afirmar que, em média, o AB-P apresenta um aumento de 4 vezes o valor de  $N_f$  em relação ao CAP 50/70. As modificações por RAR aumentaram, em média, 5 vezes o valor de  $N_f$  para o ligante AB-R25, seguido de um aumento de 10 vezes o valor de  $N_f$  para o ligante AB-R30.

Considerando a metodologia aplicada nesta fase da pesquisa, a análise realizada mostra a diferença na evolução do dano com a redução da integridade. A interpretação dos resultados mostra que para um mesmo valor de integridade dos ligantes asfálticos, aquele que apresenta maior acúmulo de dano apresenta um melhor desempenho com relação à fadiga. E ainda, que os ligantes modificados, menos rígidos como exposto na seção 4.4, sob o mesmo nível de deformação que outros com rigidez maior, possuem vida de fadiga mais elevada. Ou seja, maior

rigidez, menor vida de fadiga. Os resultados observados corroboram as pesquisas de Nuñez (2013), Micaelo *et al.* (2015) e Carmago (2016).

É importante ressaltar que não necessariamente a característica de resistência à fadiga apresentada pelo ligante será a mesma encontrada para as misturas asfálticas. Mello (2008) em sua tese de doutorado realizou uma extensa pesquisa sobre a evolução do dano em diferentes tipos de misturas asfálticas. O autor mostra que o comportamento mecânico das misturas está associado a outros fatores além da rigidez, como a granulometria, o volume de vazios, a temperatura e o nível de deformação que são submetidas.

#### **4.6 Parâmetros volumétricos e grau de compactação das amostras**

Para avaliar a metodologia empregada durante a produção dos corpos de prova prismáticos, foram conduzidos ensaios de laboratório para a determinação da densidade aparente das vigotas seguindo os preceitos da AASHTO T 166/13. Para cada mistura asfáltica, foi determinado a densidade máxima medida pela norma ASTM D 2041/11 (método *Rice*). Desta forma, são apresentados para cada viga das diferentes misturas asfálticas produzidas: o volume de vazios ( $V_v$ ), vazios no agregado mineral (VAM), relação betume vazios (RBV) e grau de compactação (GC).

As tabelas a seguir apresentam os resultados de densidade aparente e dos parâmetros volumétricos para a mistura MAB-P, MAB-R25, MAB-R30-1, MAB-R30-2 e MAB-R30-3 respectivamente. Vale lembrar como visto no Capítulo 4 item 4.3, que os valores de densidade aparente de projeto,  $V_v$ , VAM e RBV assumidos para todas as misturas foram de 2,323 g/cm<sup>3</sup>; 5,4 %; 14 % (valor mínimo) e 78 % respectivamente.

**Tabela 4.9-** Resultados da densidade aparente das vigotas, Vv, VAM, RBV e GC das vigotas moldadas com a mistura MAB-P.

| <b>Mistura MAB-P</b>           |  |               |                |                |                            |
|--------------------------------|--|---------------|----------------|----------------|----------------------------|
| <b>Identificação das vigas</b> | <b>Densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Vv (%)</b> | <b>VAM (%)</b> | <b>RBV (%)</b> | <b>Grau de compactação</b> |
| 1                              | 2,293  | 6,3           | 25,4           | 75,2           | 94                         |
| 2                              | 2,304  | 5,9           | 25,0           | 76,6           | 94                         |
| 4                              | 2,257  | 7,7           | 26,5           | 70,8           | 92                         |
| 5                              | 2,252  | 8,0           | 26,7           | 70,1           | 92                         |
| 6                              | 2,269  | 7,3           | 26,1           | 72,2           | 93                         |
| 7                              | 2,276  | 7,0           | 25,9           | 73,0           | 93                         |
| 8                              | 2,259  | 7,7           | 26,5           | 71,0           | 92                         |
| Média                          | 2,274  | 7,1           | 26,0           | 72,8           | 93                         |
| Desv. Padrão                   | 0,02   | 0,74          | 0,59           | 2,25           | 0,74                       |
| Coef. Variação                 | 0,01   | 0,10          | 0,02           | 0,03           | 0,01                       |

**Tabela 4.10-** Resultados da densidade aparente, Vv, VAM, RBV e GC das vigotas moldadas com a mistura MAB-R25.

| <b>Mistura MAB-R25</b>         |  |               |                |                |                            |
|--------------------------------|--|---------------|----------------|----------------|----------------------------|
| <b>Identificação das vigas</b> | <b>Densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Vv (%)</b> | <b>VAM (%)</b> | <b>RBV (%)</b> | <b>Grau de compactação</b> |
| 1                              | 2,290  | 6,5           | 25,8           | 74,8           | 94                         |
| 2                              | 2,293  | 6,4           | 25,7           | 75,2           | 94                         |
| 3                              | 2,309  | 5,7           | 25,2           | 77,3           | 94                         |
| 4                              | 2,315  | 5,5           | 25,0           | 78,1           | 95                         |
| 5                              | 2,322  | 5,2           | 24,8           | 79,0           | 95                         |
| 6                              | 2,309  | 5,7           | 25,2           | 77,3           | 94                         |
| 7                              | 2,321  | 5,2           | 24,8           | 78,9           | 95                         |
| 8                              | 2,318  | 5,4           | 24,9           | 78,5           | 95                         |
| Média                          | 2,310  | 5,7           | 25,2           | 77,4           | 94                         |
| Desv. Padrão                   | 0,01   | 0,50          | 0,39           | 1,61           | 0,50                       |
| Coef. Variação                 | 0,01   | 0,09          | 0,02           | 0,02           | 0,01                       |

**Tabela 4.11-** Resultados da densidade aparente, Vv, VAM, RBV e GC das vigotas moldadas com a mistura MAB-R30-1.

| <b>Mistura MAB-R30-1</b>       |  |               |                |                |                            |
|--------------------------------|--|---------------|----------------|----------------|----------------------------|
| <b>Identificação das vigas</b> | <b>Densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Vv (%)</b> | <b>VAM (%)</b> | <b>RBV (%)</b> | <b>Grau de compactação</b> |
| 1                              | 2,281  | 6,1           | 24,9           | 75,7           | 94                         |
| 2                              | 2,324  | 4,3           | 23,5           | 81,7           | 96                         |
| 3                              | 2,320  | 4,5           | 23,6           | 81,1           | 96                         |
| 4                              | 2,322  | 4,4           | 23,6           | 81,4           | 96                         |
| 5                              | 2,314  | 4,7           | 23,8           | 80,2           | 95                         |
| 6                              | 2,316  | 4,6           | 23,7           | 80,6           | 95                         |
| 7                              | 2,300  | 5,3           | 24,3           | 78,2           | 95                         |
| Média                          | 2,311  | 4,8           | 23,9           | 79,8           | 95                         |
| Desv. Padrão                   | 0,02   | 0,63          | 0,51           | 2,17           | 0,63                       |
| Coef. Variação                 | 0,01   | 0,13          | 0,02           | 0,03           | 0,01                       |

**Tabela 4.12-** Resultados da densidade aparente, Vv, VAM, RBV e GC das vigotas moldadas com a mistura MAB-R30-2.

| <b>Mistura MAB-R30-2</b>       |  |               |                |                |                            |
|--------------------------------|--|---------------|----------------|----------------|----------------------------|
| <b>Identificação das vigas</b> | <b>Densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Vv (%)</b> | <b>VAM (%)</b> | <b>RBV (%)</b> | <b>Grau de compactação</b> |
| 1                              | 2,323  | 4,5           | 23,7           | 81,0           | 96                         |
| 2                              | 2,344  | 3,6           | 23,0           | 84,2           | 96                         |
| 3                              | 2,350  | 3,4           | 22,8           | 85,2           | 97                         |
| 4                              | 2,349  | 3,4           | 22,8           | 85,0           | 97                         |
| 5                              | 2,344  | 3,6           | 23,0           | 84,2           | 96                         |
| 6                              | 2,331  | 4,2           | 23,4           | 82,2           | 96                         |
| 7                              | 2,329  | 4,2           | 23,5           | 81,9           | 96                         |
| Média                          | 2,338  | 3,9           | 23,2           | 83,4           | 96                         |
| Desv. Padrão                   | 0,01   | 0,44          | 0,35           | 1,65           | 0,44                       |
| Coef. Variação                 | 0,005  | 0,11          | 0,02           | 0,02           | 0,005                      |

**Tabela 4.13-** Resultados da densidade aparente, Vv, VAM, RBV e GC das vigotas moldadas com a mistura MAB-R30-3.

| <b>Mistura MAB-R30-3</b>      |  |               |                |                |                            |
|-------------------------------|--|---------------|----------------|----------------|----------------------------|
| <b>Identificação das viga</b> | <b>Densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Vv (%)</b> | <b>VAM (%)</b> | <b>RBV (%)</b> | <b>Grau de compactação</b> |
| 1                             | 2.301  | 5.2           | 24.2           | 78.4           | 95                         |
| 2                             | 2.302  | 5.2           | 24.2           | 78.6           | 95                         |
| 3                             | 2.303  | 5.1           | 24.2           | 78.8           | 95                         |
| 4                             | 2.313  | 4.7           | 23.8           | 80.1           | 95                         |
| 5                             | 2.300  | 5.3           | 24.3           | 78.3           | 95                         |
| 6                             | 2.280  | 6.1           | 24.9           | 75.6           | 94                         |
| 7                             | 2.262  | 6.8           | 25.5           | 73.3           | 93                         |
| Média                         | 2.3  | 5.5           | 24.4           | 77.6           | 95                         |
| Desv. Padrão                  | 0.02   | 0.66          | 0.53           | 2.17           | 0.66                       |
| Coef. Variação                | 0.01   | 0.12          | 0.02           | 0.03           | 0.01                       |

Os valores dos parâmetros volumétricos expostos nas tabelas mostram que o procedimento de confecção das placas não foi satisfatório no sentido de atender de forma homogênea aos valores estabelecidos na dosagem. Apesar da pouca variabilidade dos parâmetros dentro de uma mesma mistura, a grande variabilidade, principalmente do volume de vazios e conseqüentemente, no grau de compactação, entre elas, apontam a necessidade de aperfeiçoamento do processo de elaboração e compactação das mesmas. Desta forma, um procedimento mais controlado permitirá que o único parâmetro a influenciar o comportamento das misturas asfálticas seja o tipo de ligante asfáltico empregado.

A mistura MAB-P apresenta valores de volume de vazios discrepantes das demais. Apesar do projeto de dosagem contemplar o material utilizado nesta mistura, durante a produção da placa a compactação ocorreu sob vibração e na dosagem, a mistura foi compactada por amassamento.

Além disso, o processo de compactação da mistura MAB-P apontou a necessidade de alteração da altura do molde metálico, e consequentemente do volume de massa asfáltica a ser compactado, o que permitiu a melhora do processo na obtenção das demais misturas.

As misturas fabricadas com a RAR, com a exceção da MAB-R30-2, apresentam volume de vazios bem próximos do estabelecido no projeto. Apesar deste fato, a grande variabilidade nos parâmetros deixa clara a necessidade da realização da etapa de dosagem para as diferentes composições de material alternativo, a fim de estabelecer o teor ótimo para parâmetros volumétricos fixados.

Tayebali *et al.* (1994) consideram o volume de vazios como uma das variáveis que influenciam diretamente na vida de fadiga de um concreto asfáltico. Neste sentido, desconsiderando-se as misturas MAB-P e MAB-R30-2 as quais não apresentaram volume de vazios médio dentro de uma faixa esperada, foi aplicada a análise de variância simples (ANOVA) entre as misturas MAB-R25, MAB-R30-1 e MAB-R30-3, com nível de confiança de 95%, a fim de averiguar se os corpos de prova eram estruturalmente iguais. Para que os grupos apresentassem a mesma contagem, também foi desconsiderada a viga de identificação número 1 da mistura MAB-R25. O parâmetro considerado para a análise foi o volume de vazios e a hipótese nula adotada supõe que todos os volumes de vazios das 21 amostras compactadas pertencem ao mesmo espaço amostral. A hipótese alternativa então, supõe que pelo menos um dos volumes de vazios obtidos para os 21 corpos de prova não pertence ao espaço amostral. A Tabela 4.14 mostra os resultados da análise de variância aplicada sobre o volume de vazios obtidos para as vigas das misturas MAB-R25, MAB-R30-1 e MAB-R30-3.

**Tabela 4.14-** Resultado ANOVA para as vigas das misturas MAB-R25, MAB-R30-1 e MAB-R30-3, compactadas por placa vibratória, considerando o volume de vazios.

RESUMO

| Grupos   | Contagem | Soma     | Média   | Variância |
|----------|----------|----------|---------|-----------|
| Coluna 1 | 7        | 39,07787 | 5,58255 | 0,16870   |
| Coluna 2 | 7        | 33,86508 | 4,83787 | 0,39936   |
| Coluna 3 | 7        | 38,40465 | 5,48638 | 0,50955   |

ANOVA

| Fonte da variação | Soma dos quadrados (SQ) | Graus de liberdade (gl) | Médias dos quadrados (MQ) | F       | Probabilidade | Valor crítico para F |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------|---------------|----------------------|
| Entre grupos      | 2,29687                 | 2                       | 1,14843                   | 3,19716 | 0,06484       | 3,55456              |
| Dentro dos grupos | 6,46567                 | 18                      | 0,35920                   |         |               |                      |
| Total             | 8,76254                 | 20                      |                           |         |               |                      |

A função de distribuição de probabilidade Fisher ( $F = 3,197$ ) é inferior ao valor crítico calculado indicando que a hipótese nula é aceita. Significa dizer que, de uma forma geral, para as misturas MAB-R25, MAB-R30-1 e MAB-R30-3 o procedimento produziu amostras estatisticamente pertencentes ao mesmo grupo em relação ao volume de vazios.

Apesar da grande variabilidade apresentada pelas misturas MAB-P e MAB-R30-2, foram conduzidos os ensaios de caracterização viscoelástica e ensaios de fadiga à flexão em todas as misturas asfálticas produzidas. Os ensaios de fadiga conduzidos nas misturas MAB-P e MAB-R25 ocorreram à temperatura de  $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ . Para a obtenção de três curvas de Whöler em três diferentes temperaturas, nas misturas MAB-R30-1, MAB-R30-2 e MAB-R30-3 o ensaio de fadiga foi conduzido às temperaturas de  $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ ,  $5 \pm 0,5^\circ\text{C}$  e  $12,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$  respectivamente.

#### **4.7 Caracterização viscoelástica das misturas asfálticas**

A campanha de caracterização viscoelástica foi realizada para um mínimo de três amostras prismáticas referentes a cada mistura produzida. A varredura de frequência foi realizada nos valores de 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 15; 20; 25 Hz e temperaturas de 5, 15, 25 e  $35^\circ\text{C}$  para a determinação do módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) e ângulo de fase ( $\phi$ ). A deformação aplicada às amostras foi de  $50\mu\epsilon$  de forma a evitar o dano prematuro, o modo de pulso aplicado foi senoidal e com 200 repetições por ciclo de carregamento.

Assim como o processo realizado para os ligantes, a curva mestra para as misturas asfálticas foi modelada segundo a Equação 2.7 com o auxílio da função *Solver* do MS Excel. A metodologia é baseada no trabalho de Sotil (2005) *apud* Mello (2008). Segundo Mello (2008) os resultados obtidos experimentalmente são transferidos a uma planilha que calcula automaticamente todas as variáveis necessárias, definindo um modelo da função sigmoideal que melhor se aproxima dos valores observados em laboratório.

Nesta seção, além dos resultados das misturas produzidas no INFRALAB, será apresentado o resultado da caracterização viscoelástica de uma mistura *field blend* aplicada em um trecho da rodovia RJ-122, em Cachoeiras de Macacu, no Rio de Janeiro. A placa retirada de um trecho da RJ-122 e doada a esta pesquisa pelo DER-RJ foi submetida aos mesmo processo de corte em serra de bancada das demais placas. Esta mistura, produzida por via úmida local e de granulometria descontínua, também foi parte do trabalho de doutorado de Camargo (2016). A

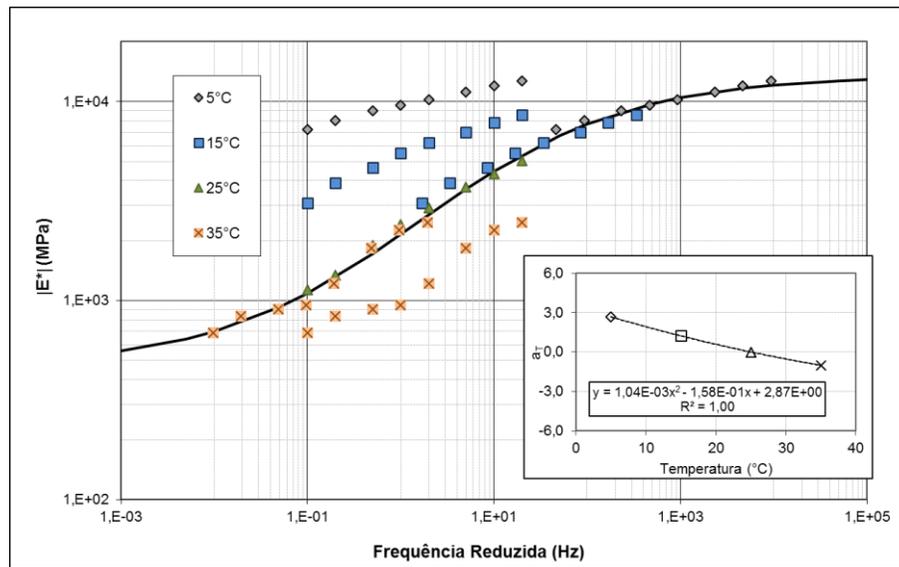
mistura foi nomeada MAB-RJ-122 e os valores obtidos durante o ensaio de módulo dinâmico são apresentados na Tabela 4.15.

**Tabela 4.15-** Resultados dos ensaios de módulo dinâmico para duas amostras da mistura MAB-RJ-122.

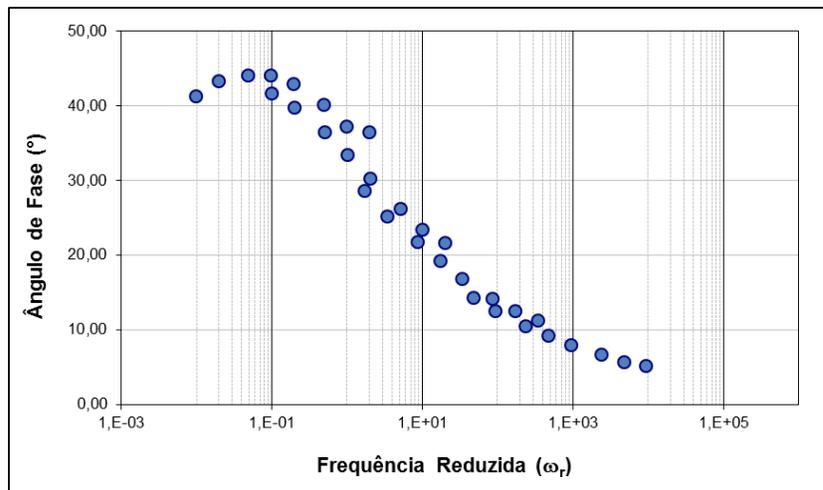
| Temp.<br>(°C) | Freq.<br>(Hz) | E*  (MPa) |           | Ângulo de fase (°) |           |
|---------------|---------------|-----------|-----------|--------------------|-----------|
|               |               | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 1          | Amostra 2 |
| 5             | 20            | 1,23E+04  | 1,30E+04  | 5,2                | 5,3       |
| 5             | 10            | 1,16E+04  | 1,25E+04  | 5,7                | 5,7       |
| 5             | 5             | 1,08E+04  | 1,16E+04  | 6,8                | 6,6       |
| 5             | 2             | 9,88E+03  | 1,06E+04  | 8,2                | 7,7       |
| 5             | 1             | 9,18E+03  | 9,99E+03  | 9,5                | 8,9       |
| 5             | 0,5           | 8,67E+03  | 9,38E+03  | 11                 | 10,1      |
| 5             | 0,2           | 7,61E+03  | 8,52E+03  | 13,1               | 12,1      |
| 5             | 0,1           | 6,79E+03  | 7,69E+03  | 14,9               | 13,8      |
| 15            | 20            | 8,34E+03  | 8,84E+03  | 11,5               | 11        |
| 15            | 10            | 7,62E+03  | 8,03E+03  | 12,9               | 12,2      |
| 15            | 5             | 6,84E+03  | 7,22E+03  | 14,6               | 13,9      |
| 15            | 2             | 5,98E+03  | 6,47E+03  | 17,3               | 16,4      |
| 15            | 1             | 5,27E+03  | 5,74E+03  | 19,7               | 18,8      |
| 15            | 0,5           | 4,42E+03  | 4,92E+03  | 22,3               | 21,2      |
| 15            | 0,2           | 3,78E+03  | 4,03E+03  | 25,9               | 24,6      |
| 15            | 0,1           | 3,08E+03  | 3,10E+03  | 28,7               | 27,4      |
| 25            | 20            | 5,11E+03  | 4,97E+03  | 21,5               | 21,8      |
| 25            | 10            | 4,37E+03  | 4,30E+03  | 23,4               | 23,6      |
| 25            | 5             | 3,76E+03  | 3,68E+03  | 26,1               | 26,3      |
| 25            | 2             | 2,96E+03  | 2,89E+03  | 30,2               | 30,3      |
| 25            | 1             | 2,36E+03  | 2,47E+03  | 33,5               | 33,4      |
| 25            | 0,5           | 1,86E+03  | 1,92E+03  | 36,5               | 36,4      |
| 25            | 0,2           | 1,34E+03  | 1,35E+03  | 40                 | 39,6      |
| 25            | 0,1           | 1,18E+03  | 1,08E+03  | 42                 | 41,3      |
| 35            | 20            | 2,38E+03  | 2,54E+03  | 36,8               | 36,3      |
| 35            | 10            | 2,17E+03  | 2,34E+03  | 37,7               | 36,9      |
| 35            | 5             | 1,75E+03  | 1,93E+03  | 40,7               | 39,6      |
| 35            | 2             | 1,22E+03  | 1,21E+03  | 43,6               | 42,3      |
| 35            | 1             | 8,57E+02  | 1,04E+03  | 45                 | 43,2      |
| 35            | 0,5           | 8,38E+02  | 9,76E+02  | 45                 | 43,3      |
| 35            | 0,2           | 7,18E+02  | 9,53E+02  | 44,7               | 42,1      |
| 35            | 0,1           | 6,52E+02  | 7,23E+02  | 42,7               | 40        |

Para a caracterização viscoelástica da mistura MAB-RJ-122 em específico, as varreduras de frequência e temperatura foram aplicadas a duas vigotas. Como pode ser observado, o valor do

módulo dinâmico é reduzido com o aumento da temperatura para um mesmo valor de frequência, assim como reduz com a diminuição da frequência aplicada. É comum observar o aumento nos valores do ângulo de fase com o aumento da temperatura, pois este fato faz com que as misturas asfálticas percam suas características elásticas, apresentando comportamento mais próximo de um material viscoso. A Figura 4.17 apresenta a curva mestra do módulo dinâmico do valor médio para a mistura MAB-RJ-122, bem como a relação entre o fator de translação com a temperatura. A Figura 4.16 apresenta a variação da média do ângulo de fase com a frequência reduzida.



**Figura 4.15-** Curva mestra na temperatura de referência de 25°C para a mistura MAB-R-122 e relação entre o fator de translação e a temperatura.



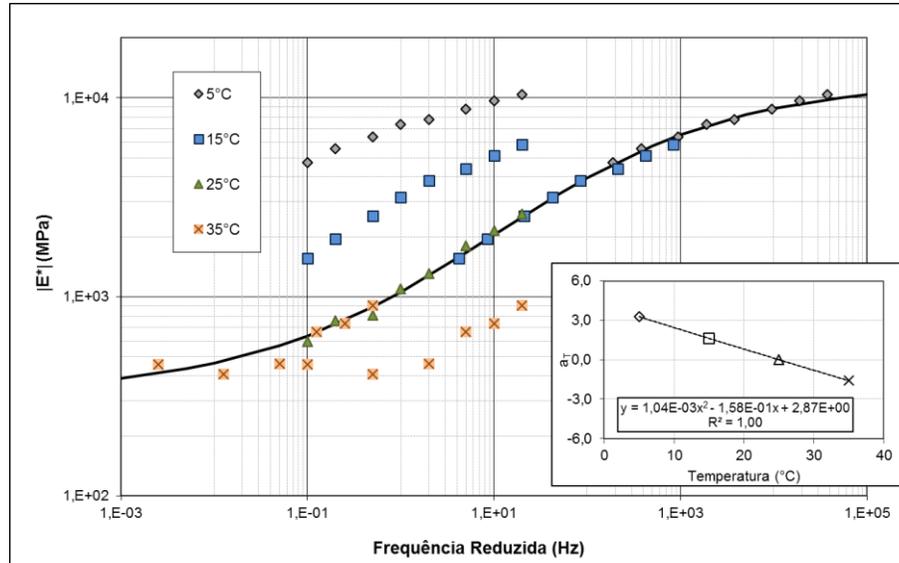
**Figura 4.16-** Variação do ângulo de fase com a frequência reduzida para a mistura MAB-RJ-122.

A Tabela 4.16 apresenta os resultados do módulo dinâmico para a mistura MAB-P nas temperaturas e frequências usadas nos ensaios. Assim como o ocorrido na mistura MAB-RJ-122, para a mistura MAB-P nas temperaturas de 5, 15 e 25°C, o aumento da temperatura reduz o módulo dinâmico e e aumenta o ângulo de fase, observando-se as mesmas alterações para a redução da taxa de carregamento.

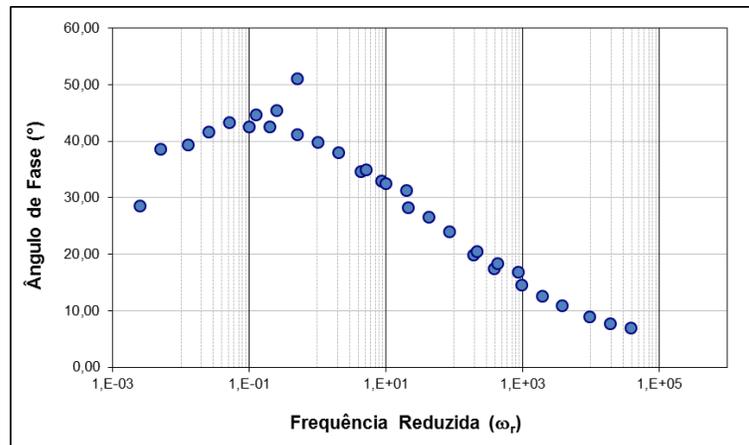
**Tabela 4.16-** Resultados dos ensaios de módulo dinâmico para três amostras da mistura MAB-P.

| Temp.<br>(°C) | Freq.<br>(Hz) | E*  (MPa) |           |           | Ângulo de fase (°) |           |           |
|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-----------|-----------|
|               |               | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 3 | Amostra 1          | Amostra 2 | Amostra 3 |
| 5             | 20            | 1,05E+04  | 1,02E+04  | 1,04E+04  | 6,8                | 7,4       | 7         |
| 5             | 10            | 9,69E+03  | 9,55E+03  | 9,70E+03  | 7,5                | 8         | 7,6       |
| 5             | 5             | 8,85E+03  | 8,78E+03  | 8,80E+03  | 8,8                | 9,2       | 9         |
| 5             | 2             | 7,79E+03  | 7,75E+03  | 7,72E+03  | 10,7               | 11,1      | 10,9      |
| 5             | 1             | 7,37E+03  | 7,29E+03  | 7,37E+03  | 12,4               | 12,9      | 12,7      |
| 5             | 0,5           | 6,42E+03  | 6,40E+03  | 6,34E+03  | 14,3               | 14,8      | 14,6      |
| 5             | 0,2           | 5,61E+03  | 5,59E+03  | 5,46E+03  | 17,2               | 17,6      | 17,7      |
| 5             | 0,1           | 4,84E+03  | 4,74E+03  | 4,57E+03  | 19,5               | 19,9      | 20,4      |
| 15            | 20            | 5,94E+03  | 5,91E+03  | 5,70E+03  | 16,4               | 17        | 17,1      |
| 15            | 10            | 5,22E+03  | 5,15E+03  | 5,01E+03  | 18,1               | 18,5      | 18,7      |
| 15            | 5             | 4,46E+03  | 4,48E+03  | 4,29E+03  | 20,2               | 20,6      | 20,9      |
| 15            | 2             | 3,86E+03  | 3,86E+03  | 3,79E+03  | 23,4               | 24,2      | 24,3      |
| 15            | 1             | 3,26E+03  | 3,17E+03  | 3,07E+03  | 26,1               | 27,1      | 26,9      |
| 15            | 0,5           | 2,64E+03  | 2,53E+03  | 2,48E+03  | 28,7               | 26,7      | 29,6      |
| 15            | 0,2           | 2,11E+03  | 1,88E+03  | 1,90E+03  | 32,2               | 33,6      | 33,2      |
| 15            | 0,1           | 1,61E+03  | 1,60E+03  | 1,49E+03  | 34,3               | 34,1      | 35,6      |
| 25            | 20            | 2,67E+03  | 2,57E+03  | 2,57E+03  | 30,5               | 31,1      | 32,6      |
| 25            | 10            | 2,21E+03  | 2,12E+03  | 2,14E+03  | 31,8               | 32,3      | 33,5      |
| 25            | 5             | 1,81E+03  | 1,77E+03  | 1,81E+03  | 34,3               | 34,8      | 35,7      |
| 25            | 2             | 1,36E+03  | 1,34E+03  | 1,24E+03  | 37,5               | 37,9      | 38,5      |
| 25            | 1             | 9,51E+02  | 1,16E+03  | 1,18E+03  | 39,4               | 40        | 40,1      |
| 25            | 0,5           | 7,71E+02  | 8,23E+02  | 8,23E+02  | 40,8               | 41,2      | 41,7      |
| 25            | 0,2           | 6,51E+02  | 8,13E+02  | 8,13E+02  | 42,1               | 42,6      | 43,1      |
| 25            | 0,1           | 6,17E+02  | 5,83E+02  | 5,83E+02  | 41,6               | 42,1      | 44        |
| 35            | 20            | 9,23E+02  | 9,05E+02  | 8,82E+02  | 49,7               | 50,2      | 53,4      |
| 35            | 10            | 7,37E+02  | 7,18E+02  | 7,55E+02  | 44,9               | 45        | 46,4      |
| 35            | 5             | 7,15E+02  | 6,38E+02  | 6,43E+02  | 44,5               | 44,3      | 45,3      |
| 35            | 2             | 5,72E+02  | 3,75E+02  | 4,32E+02  | 43,4               | 43,4      | 43,3      |
| 35            | 1             | 4,66E+02  | 4,99E+02  | 2,93E+02  | 41,4               | 41,3      | 42,2      |
| 35            | 0,5           | 5,43E+02  | 4,03E+02  | 4,15E+02  | 40                 | 38,3      | 40        |
| 35            | 0,2           | 7,37E+02  | 6,08E+02  | 6,62E+02  | 38,5               | 38,7      | 38,6      |
| 35            | 0,1           | 4,37E+02  | 4,99E+02  | 4,37E+02  | 32,6               | 24,6      | 27,1      |

A Figura 4.17 apresenta a curva mestra dos valores médios para a mistura MAB-P, bem como a relação entre o fator de translação com a temperatura. A Figura 4.18 mostra a variação do ângulo de fase com a frequência reduzida.



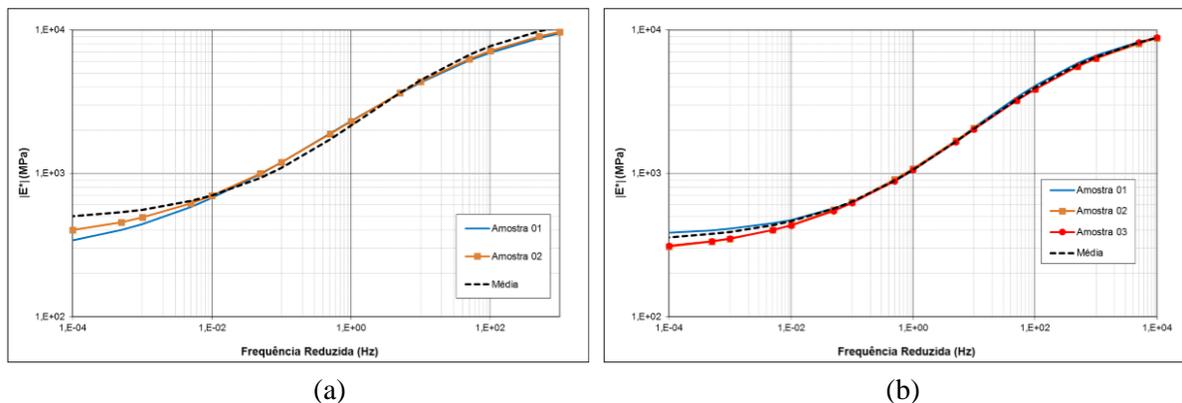
**Figura 4.17-** Curva mestra na temperatura de referência de 25°C para a mistura MAB-P e relação entre o fator de translação e a temperatura.



**Figura 4.18-** Variação do ângulo de fase com a frequência reduzida para a mistura MAB-P.

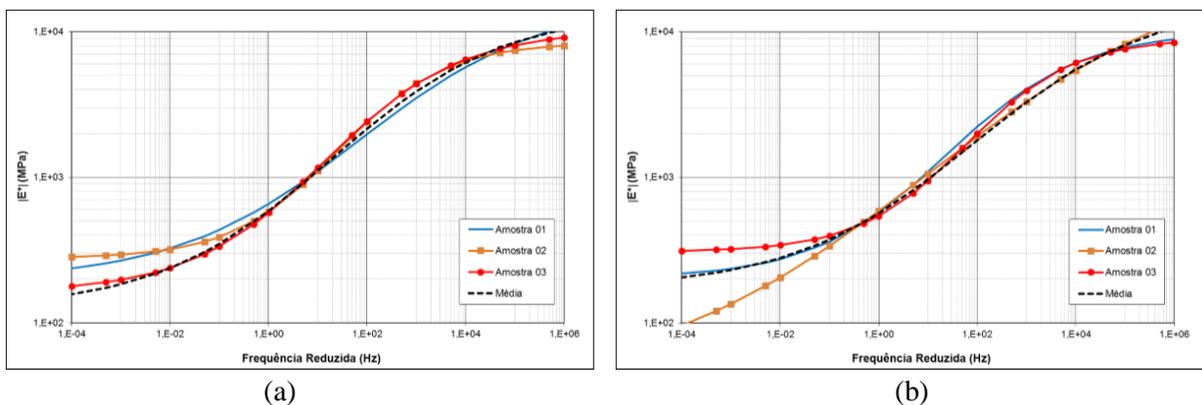
Pode-se observar na Figura 4.18 que o ensaio realizado na temperatura de 35°C em frequências mais baixas a mistura apresenta menores valores de ângulo de fase. Isto acontece devido ao fato de que o ligante asfáltico, sob estas condições, passa a se comportar como um fluido viscoso, fazendo com que a estrutura granulométrica que forma os agregados suporte mais isoladamente os esforços aplicados, refletindo no comportamento elástico da mistura.

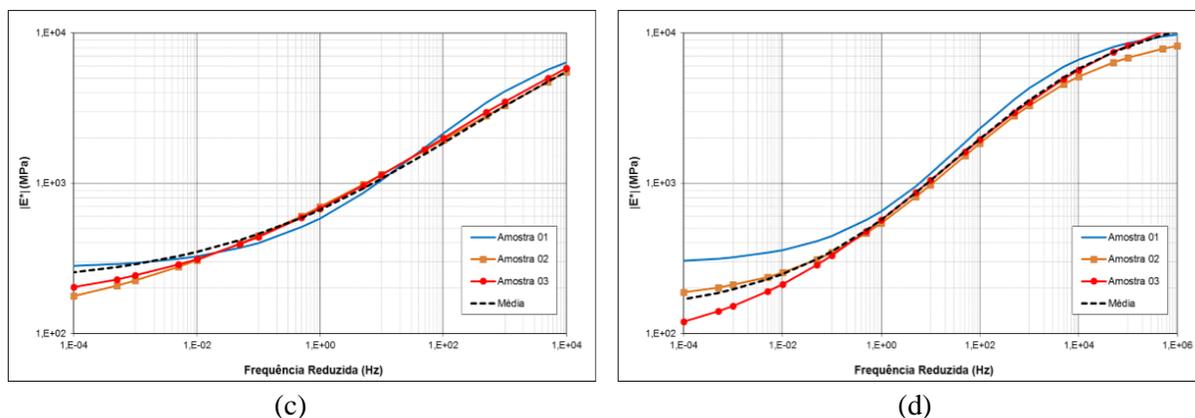
O procedimento para a obtenção das curvas mestras do módulo dinâmico para as misturas MAB-R25, MAB-R30-1, MAB-R30-2 e MAB-R30-3 seguiu a mesma metodologia das curvas mestras apresentadas até aqui. Para estas misturas também foram ensaiadas três amostras em diferentes valores de frequências e temperaturas. A Figura 4.19 mostra o comportamento da média e de cada uma das amostras ensaiadas para as misturas MAB-RJ-122 e MAB-P. Pode-se observar que os valores encontrados apresentam pouca variabilidade, sendo o coeficiente de variação para o módulo dinâmico da mistura MAB-RJ-122 em torno de 5% e para a mistura MAB-P com valores próximo a 9%.



**Figura 4.19-** (a) Comparação das curvas mestras para as duas amostras e média para misturas MAB-RJ-122 e (b) Comparação das curvas mestras para as três amostras e média para mistura MAB-P.

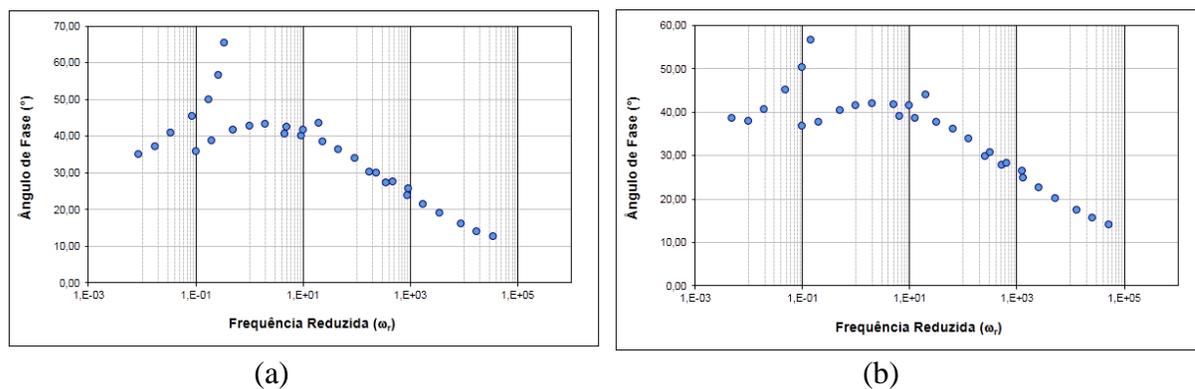
Na Figura 4.20 a seguir é apresentado a variabilidade da curva mestra para o módulo dinâmico das três amostras ensaiadas das misturas produzidas modificadas por RAR.

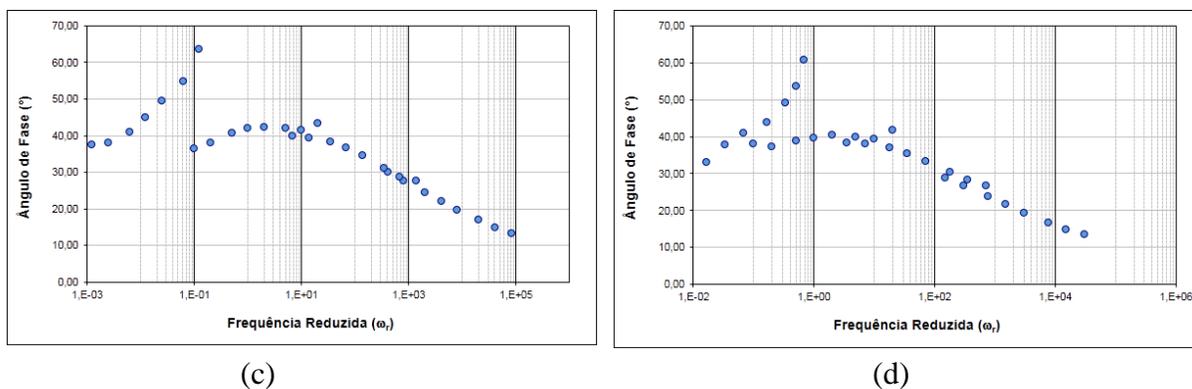




**Figura 4.20-** Comparação das curvas mestras para as três amostras e média das misturas (a) MAB-R25; (b) MAB-R30-1; (c) MAB-R30-2 e (d) MAB-R30-3.

É importante observar o comportamento do ângulo de fase da mistura MAB-P na temperatura de 35°C como mostra a Figura 4.18 e a Tabela 4.16. O aumento da frequência faz com que haja aumento dos valores do ângulo de fase. Para os ligantes modificados com RAR, observa-se a mesma tendência dos ângulos de fase à mesma temperatura, mas com valores ainda mais altos. De certa forma, na temperatura de 35°C as misturas modificadas apresentaram valores muito baixos de rigidez, o que prejudicou os resultados dos valores do ângulo de fase. A Figura 4.21 mostra a variação dos ângulo de fase para as mistura MAB-R25, MAB-R30-1, MAB-R30-2 e MAB-R30-3.





**Figura 4.21-** Variação do ângulo de fase com a frequência reduzida (a) mistura MAB-R25; (b) mistura MAB-R30-1; (c) mistura MABR30-2 e (d) mistura MAB-R30-3.

As curvas mestras do módulo dinâmico para as misturas modificadas por RAR apresentaram uma variabilidade maior em relação às misturas MAB-RJ-122 e MAB-P, principalmente nos valores de módulo dinâmico em temperaturas mais elevadas, ou nas frequências mais baixas. Durante a realização dos ensaios de módulo dinâmico nas misturas modificadas por RAR à temperatura de 35°C, foi necessário a alteração da faixa de frequência utilizada, uma vez que as misturas apresentaram valores muito baixos de rigidez. Para essas misturas foram retirados os valores de frequência de 0,1 e 0,2 Hz e incluídos os valores de 15 e 25 Hz.

Comparando-se as curvas mestras apresentadas na Figura 4.19 e na Figura 4.20 é possível notar a diferença nos valores de módulo que são encontrados na parte inferior da curva, em temperaturas mais elevadas. Pode-se afirmar que em comparação com as misturas MAB-RJ-122 e MAB-P, as misturas MAB-R25, MAB-R30-1, MAB-R30-2 e MAB-R30-3 apresentam significativas reduções nos valores de módulo. Os ensaios de módulo dinâmico realizados a altas temperaturas mostram uma maior influência do esqueleto mineral, já que o ligante passa a estar em um estado menos viscoso, reduzindo sua parcela na capacidade estrutural da mistura. Em contrapartida para valores de temperaturas mais baixos, os valores encontrados para os módulos de todas as misturas tendem a um mesmo valor máximo assintótico. Tal fato também é observado nas misturas asfálticas estudadas por Mello (2008).

Na Tabela 4.17 são apresentados os valores das variáveis do modelo sigmoidal  $\delta_{MS}$ ,  $\beta$ ,  $\gamma_{MS}$  e  $\vartheta$ , que definem a curva mestra e os coeficientes da relação do fator de translação com a temperatura para todas as misturas. Segundo Sotil (2005) *apud* Mello (2008), os coeficientes  $\delta_{MS}$  e  $\vartheta$

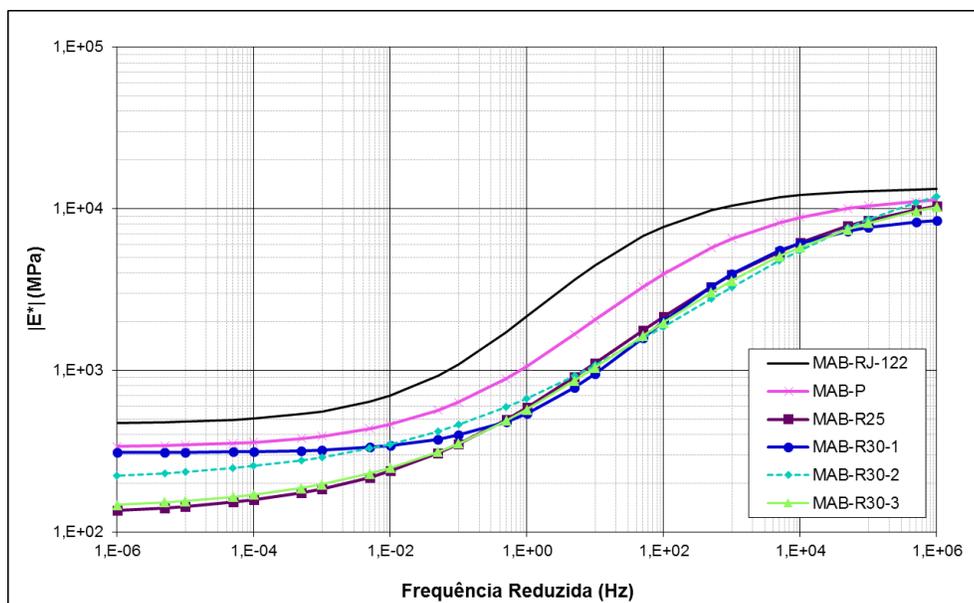
dependem da granulometria, da quantidade de ligante e de vazios na amostra. Já os coeficientes  $\beta$  e  $\gamma_{MS}$  estão relacionados com as características do ligante e com a magnitude de  $\delta_{MS}$  e  $\vartheta$ .

**Tabela 4.17-** Variáveis do modelo sigmoidal e coeficientes do fator de translação.

| Misutra    | $\delta_{MS}$ | $\vartheta$ | $\beta$ | $\gamma_{MS}$ | <b>a</b>  | <b>b</b>  | <b>c</b> |
|------------|---------------|-------------|---------|---------------|-----------|-----------|----------|
| MAB-RJ-122 | 2,670         | 1,458       | 0,1827  | 0,904         | 1,07E-03  | -1,65E-01 | 3,47     |
| MAB-P      | 2,521         | 1,564       | 0,7456  | 0,769         | 1,33E-04  | -1,68E-01 | 4,11     |
| MAB-R25    | 2,099         | 2,048       | 0,7197  | 0,568         | -4,51E-04 | -1,49E-01 | 4,00     |
| MAB-R30-1  | 2,239         | 1,977       | 1,0440  | 0,549         | -1,01E-03 | -1,41E-01 | 4,14     |
| MAB-R30-2  | 2,312         | 2,061       | 1,1057  | 0,481         | -3,39E-04 | -1,70E-01 | 4,47     |
| MAB-R30-3  | 2,136         | 2,027       | 0,8144  | 0,553         | 4,01E-04  | -1,71E-01 | 4,03     |

Avaliando o significado das variáveis apresentadas na Tabela 4.17 segundo a observação de Sotil (2005) *apud* Mello (2008), é possível fazer algumas considerações para as misturas em estudo. Uma vez que as misturas foram fabricadas a partir de uma granulometria fixa e considerando o mesmo teor de ligante, as diferenças observadas nas variáveis  $\delta_{MS}$  e  $\vartheta$  devem estar relacionadas com a variabilidade do volume de vazios vazios apresentado para cada mistura. Segundo o que foi apresentado na seção 4.6 em relação aos parâmetros volumétricos das misturas, os vazios da mistura MAB-P encontram-se acima da média e para a mistura MAB-R30-2 abaixo. Os valores ajustados de  $\delta_{MS}$  e  $\vartheta$  para a mistura MAB-P encontram-se fora da tendência de valores quando comparados às variáveis  $\delta_{MS}$  e  $\vartheta$  das outras misturas produzidas no INFRALAB. Em relação à característica do ligante, observa-se a proximidade dos valores das variáveis  $\beta$  e  $\gamma_{MS}$  nas misturas modificadas por RAR.

A fim de verificar o comportamento das curvas mestras de módulo dinâmico das misturas em estudo, na Figura 4.22 são apresentadas as curvas mestras considerando-se a média encontrada para as amostras ensaiadas.



**Figura 4.22-** Curvas mestras do módulo dinâmico para todas as misturas em estudo.

A análise do resultado das curvas mestras associada ao volume de vazios das misturas, apresentados na seção 4.6 pode ser considerado atípico, pois espera-se uma menor rigidez de misturas com maior volume de vazios. Das misturas produzidas no INFRALAB, a mistura MAB-P apresentou os volumes de vazios mais elevados, e no entanto, apresentou a maior rigidez entre as misturas asfalto-borracha. Para as misturas asfalto-borracha produzidas com a RAR, observa-se a tendência de mesmos valores de rigidez com o aumento da taxa de carregamento ou diminuição da temperatura. As misturas MAB-R30-1 e MAB-R30-2 apresentam comportamento muito semelhante, o que é esperado, uma vez que foram produzidas de forma idêntica visando este comportamento. O mesmo não se pode afirmar em relação à mistura MAB-R30-3 que em taxas de carregamento reduzido ou altas temperaturas, apresenta um comportamento semelhante à mistura MAB-R25.

Uma das principais propriedades dos materiais viscoelásticos que se pode obter da curva mestra é a inclinação da parte linear central da curva. De acordo com algumas pesquisas, esse valor pode ser relacionado com propriedades mecânicas das misturas asfálticas, tais como os modelos de fadiga que utilizam a teoria do dano em meio contínuo (Kim *et al.* 2006). Não serão realizadas análises do parâmetro de dano nas misturas asfálticas desta pesquisa. Porém, para análise do comportamento do módulo dinâmico das misturas, foi calculada a inclinação da parte

central das curvas mestras, de forma a aferir a redução da suscetibilidade à temperatura e taxa de carregamento, já observada nos ligantes modificados.

A Tabela 4.18 apresenta os valores  $m$  de inclinação da parte linear central das curvas mestras.

**Tabela 4.18-** Valores da inclinação da parte linear central da curva mestra do módulo dinâmico das misturas asfalto-borracha.

| Misutra    | $m$   |
|------------|-------|
| MAB-RJ-122 | 0,269 |
| MAB-P      | 0,295 |
| MAB-R25    | 0,291 |
| MAB-R30-1  | 0,236 |
| MAB-R30-2  | 0,222 |
| MAB-R30-3  | 0,212 |

Os dados apresentados na Tabela 4.18 juntamente com a Tabela 4.6, analisados em conjunto aos valores de rigidez dos ligantes apresentados na Figura 4.7 e das misturas asfálticas mostrados na Figura 4.22 endossam os resultados apresentados. Desta forma, pode-se afirmar que os modificantes *Pellet* e RAR melhoram o comportamento do ligante e da mistura asfáltica em relação à suscetibilidade dos valores de rigidez à taxa de carregamento e a temperatura. Mais especificamente, esta característica é observada mais significativamente nas composições que utilizaram 30 % do modificante RAR em relação a massa de ligante.

#### 4.8 Comportamento à fadiga das misturas asfálticas

Os resultados de vida de fadiga foram analisados conforme os conceitos tradicionais apresentados no Capítulo 2. Neste sentido, os ensaios foram realizados a fim de obter a curva de Whöler em uma determinada temperatura.

Da mesma forma como colocado para o comportamento à fadiga dos ligantes asfálticos, há diversos critérios que podem ser estabelecidos para definir o ponto onde a amostra de mistura asfáltica possa ser considerada rompida. Usualmente e definido por norma, o critério mais comum em ensaios de deformação controlada considera a ruptura como sendo o ponto onde a rigidez à flexão da amostra atinge 50% do valor inicial.

As misturas MAB-RJ-122, MAB-P, MAB-R25 e MAB-R30-1 foram ensaiadas à temperatura de 20°C. As misturas MAB-R30-2 e MAB-R30-3 foram ensaiadas a temperaturas de 5°C e

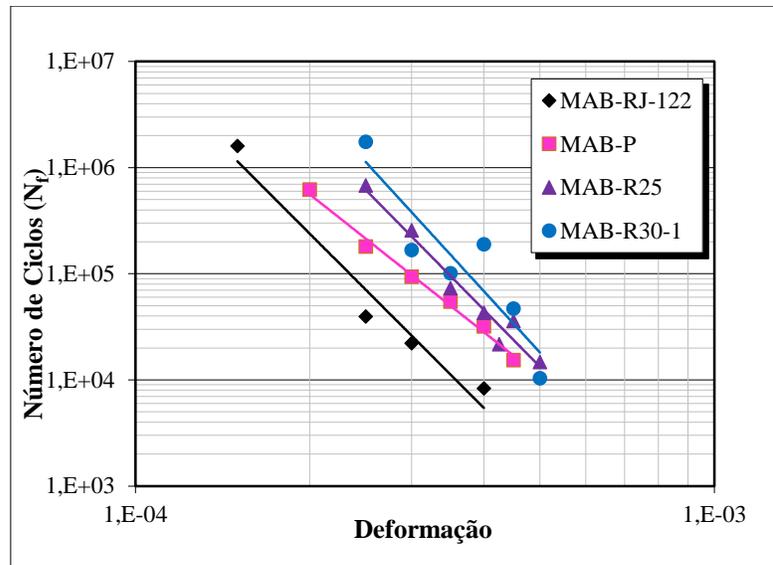
12,5°C, respectivamente. Os resultados foram analisados conforme a Equação 2.11 que leva em consideração a relação entre o número de solicitações e a deformação imposta.

Os resultados conforme a Equação 2.11 são apresentados na Tabela 4.19 e mostrados na Figura 4.23- para os ensaios nas diferentes misturas à mesma temperatura. É importante observar que o valor de microdeformações plotados nos gráficos com as curvas de Whöler correspondem à metade da amplitude de deformação aplicada durante o ensaio.

**Tabela 4.19-** Coeficientes obtidos nos ensaios à flexão sob deformação controlada considerando critério de ruptura de 50% da rigidez inicial.

| Mistura    | Temperatura | $k_1$     | $k_2$ | $R^2$ |
|------------|-------------|-----------|-------|-------|
| MAB-RJ-122 | 20°C        | 1,532E-15 | 5,46  | 0,96  |
| MAB-P      | 20°C        | 6,054E-11 | 4,32  | 0,99  |
| MAB-R25    | 20°C        | 6,931E-15 | 5,54  | 0,96  |
| MAB-R30-1  | 20°C        | 3,735E-16 | 5,96  | 0,83  |
| MAB-R30-2  | 5°C         | 1,302E-08 | 3,59  | 0,95  |
| MAB-R30-3  | 12,5°C      | 1,216E-08 | 3,75  | 0,96  |

Os ensaios realizados a 20°C, mostrados na Figura 4.23, apontam que de uma forma geral, os asfaltos-borracha de 4ª geração, *Pellet* e RAR, nas composições utilizadas nesta pesquisa apresentam maior vida de fadiga quando comparados a uma modificação por asfalto-borracha do tipo *field blend*. Além disso, pode-se afirmar que as misturas modificadas com RAR apresentam melhor desempenho à fadiga do que a mistura modificada por *Pellet*. As misturas MAB-R25 e MAB-R30-1 exibem valores muito próximos tanto de  $k_1$  e quanto de  $k_2$ , o que também é evidenciado pela proximidade das curvas de fadiga. Somado a este fato, o valor de  $R^2$  para a mistura MAB-R30-1, apesar de ser considerado um bom valor de ajuste, foi o pior entre as misturas. Isto leva a concluir que a utilização de 30 % e 25% de RAR em relação à massa de ligante, poderia apresentar resultados de desempenho semelhantes na mistura asfáltica.



**Figura 4.23-** Curvas de Whöler que representa os resultados dos ensaios de fadiga à flexão nas misturas ensaiadas a temperatura de 20°C e frequência de 10 Hz.

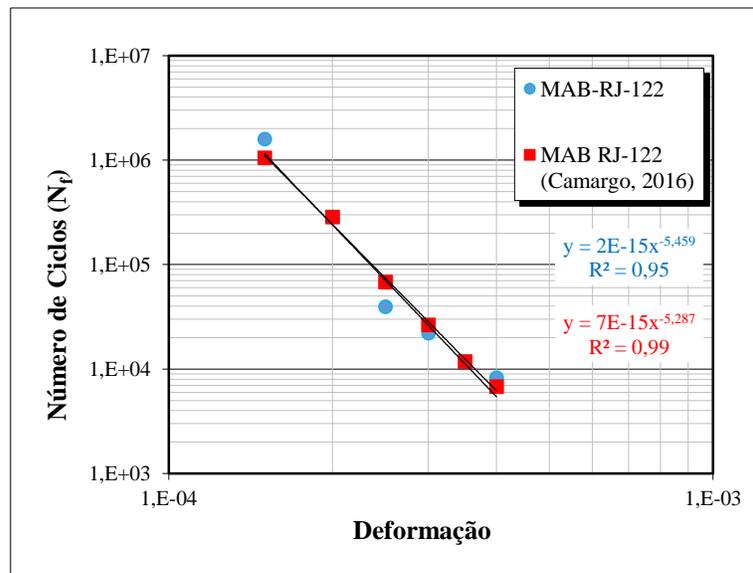
Em geral espera-se que as misturas com volume de vazios maiores, como é o caso das misturas descontínuas, apresentem um pior comportamento à fadiga. As misturas MAB-P, MAB-R25 e MAB-R30-1, foram produzidas a partir da mesma faixa granulométrica e teor de ligante, sendo a variação do volume de vazios um processo inerente da fabricação. Neste caso, a mistura MAB-P apresentou maiores volumes de vazios, o que pode ter afetado o seu desempenho neste comparativo.

A partir da análise dos resultados de desempenho à fadiga para todas as misturas ensaiadas a 20°C em conjunto com suas respectivas curvas mestras, nota-se a influência do módulo dinâmico da mistura no seu comportamento à fadiga. Isto reafirma uma conclusão já relatada em relação aos ligantes, de que quanto maior rigidez, menor a vida de fadiga. Ou seja, misturas menos rígidas sob o mesmo nível de deformação que outras com rigidez maior, possuem vida de fadiga mais elevada. Assim também pode-se afirmar que por apresentar menor suscetibilidade ao nível de deformação imposto, a mistura MAB-R30-1 apresenta melhor desempenho à fadiga entre as misturas estudadas.

Assim como o comportamento à fadiga das misturas corresponderam às expectativas quando analisadas em conjunto com as respectivas curvas mestras do módulo dinâmico, estas também corroboram os resultados de vida de fadiga encontrados no ensaio LAS para os ligantes

modificados. Os resultados podem confirmar mais uma vez que assim como o ligante AB-R30, a mistura MAB-R30-1 apresentam melhor desempenho à fadiga que as demais.

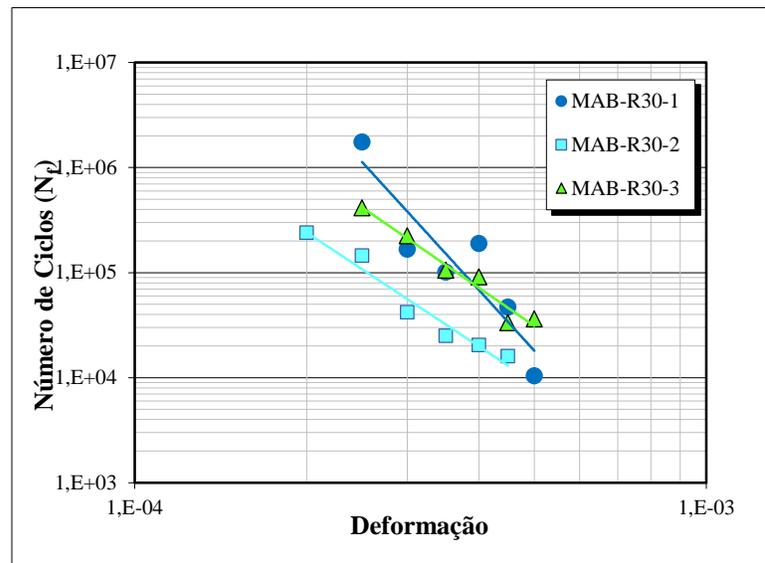
A título de curiosidade, foram comparados os resultados do ensaio de fadiga à flexão da mistura MAB-RJ-122 realizado no INFRALAB com os resultados obtidos por Camargo (2016). Os ensaios de fadiga da mistura MAB-RJ-122 foram realizados sob pulso de carga senoidal na presente pesquisa, enquanto Camargo (2016) submeteu a mesma ao pulso de carga *haversine*. Em relação ao tipo de carregamento imposto, Mello (2008) ressalta que em um ensaio com a forma de onda *haversine* devido às solicitações repetitivas para uma mesma direção, em poucos ciclos as vigotas apresentam uma nova conformação levemente curvada no sentido das solicitações. Como o equipamento é programado para retornar a vigota para a posição original, ou seja, a posição horizontal existente no início do ensaio, o mesmo tende a forçar a vigota curvada para a posição horizontal. Dessa forma, apesar de os sinais de deslocamentos apresentarem um formato *haversine*, os sinais de força passam a apresentar um formato verdadeiramente senoidal. A Figura 4.24 apresenta os resultados dos ensaios sob o critério de ruptura como sendo o ponto onde a redução da rigidez atinge 50% do valor inicial.



**Figura 4.24-** Comparação entre ensaios de fadiga para dois tipos de carregamento.

A Figura 4.25 apresenta os resultados para o ensaio nas misturas modificadas com 30% de RAR em relação à massa de ligante, nas temperaturas de 5; 12,5 e 20°C. Os resultados do ensaio

de fadiga para as misturas MAB-R30-1, MAB-R30-2 e MAB-R30-3 foram analisados conforme a Equação 2.12, considerando a influência da rigidez do material.



**Figura 4.25-** Curvas de Whöler que representa os resultados dos ensaios de fadiga à flexão nas misturas modificadas com 30% de RAR ensaiadas a temperatura de 5; 12,5 e 20°C à frequência de 10 Hz.

Os coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$ , e  $k_3$  foram calculados segundo a função *Solver* do Excel. O procedimento consistiu em aplicar os valores de deformação imposta e rigidez inicial para cada viga, segundo a Equação 2.12. A função *solver* minimiza a soma do erro entre  $N_f$  previsto e  $N_f$  ensaiado. A Tabela 4.20 apresenta os valores de  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  e  $R^2$  para o ajuste de três temperaturas (MAB-R30-1, MAB-R30-2 e MAB-R30-3) e duas temperaturas (MAB-R30-2 e MAB-R30-3).

**Tabela 4.20-** Valores dos coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  para a mistura com 30% de RAR.

| T (°C)       | $k_1$    | $k_2$ | $k_3$ | $R^2$ |
|--------------|----------|-------|-------|-------|
| 5; 12,5 e 20 | 5,37E+00 | 4,33  | 1,65  | 0,52  |
| 5 e 12,5     | 8,12E+02 | 4,39  | 1,99  | 0,72  |

A mistura MAB-R30-3 apresentou valores de rigidez diferentes das misturas MAB-R30-1 e MAB-R30-2 na faixa de temperaturas mais elevadas ou frequências mais baixas. Entretanto, os ensaios de fadiga ocorreram sob baixas temperaturas, em que os valores encontrados para os módulos das três misturas em questão tendem a um mesmo valor máximo assintótico (Figura 4.22). Esta observação justifica a utilização da mistura MAB-R30-3 para o cálculo dos coeficientes da Equação 2.12. Como pode ser observado na Figura 4.25, a curva da vida de fadiga para a mistura MAB-R30-1 ensaiada a 20°C apresenta valores mais dispersos que as demais, e

consequentemente o pior ajuste ( $R^2=0,83$ ), o que piora a correlação do modelo entre as três misturas apresentando  $R^2=0,52$ . O cálculo de  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  realizado para as misturas MAB-R30-2 e MAB-R30-3 (5 e 12,5°C respectivamente) apresentou a melhor correlação com  $R^2=0,72$ .

Os resultados de desempenho à fadiga em vigas sob flexão em quatro pontos das misturas produzidas com os asfaltos-borracha de 4ª geração *Pellet* e RAR condizem com os resultados de misturas asfálticas modificadas com BMP encontrados na bibliografia (Kaloush *et al.* 2002; Dantas Neto, 2004; Mello, 2008 e Camargo, 2016) e corresponderam à expectativa deste trabalho. Assim como as misturas asfalto-borracha produzidas por via úmida, a modificação por estes novos materiais resultou em misturas com desempenho superior ao de misturas modificadas por polímeros. A modificação com 30% de RAR realizada neste trabalho supera o desempenho à fadiga de uma mistura de granulometria descontínua, modificada com 33% de RAR, ensaiada sob as mesmas condições no estudo de Sousa *et al.* (2012).

## 5 CONCLUSÕES

A fadiga é um dos principais defeitos encontrados nos pavimentos asfálticos. Ao longo dos anos, projetos de pesquisas destinaram-se a aperfeiçoar as técnicas e metodologias de ensaios de laboratório, estabelecendo critérios de análises menos empíricos e mais mecanísticos de avaliação dos materiais empregados na pavimentação. Parte deste progresso das técnicas de ensaios foi estimulado pelo surgimento de novos materiais que incorporados ao concreto asfáltico aumentaram significativamente seu desempenho.

Diversos tipos de modificantes são estudados atualmente e entre eles se destacam os polímeros e a borracha granulada de pneu. Apesar do alto nível de desempenho comprovado, a produção dos asfaltos-borracha por via úmida vai de encontro aos desafios apresentados pela técnica. Frente a estes desafios, novos materiais como os grânulos de borracha pré-ativados (RAR- *Reacted and Activated Rubber*) e borracha peletizada (*Pellet*) surgiram 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).

Com o objetivo de avaliar a influência destes materiais no desempenho à fadiga de um concreto asfáltico e comprovar a facilidade de aplicação, foram estabelecidas composições entre um ligante convencional (CAP 50/70) e estes materiais a serem aplicados em uma mistura de granulometria descontínua. Foram realizadas caracterizações reológicas e ensaios de desempenho à fadiga, em todos os ligantes e misturas asfálticas produzidas. Os ensaios nos ligantes foram conduzidos no reômetro de cisalhamento dinâmico e nas misturas asfálticas no equipamento de viga à flexão em quatro pontos.

As amostras de mistura asfáltica foram obtidas por meio da compactação de placas de mistura asfáltica em um molde de dimensões 700 x 600 x 70 mm e cortadas após o resfriamento. Foram produzidas cinco placas com as misturas MAB-P, MAB-R25, MAB-R30-1, MAB-R30-2 e MAB-R30-3. O processo de compactação mostrou-se pouco eficiente, resultando em amostras com diferentes volumes de vazios, principalmente entre as misturas MAB-P e MAB-R30-2. A variabilidade nos parâmetros volumétricos apontou a necessidade da dosagem para cada composição em específico e melhorias no processo de compactação.

Os ensaios de caracterização reológica tiveram embasamento na Teoria da Viscoelasticidade e no princípio de superposição tempo-temperatura o que possibilitou criar as chamadas curvas mestras para os ligantes e para as misturas asfálticas. As análises do comportamento à fadiga, foram baseadas no conceito VECD para os ligantes, enquanto as misturas produzidas foram avaliadas com base nas tradicionais curvas de Whöler.

A análise da curva mestra do ligante AB-R30 mostrou que a modificação resulta em um ligante menos suscetível às condições de frequência e temperatura que os demais, apesar de sua elevada viscosidade. A característica de baixa rigidez e menor suscetibilidade às condições impostas resultou em elevada vida de fadiga para o ligante AB-R30 e menor sensibilidade ao parâmetro de dano.

A mistura MAB-P, produzida com o ligante AB-P menos viscoso que os demais e com maiores volumes de vazios, apresentou valores de módulo dinâmico maiores que as misturas compostas por RAR. A característica de menor rigidez e menor suscetibilidade às condições de carregamento e temperatura das composições com RAR fizeram com que estas misturas apresentassem maior vida de fadiga em relação à mistura MAB-P.

A partir da doação de uma placa de mistura asfalto-borracha produzida por via úmida local pelo DER/RJ (MAB-RJ-122) foi possível obter um comparativo de desempenho entre esta e as misturas com os materiais *Pellet* e RAR. Os resultados da caracterização reológica mostraram que as misturas com *Pellet* e RAR são menos rígidas e com menor suscetibilidade às condições de carregamento e temperatura que a mistura MAB-RJ-122. Consequentemente, as misturas compostas por *Pellet* e RAR apresentaram maior vida de fadiga que esta última.

Os resultados desta pesquisa permitem concluir que os asfaltos-borracha de 4ª geração aumentam a vida de fadiga de misturas asfálticas de granulometria descontínua, sendo este desempenho superior a uma mistura asfalto-borracha também descontínua produzida por via úmida (asfalto-borracha de 1ª geração). Embora sejam resultados promissores é necessário cautela, pois não se sabe a influência destes no comportamento à deformação permanente. Além disso, os ensaios de fadiga conduzidos nas misturas asfálticas assumiram um critério arbitrário para a classificação da condição de ruptura da amostra. Neste sentido é necessário que mais estudos e um maior número de ensaios sejam realizados a fim de obter a classificação destas misturas baseada em conceitos da mecânica dos pavimentos.

## 5.1 Pesquisas futuras

Para dar continuidade às pesquisas, podem ser apontados alguns aspectos a serem esclarecidos. São eles:

- Realizar ensaios de fadiga nos ligantes com varredura no tempo (*time sweep*) e ensaios de deformação permanente (*multiple stress creep and recovery*);
- Dosar as composições de RAR e *Pellet* a partir de parâmetros volumétricos fixados;
- Reformular a metodologia para obtenção de vigas prismáticas (compactação e corte) para os ensaios conduzidos no equipamento de fadiga à flexão quatro pontos;
- Realizar análises de dano nas misturas asfálticas baseadas em modelos voltados para os conceitos da mecânica dos pavimentos;
- Realizar ensaios de deformação permanente nas misturas asfálticas modificadas com *Pellet* e RAR;
- Realizar ajuste e simulações dos dados obtidos no modelo empírico-mecanístico com as misturas modificadas por RAR e *Pellet* como camada de rolamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation (2013) *T-166 - Bulk specific gravity of compacted asphalt mixtures using saturated surface-dry specimens.*
- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation (2007) *T-321 - Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated flexural Bending.*
- AASHTO- American Association of State Highway and Transportation (2014) *TP-101 - Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep.*
- 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 Insitute (2007). *The Asphalt Handbook. MS-4 Seventh Edition. USA. 788p.*
- Asphalt Magazine (2014). *The Magazine of the Asphalt Institute. V.29, n°3, p13-17.*
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2007) *C 127 – Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2009) *C 128 – Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregates.*
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2013) *C 1252 – Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture and Grading).*
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2011) *D 2041 – Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.*
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2009) *D 2419 – Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate.*
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2012) *D 2872 - Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (RollingThin-Film Oven Test).*
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2015) *D 4402 – Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer.*
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2010) *D 4791 – Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate.*

ASTM - American Society for Testing and Materials (2009) *D 6114 – Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder*. American Society for Testing Materials.

ASTM - American Society for Testing and Materials (2010) *D 7460 – Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending*.

Bahia H. 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 National 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.

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.

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.

Ceratti, J. A. P., Reis R. M. M. (2011). *Manual de dosagem de concreto asfáltico*. Rio de Janeiro: Instituto Pavimentar. 152p.

CNT (2016). *Pesquisa Rodoviária 2016 – Relatório Gerencial*. Confederação Nacional de Transportes, Brasília, DF. CNT: SEST: SENAT, 2016.394p.

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.

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.
- 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 (2009) 112-ES - Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending”.
- EN – European Standard (2004) 12697-24 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue.*
- EN – European Standard (2004) 12697-26 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness.*
- 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.
- Hintz, C. (2012). Understanding Mechanisms Leading to Asphalt Binder Fatigue. Ph.D Thesis. University of Wisconsin – Madison, Madison.
- 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.
- 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.
- 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.
- Martinez, 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.
- 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.
- 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.
- Nuñez, 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.
- 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.
- 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.
- Pronk, A. C. & Hopman, P. C. (1990). Energy Dissipation: The Leading Factor of Fatigue, Proceedings of United State Strategic Highway Research Program – Sharing the Benefits, London.
- Obando, J. R. A. (2016). Desempenho de Misturas Asfálticas Reforçadas com Geossintéticos. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 168 p.
- Quiñones, F.S. (2014). Aplicabilidade de Resíduos Reciclados da Construção e Demolição como Agregados em Misturas Asfálticas. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 168 p.

- Shatnawi, S. (2011). Comparisons of Rubberized Asphalt Binders Asphalt Rubber and Terminal Blend. Shatec Engeneering Consultants, LLC. Eldorado Hills, California, 2011.
- Sides, A., Uzan, J. & Perl, M. (1985). A comprehensive visco-elastoplastic characterization of sand-asphalt under compression and tesion cyclic loading. *Journal of Testing and Evaluation*. (13): 49-59.
- Sousa, J. B., Way, G. B. & Zareh, A. (2006). Asphalt-Rubber Gap Graded Mix Desing Concepts. *Asphalt Rubber 2006 – Proceedings, California, USA: 523-543.*
- Sousa, J. B., Vorobiev, A., Ishai, I., Svechinsky, 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 Egenharia) – 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 visco-elastic properties of asphalt rubber binder. *Asphalt Rubber 2003 – Proceedings, Brasilia, Brazil, 2003, p. 589-602.*
- Van Dijk, W. & Visser, W. (1977). The Energy Aproach 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 Aspahl 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.

Yussof, N. (2012). Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Bituminous Binders. PhD Thesis, University of Nottingham, UK.

## APÊNDICE

### A. TABELAS DE RESULTADOS PARA O MÓDULO DINÂMICO E ÂNGULO DE FASE DOS LIGANTES VIRGENS

As tabelas a seguir apresentaram os resultados para a média de três amostras ensaiadas às temperaturas de 52, 64, 76 e 88°C para os ligantes virgens nas frequências de 1 a 100 rad/s.

**Tabela A 1-** Módulo dinâmico e ângulo de fase para o ligante CAP 50/70 condição virgem.

| Frequência de ensaio $\omega$ (rad/s) | Temperatura de ensaio (°C) |          |          |          | Temperatura de ensaio (°C) |      |      |      |
|---------------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------------------------|------|------|------|
|                                       | 52                         | 64       | 76       | 88       | 52                         | 64   | 76   | 88   |
|                                       | CAP 50/70                  |          |          |          |                            |      |      |      |
|                                       | G*  (Pa)                   |          |          |          | Ângulo de fase (°)         |      |      |      |
| 1                                     | 6,99E+02                   | 1,27E+02 | 2,98E+01 | 9,00E+00 | 88,0                       | 88,4 | 87,3 | 81,8 |
| 2                                     | 1,38E+03                   | 2,51E+02 | 5,87E+01 | 1,73E+01 | 87,5                       | 88,3 | 87,6 | 84,5 |
| 3                                     | 2,04E+03                   | 3,74E+02 | 8,74E+01 | 2,58E+01 | 87,1                       | 88,3 | 88,0 | 86,2 |
| 4                                     | 2,69E+03                   | 4,97E+02 | 1,16E+02 | 3,39E+01 | 86,9                       | 88,3 | 88,1 | 86,9 |
| 5                                     | 3,34E+03                   | 6,18E+02 | 1,44E+02 | 4,19E+01 | 86,7                       | 88,2 | 88,4 | 86,9 |
| 6                                     | 3,98E+03                   | 7,38E+02 | 1,72E+02 | 5,00E+01 | 86,5                       | 88,1 | 88,5 | 87,7 |
| 7                                     | 4,62E+03                   | 8,59E+02 | 2,00E+02 | 5,81E+01 | 86,4                       | 88,0 | 88,3 | 87,4 |
| 8                                     | 5,25E+03                   | 9,78E+02 | 2,29E+02 | 6,64E+01 | 86,2                       | 87,9 | 88,4 | 87,5 |
| 9                                     | 5,88E+03                   | 1,10E+03 | 2,57E+02 | 7,45E+01 | 86,1                       | 87,9 | 88,5 | 87,9 |
| 10                                    | 6,50E+03                   | 1,22E+03 | 2,85E+02 | 8,25E+01 | 86,0                       | 87,8 | 88,4 | 87,7 |
| 11                                    | 7,12E+03                   | 1,33E+03 | 3,13E+02 | 9,11E+01 | 85,9                       | 87,8 | 88,4 | 88,0 |
| 12                                    | 7,74E+03                   | 1,45E+03 | 3,40E+02 | 9,91E+01 | 85,8                       | 87,7 | 88,5 | 88,0 |
| 13                                    | 8,36E+03                   | 1,57E+03 | 3,69E+02 | 1,07E+02 | 85,8                       | 87,6 | 88,5 | 88,1 |
| 14                                    | 8,97E+03                   | 1,69E+03 | 3,96E+02 | 1,15E+02 | 85,7                       | 87,6 | 88,5 | 88,1 |
| 15                                    | 9,58E+03                   | 1,80E+03 | 4,24E+02 | 1,23E+02 | 85,6                       | 87,6 | 88,4 | 88,2 |
| 16                                    | 1,02E+04                   | 1,92E+03 | 4,52E+02 | 1,32E+02 | 85,5                       | 87,5 | 88,4 | 88,3 |
| 17                                    | 1,08E+04                   | 2,04E+03 | 4,80E+02 | 1,39E+02 | 85,5                       | 87,5 | 88,5 | 88,3 |
| 18                                    | 1,14E+04                   | 2,15E+03 | 5,08E+02 | 1,48E+02 | 85,4                       | 87,4 | 88,4 | 88,4 |
| 19                                    | 1,20E+04                   | 2,27E+03 | 5,35E+02 | 1,56E+02 | 85,4                       | 87,4 | 88,3 | 88,6 |
| 20                                    | 1,26E+04                   | 2,38E+03 | 5,64E+02 | 1,64E+02 | 85,3                       | 87,4 | 88,3 | 88,4 |
| 21                                    | 1,32E+04                   | 2,50E+03 | 5,91E+02 | 1,72E+02 | 85,2                       | 87,3 | 88,5 | 88,5 |
| 22                                    | 1,38E+04                   | 2,61E+03 | 6,19E+02 | 1,80E+02 | 85,2                       | 87,3 | 88,4 | 88,4 |
| 23                                    | 1,44E+04                   | 2,73E+03 | 6,46E+02 | 1,88E+02 | 85,2                       | 87,3 | 88,4 | 88,6 |
| 24                                    | 1,50E+04                   | 2,84E+03 | 6,75E+02 | 1,97E+02 | 85,1                       | 87,2 | 88,4 | 88,5 |
| 25                                    | 1,56E+04                   | 2,96E+03 | 7,01E+02 | 2,05E+02 | 85,1                       | 87,2 | 88,4 | 88,5 |
| 26                                    | 1,61E+04                   | 3,07E+03 | 7,29E+02 | 2,11E+02 | 85,0                       | 87,2 | 88,4 | 88,6 |
| 27                                    | 1,67E+04                   | 3,19E+03 | 7,56E+02 | 2,19E+02 | 85,0                       | 87,2 | 88,4 | 88,8 |
| 28                                    | 1,73E+04                   | 3,30E+03 | 7,84E+02 | 2,27E+02 | 84,9                       | 87,1 | 88,4 | 88,8 |
| 29                                    | 1,79E+04                   | 3,42E+03 | 8,11E+02 | 2,35E+02 | 84,9                       | 87,1 | 88,4 | 88,8 |
| 30                                    | 1,85E+04                   | 3,53E+03 | 8,39E+02 | 2,43E+02 | 84,8                       | 87,1 | 88,4 | 88,8 |

|    |          |          |          |          |      |      |      |      |
|----|----------|----------|----------|----------|------|------|------|------|
| 31 | 1,91E+04 | 3,64E+03 | 8,66E+02 | 2,51E+02 | 84,8 | 87,1 | 88,4 | 88,8 |
| 32 | 1,97E+04 | 3,76E+03 | 8,94E+02 | 2,59E+02 | 84,8 | 87,1 | 88,4 | 88,9 |
| 33 | 2,02E+04 | 3,87E+03 | 9,21E+02 | 2,67E+02 | 84,7 | 87,0 | 88,4 | 88,7 |
| 34 | 2,08E+04 | 3,98E+03 | 9,49E+02 | 2,75E+02 | 84,7 | 87,0 | 88,4 | 88,9 |
| 35 | 2,14E+04 | 4,10E+03 | 9,76E+02 | 2,83E+02 | 84,7 | 87,0 | 88,3 | 88,9 |
| 36 | 2,20E+04 | 4,21E+03 | 1,00E+03 | 2,90E+02 | 84,6 | 87,0 | 88,4 | 88,9 |
| 37 | 2,26E+04 | 4,32E+03 | 1,03E+03 | 2,99E+02 | 84,6 | 87,0 | 88,3 | 88,9 |
| 38 | 2,31E+04 | 4,44E+03 | 1,06E+03 | 3,06E+02 | 84,6 | 86,9 | 88,4 | 88,9 |
| 39 | 2,37E+04 | 4,55E+03 | 1,08E+03 | 3,14E+02 | 84,5 | 86,9 | 88,3 | 88,9 |
| 40 | 2,43E+04 | 4,66E+03 | 1,11E+03 | 3,22E+02 | 84,5 | 86,9 | 88,4 | 88,9 |
| 41 | 2,48E+04 | 4,78E+03 | 1,14E+03 | 3,30E+02 | 84,5 | 86,9 | 88,4 | 89,0 |
| 42 | 2,54E+04 | 4,89E+03 | 1,17E+03 | 3,37E+02 | 84,4 | 86,9 | 88,4 | 89,0 |
| 43 | 2,60E+04 | 5,00E+03 | 1,19E+03 | 3,45E+02 | 84,4 | 86,9 | 88,4 | 89,0 |
| 44 | 2,66E+04 | 5,11E+03 | 1,22E+03 | 3,53E+02 | 84,4 | 86,9 | 88,4 | 89,0 |
| 45 | 2,71E+04 | 5,23E+03 | 1,25E+03 | 3,61E+02 | 84,4 | 86,8 | 88,4 | 89,0 |
| 46 | 2,77E+04 | 5,34E+03 | 1,27E+03 | 3,69E+02 | 84,3 | 86,8 | 88,4 | 88,9 |
| 47 | 2,83E+04 | 5,45E+03 | 1,30E+03 | 3,77E+02 | 84,3 | 86,8 | 88,3 | 89,0 |
| 48 | 2,88E+04 | 5,56E+03 | 1,33E+03 | 3,84E+02 | 84,3 | 86,8 | 88,3 | 89,0 |
| 49 | 2,94E+04 | 5,67E+03 | 1,35E+03 | 3,92E+02 | 84,3 | 86,8 | 88,3 | 89,1 |
| 50 | 2,99E+04 | 5,79E+03 | 1,38E+03 | 4,00E+02 | 84,2 | 86,8 | 88,3 | 89,1 |
| 51 | 3,05E+04 | 5,90E+03 | 1,41E+03 | 4,08E+02 | 84,2 | 86,8 | 88,3 | 89,1 |
| 52 | 3,11E+04 | 6,01E+03 | 1,43E+03 | 4,15E+02 | 84,2 | 86,7 | 88,3 | 89,0 |
| 53 | 3,16E+04 | 6,12E+03 | 1,46E+03 | 4,23E+02 | 84,2 | 86,7 | 88,3 | 89,0 |
| 54 | 3,22E+04 | 6,23E+03 | 1,49E+03 | 4,31E+02 | 84,1 | 86,7 | 88,3 | 89,1 |
| 55 | 3,27E+04 | 6,34E+03 | 1,51E+03 | 4,39E+02 | 84,1 | 86,7 | 88,3 | 89,1 |
| 56 | 3,33E+04 | 6,45E+03 | 1,54E+03 | 4,46E+02 | 84,1 | 86,7 | 88,3 | 89,2 |
| 57 | 3,38E+04 | 6,56E+03 | 1,57E+03 | 4,54E+02 | 84,1 | 86,7 | 88,3 | 89,2 |
| 58 | 3,44E+04 | 6,68E+03 | 1,59E+03 | 4,62E+02 | 84,0 | 86,7 | 88,3 | 89,2 |
| 59 | 3,50E+04 | 6,79E+03 | 1,62E+03 | 4,70E+02 | 84,0 | 86,7 | 88,3 | 89,2 |
| 60 | 3,55E+04 | 6,90E+03 | 1,65E+03 | 4,77E+02 | 84,0 | 86,7 | 88,3 | 89,2 |
| 61 | 3,61E+04 | 7,01E+03 | 1,67E+03 | 4,85E+02 | 84,0 | 86,6 | 88,3 | 89,2 |
| 62 | 3,66E+04 | 7,12E+03 | 1,70E+03 | 4,92E+02 | 84,0 | 86,6 | 88,3 | 89,2 |
| 63 | 3,71E+04 | 7,23E+03 | 1,73E+03 | 4,99E+02 | 83,9 | 86,6 | 88,3 | 89,1 |
| 64 | 3,77E+04 | 7,34E+03 | 1,75E+03 | 5,07E+02 | 83,9 | 86,6 | 88,3 | 89,2 |
| 65 | 3,82E+04 | 7,45E+03 | 1,78E+03 | 5,15E+02 | 83,9 | 86,6 | 88,3 | 89,2 |
| 66 | 3,88E+04 | 7,56E+03 | 1,81E+03 | 5,22E+02 | 83,9 | 86,6 | 88,3 | 89,2 |
| 67 | 3,93E+04 | 7,67E+03 | 1,83E+03 | 5,30E+02 | 83,9 | 86,6 | 88,3 | 89,3 |
| 68 | 3,99E+04 | 7,78E+03 | 1,86E+03 | 5,38E+02 | 83,8 | 86,6 | 88,3 | 89,2 |
| 69 | 4,04E+04 | 7,89E+03 | 1,89E+03 | 5,44E+02 | 83,8 | 86,6 | 88,3 | 89,2 |
| 70 | 4,10E+04 | 8,00E+03 | 1,91E+03 | 5,52E+02 | 83,8 | 86,6 | 88,3 | 89,3 |
| 71 | 4,15E+04 | 8,11E+03 | 1,94E+03 | 5,59E+02 | 83,8 | 86,6 | 88,3 | 89,3 |
| 72 | 4,21E+04 | 8,21E+03 | 1,97E+03 | 5,67E+02 | 83,8 | 86,6 | 88,3 | 89,4 |
| 73 | 4,26E+04 | 8,32E+03 | 1,99E+03 | 5,75E+02 | 83,7 | 86,5 | 88,3 | 89,4 |
| 74 | 4,32E+04 | 8,43E+03 | 2,02E+03 | 5,81E+02 | 83,7 | 86,5 | 88,2 | 89,3 |
| 75 | 4,37E+04 | 8,54E+03 | 2,04E+03 | 5,89E+02 | 83,7 | 86,5 | 88,3 | 89,4 |

|     |          |          |          |          |      |      |      |      |
|-----|----------|----------|----------|----------|------|------|------|------|
| 76  | 4,42E+04 | 8,64E+03 | 2,07E+03 | 5,96E+02 | 83,7 | 86,5 | 88,3 | 89,3 |
| 77  | 4,48E+04 | 8,75E+03 | 2,09E+03 | 6,04E+02 | 83,7 | 86,5 | 88,3 | 89,4 |
| 78  | 4,53E+04 | 8,86E+03 | 2,12E+03 | 6,10E+02 | 83,7 | 86,5 | 88,4 | 89,5 |
| 79  | 4,59E+04 | 8,97E+03 | 2,15E+03 | 6,18E+02 | 83,7 | 86,5 | 88,3 | 89,4 |
| 80  | 4,64E+04 | 9,08E+03 | 2,17E+03 | 6,26E+02 | 83,6 | 86,5 | 88,4 | 89,4 |
| 81  | 4,69E+04 | 9,18E+03 | 2,20E+03 | 6,33E+02 | 83,6 | 86,5 | 88,3 | 89,3 |
| 82  | 4,75E+04 | 9,29E+03 | 2,23E+03 | 6,40E+02 | 83,6 | 86,5 | 88,4 | 89,5 |
| 83  | 4,80E+04 | 9,40E+03 | 2,25E+03 | 6,48E+02 | 83,6 | 86,5 | 88,3 | 89,4 |
| 84  | 4,85E+04 | 9,50E+03 | 2,28E+03 | 6,54E+02 | 83,6 | 86,5 | 88,4 | 89,4 |
| 85  | 4,91E+04 | 9,61E+03 | 2,30E+03 | 6,62E+02 | 83,6 | 86,5 | 88,3 | 89,5 |
| 86  | 4,96E+04 | 9,72E+03 | 2,33E+03 | 6,69E+02 | 83,5 | 86,5 | 88,4 | 89,5 |
| 87  | 5,01E+04 | 9,83E+03 | 2,36E+03 | 6,76E+02 | 83,5 | 86,4 | 88,3 | 89,6 |
| 88  | 5,07E+04 | 9,94E+03 | 2,38E+03 | 6,83E+02 | 83,5 | 86,4 | 88,3 | 89,5 |
| 89  | 5,12E+04 | 1,00E+04 | 2,41E+03 | 6,90E+02 | 83,5 | 86,4 | 88,4 | 89,6 |
| 90  | 5,17E+04 | 1,02E+04 | 2,43E+03 | 6,97E+02 | 83,5 | 86,4 | 88,4 | 89,6 |
| 91  | 5,23E+04 | 1,03E+04 | 2,46E+03 | 7,04E+02 | 83,5 | 86,4 | 88,4 | 89,5 |
| 92  | 5,28E+04 | 1,04E+04 | 2,48E+03 | 7,12E+02 | 83,5 | 86,4 | 88,3 | 89,6 |
| 93  | 5,33E+04 | 1,05E+04 | 2,51E+03 | 7,20E+02 | 83,4 | 86,4 | 88,4 | 89,4 |
| 94  | 5,38E+04 | 1,06E+04 | 2,54E+03 | 7,26E+02 | 83,4 | 86,4 | 88,4 | 89,6 |
| 95  | 5,44E+04 | 1,07E+04 | 2,56E+03 | 7,33E+02 | 83,4 | 86,4 | 88,3 | 89,5 |
| 96  | 5,49E+04 | 1,08E+04 | 2,59E+03 | 7,40E+02 | 83,4 | 86,4 | 88,4 | 89,6 |
| 97  | 5,54E+04 | 1,09E+04 | 2,61E+03 | 7,47E+02 | 83,4 | 86,4 | 88,3 | 89,6 |
| 98  | 5,59E+04 | 1,10E+04 | 2,64E+03 | 7,55E+02 | 83,4 | 86,4 | 88,3 | 89,6 |
| 99  | 5,65E+04 | 1,11E+04 | 2,67E+03 | 7,60E+02 | 83,4 | 86,4 | 88,3 | 89,4 |
| 100 | 5,70E+04 | 1,12E+04 | 2,69E+03 | 7,68E+02 | 83,3 | 86,4 | 88,3 | 89,6 |

**Tabela A 2- Módulo dinâmico e ângulo de fase para o ligante AB-P condição virgem.**

| Frequência de ensaio $\omega$ (rad/s) | Temperatura de ensaio (°C) |          |          |          | Temperatura de ensaio (°C) |      |      |      |
|---------------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------------------------|------|------|------|
|                                       | 52                         | 64       | 76       | 88       | 52                         | 64   | 76   | 88   |
|                                       | AB-P                       |          |          |          |                            |      |      |      |
|                                       | G*  (Pa)                   |          |          |          | Ângulo de fase (°)         |      |      |      |
| 1                                     | 2,67E+03                   | 5,77E+02 | 1,90E+02 | 7,86E+01 | 71,8                       | 70,4 | 56,0 | 47,9 |
| 2                                     | 4,65E+03                   | 1,02E+03 | 3,04E+02 | 1,16E+02 | 71,1                       | 72,4 | 64,4 | 53,1 |
| 3                                     | 6,41E+03                   | 1,42E+03 | 4,07E+02 | 1,49E+02 | 70,5                       | 73,0 | 67,5 | 58,2 |
| 4                                     | 8,03E+03                   | 1,80E+03 | 5,12E+02 | 1,80E+02 | 70,1                       | 73,1 | 69,5 | 60,0 |
| 5                                     | 9,54E+03                   | 2,16E+03 | 6,11E+02 | 2,14E+02 | 69,7                       | 73,2 | 70,8 | 63,1 |
| 6                                     | 1,10E+04                   | 2,52E+03 | 7,09E+02 | 2,42E+02 | 69,3                       | 73,1 | 71,6 | 64,3 |
| 7                                     | 1,24E+04                   | 2,85E+03 | 8,05E+02 | 2,77E+02 | 69,0                       | 73,1 | 72,0 | 66,0 |
| 8                                     | 1,37E+04                   | 3,18E+03 | 9,00E+02 | 2,99E+02 | 68,8                       | 72,9 | 72,5 | 66,8 |
| 9                                     | 1,50E+04                   | 3,50E+03 | 9,91E+02 | 3,30E+02 | 68,6                       | 72,8 | 72,7 | 68,0 |
| 10                                    | 1,62E+04                   | 3,82E+03 | 1,08E+03 | 3,59E+02 | 68,4                       | 72,7 | 73,2 | 68,1 |
| 11                                    | 1,74E+04                   | 4,13E+03 | 1,17E+03 | 3,89E+02 | 68,2                       | 72,6 | 73,4 | 68,7 |
| 12                                    | 1,86E+04                   | 4,43E+03 | 1,26E+03 | 4,14E+02 | 68,1                       | 72,5 | 73,4 | 69,3 |
| 13                                    | 1,98E+04                   | 4,72E+03 | 1,35E+03 | 4,42E+02 | 68,0                       | 72,3 | 73,6 | 70,1 |

|    |          |          |          |          |      |      |      |      |
|----|----------|----------|----------|----------|------|------|------|------|
| 14 | 2,09E+04 | 5,01E+03 | 1,43E+03 | 4,68E+02 | 67,9 | 72,3 | 73,8 | 70,3 |
| 15 | 2,20E+04 | 5,30E+03 | 1,51E+03 | 4,96E+02 | 67,7 | 72,2 | 73,8 | 70,5 |
| 16 | 2,31E+04 | 5,59E+03 | 1,60E+03 | 5,21E+02 | 67,6 | 72,1 | 73,9 | 70,6 |
| 17 | 2,41E+04 | 5,86E+03 | 1,68E+03 | 5,51E+02 | 67,6 | 72,1 | 73,9 | 70,8 |
| 18 | 2,52E+04 | 6,14E+03 | 1,76E+03 | 5,75E+02 | 67,5 | 72,0 | 74,0 | 71,0 |
| 19 | 2,62E+04 | 6,41E+03 | 1,85E+03 | 6,03E+02 | 67,4 | 71,9 | 74,0 | 71,4 |
| 20 | 2,73E+04 | 6,68E+03 | 1,93E+03 | 6,28E+02 | 67,3 | 71,8 | 74,1 | 71,4 |
| 21 | 2,82E+04 | 6,94E+03 | 2,01E+03 | 6,54E+02 | 67,2 | 71,8 | 74,1 | 71,5 |
| 22 | 2,92E+04 | 7,22E+03 | 2,09E+03 | 6,83E+02 | 67,1 | 71,7 | 74,2 | 71,6 |
| 23 | 3,02E+04 | 7,47E+03 | 2,17E+03 | 7,07E+02 | 67,1 | 71,6 | 74,1 | 71,9 |
| 24 | 3,12E+04 | 7,73E+03 | 2,24E+03 | 7,33E+02 | 67,1 | 71,6 | 74,1 | 71,8 |
| 25 | 3,21E+04 | 7,99E+03 | 2,32E+03 | 7,58E+02 | 67,0 | 71,6 | 74,1 | 71,8 |
| 26 | 3,31E+04 | 8,24E+03 | 2,40E+03 | 7,84E+02 | 66,9 | 71,5 | 74,0 | 72,2 |
| 27 | 3,40E+04 | 8,49E+03 | 2,48E+03 | 8,06E+02 | 66,9 | 71,4 | 74,1 | 72,0 |
| 28 | 3,49E+04 | 8,75E+03 | 2,55E+03 | 8,36E+02 | 66,8 | 71,3 | 74,1 | 71,9 |
| 29 | 3,58E+04 | 8,99E+03 | 2,63E+03 | 8,58E+02 | 66,8 | 71,3 | 74,1 | 72,0 |
| 30 | 3,67E+04 | 9,24E+03 | 2,71E+03 | 8,85E+02 | 66,7 | 71,3 | 74,1 | 72,0 |
| 31 | 3,76E+04 | 9,48E+03 | 2,78E+03 | 9,12E+02 | 66,7 | 71,2 | 74,0 | 72,2 |
| 32 | 3,85E+04 | 9,73E+03 | 2,86E+03 | 9,33E+02 | 66,6 | 71,2 | 74,0 | 72,1 |
| 33 | 3,93E+04 | 9,96E+03 | 2,93E+03 | 9,60E+02 | 66,6 | 71,1 | 74,0 | 72,1 |
| 34 | 4,02E+04 | 1,02E+04 | 3,01E+03 | 9,88E+02 | 66,5 | 71,1 | 73,9 | 72,1 |
| 35 | 4,11E+04 | 1,04E+04 | 3,08E+03 | 1,01E+03 | 66,5 | 71,1 | 74,0 | 72,0 |
| 36 | 4,19E+04 | 1,07E+04 | 3,15E+03 | 1,04E+03 | 66,5 | 71,1 | 73,9 | 72,2 |
| 37 | 4,28E+04 | 1,09E+04 | 3,23E+03 | 1,06E+03 | 66,4 | 71,0 | 73,9 | 72,0 |
| 38 | 4,36E+04 | 1,11E+04 | 3,30E+03 | 1,09E+03 | 66,4 | 71,0 | 73,9 | 72,0 |
| 39 | 4,44E+04 | 1,14E+04 | 3,37E+03 | 1,11E+03 | 66,4 | 70,9 | 73,9 | 71,8 |
| 40 | 4,53E+04 | 1,16E+04 | 3,45E+03 | 1,14E+03 | 66,4 | 70,9 | 73,8 | 71,8 |
| 41 | 4,61E+04 | 1,18E+04 | 3,52E+03 | 1,16E+03 | 66,3 | 70,9 | 73,8 | 71,9 |
| 42 | 4,69E+04 | 1,20E+04 | 3,59E+03 | 1,19E+03 | 66,3 | 70,8 | 73,8 | 71,8 |
| 43 | 4,77E+04 | 1,23E+04 | 3,66E+03 | 1,21E+03 | 66,3 | 70,8 | 73,7 | 71,9 |
| 44 | 4,85E+04 | 1,25E+04 | 3,73E+03 | 1,24E+03 | 66,2 | 70,8 | 73,7 | 71,7 |
| 45 | 4,93E+04 | 1,27E+04 | 3,80E+03 | 1,26E+03 | 66,2 | 70,8 | 73,7 | 71,8 |
| 46 | 5,01E+04 | 1,29E+04 | 3,87E+03 | 1,28E+03 | 66,2 | 70,8 | 73,7 | 71,9 |
| 47 | 5,09E+04 | 1,31E+04 | 3,94E+03 | 1,31E+03 | 66,2 | 70,7 | 73,6 | 71,5 |
| 48 | 5,17E+04 | 1,34E+04 | 4,01E+03 | 1,33E+03 | 66,1 | 70,7 | 73,6 | 71,7 |
| 49 | 5,25E+04 | 1,36E+04 | 4,08E+03 | 1,36E+03 | 66,1 | 70,7 | 73,6 | 71,7 |
| 50 | 5,32E+04 | 1,38E+04 | 4,15E+03 | 1,38E+03 | 66,1 | 70,7 | 73,5 | 71,5 |
| 51 | 5,40E+04 | 1,40E+04 | 4,22E+03 | 1,41E+03 | 66,1 | 70,7 | 73,5 | 71,5 |
| 52 | 5,48E+04 | 1,42E+04 | 4,29E+03 | 1,43E+03 | 66,1 | 70,7 | 73,5 | 71,5 |
| 53 | 5,55E+04 | 1,44E+04 | 4,36E+03 | 1,46E+03 | 66,0 | 70,7 | 73,5 | 71,3 |
| 54 | 5,63E+04 | 1,46E+04 | 4,43E+03 | 1,48E+03 | 66,0 | 70,7 | 73,4 | 71,3 |
| 55 | 5,71E+04 | 1,48E+04 | 4,50E+03 | 1,51E+03 | 66,0 | 70,7 | 73,4 | 71,2 |
| 56 | 5,78E+04 | 1,50E+04 | 4,57E+03 | 1,54E+03 | 66,0 | 70,7 | 73,4 | 71,2 |
| 57 | 5,86E+04 | 1,52E+04 | 4,63E+03 | 1,56E+03 | 66,0 | 70,7 | 73,4 | 70,9 |
| 58 | 5,93E+04 | 1,54E+04 | 4,70E+03 | 1,58E+03 | 65,9 | 70,7 | 73,3 | 71,1 |

|     |          |          |          |          |      |      |      |      |
|-----|----------|----------|----------|----------|------|------|------|------|
| 59  | 6,01E+04 | 1,56E+04 | 4,78E+03 | 1,61E+03 | 65,9 | 70,6 | 73,1 | 71,0 |
| 60  | 6,08E+04 | 1,58E+04 | 4,83E+03 | 1,60E+03 | 65,9 | 70,7 | 73,0 | 70,9 |
| 61  | 6,16E+04 | 1,60E+04 | 4,88E+03 | 1,62E+03 | 65,9 | 70,7 | 72,9 | 70,8 |
| 62  | 6,23E+04 | 1,62E+04 | 4,95E+03 | 1,64E+03 | 65,9 | 70,6 | 72,8 | 70,7 |
| 63  | 6,30E+04 | 1,64E+04 | 5,02E+03 | 1,67E+03 | 65,9 | 70,6 | 72,8 | 70,7 |
| 64  | 6,38E+04 | 1,66E+04 | 5,08E+03 | 1,69E+03 | 65,8 | 70,6 | 72,8 | 70,6 |
| 65  | 6,45E+04 | 1,68E+04 | 5,15E+03 | 1,71E+03 | 65,8 | 70,6 | 72,7 | 70,4 |
| 66  | 6,53E+04 | 1,70E+04 | 5,21E+03 | 1,74E+03 | 65,8 | 70,6 | 72,7 | 70,4 |
| 67  | 6,60E+04 | 1,72E+04 | 5,27E+03 | 1,76E+03 | 65,8 | 70,6 | 72,6 | 70,3 |
| 68  | 6,67E+04 | 1,74E+04 | 5,34E+03 | 1,78E+03 | 65,8 | 70,6 | 72,6 | 70,4 |
| 69  | 6,74E+04 | 1,76E+04 | 5,40E+03 | 1,80E+03 | 65,8 | 70,6 | 72,6 | 70,2 |
| 70  | 6,82E+04 | 1,78E+04 | 5,47E+03 | 1,82E+03 | 65,7 | 70,6 | 72,5 | 70,1 |
| 71  | 6,89E+04 | 1,79E+04 | 5,53E+03 | 1,85E+03 | 65,7 | 70,6 | 72,5 | 70,1 |
| 72  | 6,96E+04 | 1,81E+04 | 5,60E+03 | 1,87E+03 | 65,7 | 70,6 | 72,4 | 69,9 |
| 73  | 7,04E+04 | 1,83E+04 | 5,66E+03 | 1,89E+03 | 65,7 | 70,6 | 72,5 | 69,9 |
| 74  | 7,11E+04 | 1,85E+04 | 5,72E+03 | 1,91E+03 | 65,7 | 70,6 | 72,4 | 69,9 |
| 75  | 7,18E+04 | 1,87E+04 | 5,79E+03 | 1,93E+03 | 65,7 | 70,6 | 72,4 | 69,7 |
| 76  | 7,25E+04 | 1,89E+04 | 5,85E+03 | 1,96E+03 | 65,7 | 70,6 | 72,4 | 69,7 |
| 77  | 7,32E+04 | 1,91E+04 | 5,91E+03 | 1,97E+03 | 65,6 | 70,6 | 72,3 | 69,6 |
| 78  | 7,39E+04 | 1,93E+04 | 5,98E+03 | 2,01E+03 | 65,6 | 70,6 | 72,3 | 69,3 |
| 79  | 7,46E+04 | 1,95E+04 | 6,04E+03 | 2,02E+03 | 65,6 | 70,6 | 72,2 | 69,4 |
| 80  | 7,53E+04 | 1,96E+04 | 6,10E+03 | 2,05E+03 | 65,6 | 70,6 | 72,2 | 69,4 |
| 81  | 7,60E+04 | 1,98E+04 | 6,16E+03 | 2,07E+03 | 65,6 | 70,6 | 72,2 | 69,3 |
| 82  | 7,67E+04 | 2,00E+04 | 6,23E+03 | 2,09E+03 | 65,6 | 70,6 | 72,2 | 69,2 |
| 83  | 7,74E+04 | 2,02E+04 | 6,29E+03 | 2,11E+03 | 65,6 | 70,6 | 72,1 | 69,0 |
| 84  | 7,81E+04 | 2,04E+04 | 6,36E+03 | 2,13E+03 | 65,6 | 70,6 | 72,1 | 69,1 |
| 85  | 7,88E+04 | 2,06E+04 | 6,41E+03 | 2,15E+03 | 65,5 | 70,6 | 72,1 | 68,8 |
| 86  | 7,95E+04 | 2,07E+04 | 6,48E+03 | 2,18E+03 | 65,5 | 70,6 | 72,0 | 68,7 |
| 87  | 8,02E+04 | 2,09E+04 | 6,54E+03 | 2,20E+03 | 65,5 | 70,6 | 71,9 | 68,8 |
| 88  | 8,08E+04 | 2,11E+04 | 6,60E+03 | 2,22E+03 | 65,5 | 70,6 | 71,9 | 68,6 |
| 89  | 8,15E+04 | 2,13E+04 | 6,67E+03 | 2,24E+03 | 65,5 | 70,6 | 71,9 | 68,5 |
| 90  | 8,22E+04 | 2,15E+04 | 6,72E+03 | 2,26E+03 | 65,5 | 70,6 | 71,9 | 68,3 |
| 91  | 8,29E+04 | 2,16E+04 | 6,78E+03 | 2,28E+03 | 65,5 | 70,6 | 71,8 | 68,2 |
| 92  | 8,35E+04 | 2,18E+04 | 6,84E+03 | 2,31E+03 | 65,5 | 70,6 | 71,8 | 68,1 |
| 93  | 8,42E+04 | 2,20E+04 | 6,90E+03 | 2,33E+03 | 65,5 | 70,6 | 71,7 | 68,1 |
| 94  | 8,49E+04 | 2,22E+04 | 6,96E+03 | 2,36E+03 | 65,4 | 70,6 | 71,6 | 68,2 |
| 95  | 8,55E+04 | 2,24E+04 | 7,03E+03 | 2,37E+03 | 65,4 | 70,7 | 71,7 | 68,0 |
| 96  | 8,62E+04 | 2,25E+04 | 7,08E+03 | 2,39E+03 | 65,4 | 70,6 | 71,5 | 68,1 |
| 97  | 8,68E+04 | 2,27E+04 | 7,14E+03 | 2,41E+03 | 65,4 | 70,6 | 71,5 | 67,9 |
| 98  | 8,75E+04 | 2,29E+04 | 7,21E+03 | 2,44E+03 | 65,4 | 70,6 | 71,5 | 67,7 |
| 99  | 8,81E+04 | 2,31E+04 | 7,27E+03 | 2,45E+03 | 65,4 | 70,6 | 71,5 | 67,5 |
| 100 | 8,88E+04 | 2,32E+04 | 7,33E+03 | 2,47E+03 | 65,4 | 70,7 | 71,4 | 67,6 |

**Tabela A 3-** Módulo dinâmico e ângulo de fase para o ligante AB-R25 condição virgem.

| Frequência de ensaio $\omega$ (rad/s) | Temperatura de ensaio (°C) |          |          |          | Temperatura de ensaio (°C) |      |      |      |
|---------------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------------------------|------|------|------|
|                                       | 52                         | 64       | 76       | 88       | 52                         | 64   | 76   | 88   |
|                                       | AB-R25                     |          |          |          |                            |      |      |      |
|                                       | $ G^* $ (Pa)               |          |          |          | Ângulo de fase (°)         |      |      |      |
| 1                                     | 1,04E+03                   | 3,06E+02 | 1,26E+02 | 8,07E+01 | 68,7                       | 61,9 | 50,0 | 36,8 |
| 2                                     | 1,80E+03                   | 5,08E+02 | 1,94E+02 | 1,10E+02 | 68,7                       | 66,4 | 58,1 | 46,6 |
| 3                                     | 2,47E+03                   | 7,01E+02 | 2,53E+02 | 1,33E+02 | 68,0                       | 68,5 | 61,0 | 49,4 |
| 4                                     | 3,08E+03                   | 8,75E+02 | 3,13E+02 | 1,58E+02 | 67,4                       | 68,8 | 62,5 | 49,3 |
| 5                                     | 3,65E+03                   | 1,05E+03 | 3,68E+02 | 1,78E+02 | 66,8                       | 69,4 | 65,1 | 54,6 |
| 6                                     | 4,18E+03                   | 1,21E+03 | 4,22E+02 | 1,96E+02 | 66,2                       | 69,6 | 66,1 | 56,0 |
| 7                                     | 4,69E+03                   | 1,37E+03 | 4,73E+02 | 2,16E+02 | 65,7                       | 69,6 | 68,0 | 58,8 |
| 8                                     | 5,17E+03                   | 1,53E+03 | 5,29E+02 | 2,34E+02 | 65,3                       | 69,6 | 67,6 | 60,1 |
| 9                                     | 5,63E+03                   | 1,68E+03 | 5,84E+02 | 2,55E+02 | 65,0                       | 69,7 | 68,7 | 61,5 |
| 10                                    | 6,08E+03                   | 1,83E+03 | 6,30E+02 | 2,71E+02 | 64,7                       | 69,6 | 68,8 | 62,1 |
| 11                                    | 6,52E+03                   | 1,97E+03 | 6,83E+02 | 2,92E+02 | 64,4                       | 69,5 | 69,3 | 63,6 |
| 12                                    | 6,93E+03                   | 2,11E+03 | 7,32E+02 | 3,07E+02 | 64,1                       | 69,5 | 69,5 | 65,0 |
| 13                                    | 7,34E+03                   | 2,25E+03 | 7,81E+02 | 3,22E+02 | 63,9                       | 69,4 | 69,9 | 66,2 |
| 14                                    | 7,74E+03                   | 2,38E+03 | 8,31E+02 | 3,46E+02 | 63,7                       | 69,3 | 70,1 | 67,4 |
| 15                                    | 8,13E+03                   | 2,52E+03 | 8,76E+02 | 3,60E+02 | 63,5                       | 69,2 | 70,3 | 67,7 |
| 16                                    | 8,51E+03                   | 2,65E+03 | 9,22E+02 | 3,73E+02 | 63,3                       | 69,1 | 70,6 | 68,9 |
| 17                                    | 8,88E+03                   | 2,77E+03 | 9,70E+02 | 3,93E+02 | 63,1                       | 69,0 | 70,7 | 69,5 |
| 18                                    | 9,24E+03                   | 2,90E+03 | 1,01E+03 | 4,09E+02 | 63,0                       | 69,0 | 70,7 | 70,5 |
| 19                                    | 9,60E+03                   | 3,03E+03 | 1,06E+03 | 4,24E+02 | 62,8                       | 68,8 | 70,8 | 71,0 |
| 20                                    | 9,96E+03                   | 3,16E+03 | 1,10E+03 | 4,41E+02 | 62,7                       | 68,8 | 70,9 | 72,2 |
| 21                                    | 1,03E+04                   | 3,28E+03 | 1,15E+03 | 4,56E+02 | 62,6                       | 68,7 | 71,1 | 72,8 |
| 22                                    | 1,06E+04                   | 3,39E+03 | 1,19E+03 | 4,74E+02 | 62,5                       | 68,7 | 71,1 | 73,5 |
| 23                                    | 1,10E+04                   | 3,51E+03 | 1,24E+03 | 4,89E+02 | 62,4                       | 68,6 | 71,1 | 74,2 |
| 24                                    | 1,13E+04                   | 3,63E+03 | 1,28E+03 | 5,05E+02 | 62,3                       | 68,6 | 71,3 | 75,2 |
| 25                                    | 1,16E+04                   | 3,75E+03 | 1,32E+03 | 5,18E+02 | 62,2                       | 68,5 | 71,3 | 75,6 |
| 26                                    | 1,20E+04                   | 3,86E+03 | 1,36E+03 | 5,36E+02 | 62,1                       | 68,4 | 71,3 | 76,8 |
| 27                                    | 1,23E+04                   | 3,98E+03 | 1,40E+03 | 5,50E+02 | 62,1                       | 68,4 | 71,4 | 76,9 |
| 28                                    | 1,26E+04                   | 4,09E+03 | 1,45E+03 | 5,67E+02 | 61,9                       | 68,3 | 71,5 | 77,6 |
| 29                                    | 1,29E+04                   | 4,20E+03 | 1,49E+03 | 5,80E+02 | 61,9                       | 68,3 | 71,5 | 78,3 |
| 30                                    | 1,32E+04                   | 4,31E+03 | 1,53E+03 | 5,98E+02 | 61,8                       | 68,2 | 71,5 | 79,2 |
| 31                                    | 1,35E+04                   | 4,41E+03 | 1,57E+03 | 6,14E+02 | 61,7                       | 68,2 | 71,6 | 79,8 |
| 32                                    | 1,38E+04                   | 4,52E+03 | 1,61E+03 | 6,30E+02 | 61,7                       | 68,2 | 71,6 | 80,4 |
| 33                                    | 1,41E+04                   | 4,63E+03 | 1,65E+03 | 6,43E+02 | 61,7                       | 68,2 | 71,6 | 80,9 |
| 34                                    | 1,44E+04                   | 4,73E+03 | 1,68E+03 | 6,62E+02 | 61,6                       | 68,2 | 71,6 | 81,4 |
| 35                                    | 1,47E+04                   | 4,83E+03 | 1,72E+03 | 6,76E+02 | 61,6                       | 68,1 | 71,6 | 81,6 |
| 36                                    | 1,49E+04                   | 4,93E+03 | 1,76E+03 | 6,91E+02 | 61,6                       | 68,1 | 71,8 | 81,7 |

|    |          |          |          |          |      |      |      |      |
|----|----------|----------|----------|----------|------|------|------|------|
| 37 | 1,52E+04 | 5,03E+03 | 1,80E+03 | 7,07E+02 | 61,5 | 68,1 | 71,7 | 82,0 |
| 38 | 1,55E+04 | 5,13E+03 | 1,83E+03 | 7,23E+02 | 61,4 | 68,1 | 71,8 | 82,0 |
| 39 | 1,57E+04 | 5,23E+03 | 1,87E+03 | 7,39E+02 | 61,5 | 68,1 | 71,8 | 82,1 |
| 40 | 1,60E+04 | 5,32E+03 | 1,91E+03 | 7,54E+02 | 61,4 | 68,1 | 71,9 | 82,3 |
| 41 | 1,63E+04 | 5,42E+03 | 1,95E+03 | 7,69E+02 | 61,3 | 68,1 | 72,0 | 82,3 |
| 42 | 1,65E+04 | 5,51E+03 | 1,98E+03 | 7,86E+02 | 61,3 | 68,1 | 72,0 | 82,5 |
| 43 | 1,68E+04 | 5,61E+03 | 2,02E+03 | 8,02E+02 | 61,3 | 68,1 | 71,9 | 82,7 |
| 44 | 1,70E+04 | 5,70E+03 | 2,06E+03 | 8,15E+02 | 61,3 | 68,1 | 72,0 | 82,7 |
| 45 | 1,73E+04 | 5,79E+03 | 2,09E+03 | 8,34E+02 | 61,2 | 68,1 | 72,1 | 82,8 |
| 46 | 1,75E+04 | 5,88E+03 | 2,13E+03 | 8,50E+02 | 61,2 | 68,2 | 72,1 | 82,9 |
| 47 | 1,78E+04 | 5,97E+03 | 2,17E+03 | 8,70E+02 | 61,2 | 68,2 | 72,2 | 83,1 |
| 48 | 1,80E+04 | 6,06E+03 | 2,20E+03 | 8,84E+02 | 61,2 | 68,2 | 72,3 | 83,1 |
| 49 | 1,83E+04 | 6,14E+03 | 2,24E+03 | 8,98E+02 | 61,2 | 68,3 | 72,2 | 83,3 |
| 50 | 1,85E+04 | 6,23E+03 | 2,27E+03 | 9,15E+02 | 61,2 | 68,2 | 72,3 | 83,5 |
| 51 | 1,87E+04 | 6,32E+03 | 2,31E+03 | 9,35E+02 | 61,2 | 68,3 | 72,3 | 83,6 |
| 52 | 1,89E+04 | 6,40E+03 | 2,34E+03 | 9,51E+02 | 61,2 | 68,3 | 72,4 | 83,7 |
| 53 | 1,92E+04 | 6,48E+03 | 2,37E+03 | 9,69E+02 | 61,2 | 68,3 | 72,5 | 83,7 |
| 54 | 1,94E+04 | 6,57E+03 | 2,41E+03 | 9,87E+02 | 61,1 | 68,4 | 72,4 | 84,0 |
| 55 | 1,96E+04 | 6,65E+03 | 2,44E+03 | 1,01E+03 | 61,3 | 68,4 | 72,5 | 83,9 |
| 56 | 1,98E+04 | 6,73E+03 | 2,48E+03 | 1,02E+03 | 61,2 | 68,4 | 72,5 | 84,1 |
| 57 | 2,00E+04 | 6,81E+03 | 2,51E+03 | 1,04E+03 | 61,1 | 68,5 | 72,6 | 84,2 |
| 58 | 2,03E+04 | 6,89E+03 | 2,55E+03 | 1,05E+03 | 61,1 | 68,5 | 72,6 | 84,3 |
| 59 | 2,05E+04 | 6,97E+03 | 2,57E+03 | 1,05E+03 | 61,1 | 68,6 | 72,6 | 83,9 |
| 60 | 2,07E+04 | 7,05E+03 | 2,60E+03 | 1,06E+03 | 61,1 | 68,6 | 72,6 | 84,5 |
| 61 | 2,09E+04 | 7,11E+03 | 2,61E+03 | 1,08E+03 | 61,1 | 68,7 | 72,7 | 84,6 |
| 62 | 2,11E+04 | 7,17E+03 | 2,64E+03 | 1,10E+03 | 61,1 | 68,8 | 72,8 | 84,7 |
| 63 | 2,13E+04 | 7,24E+03 | 2,67E+03 | 1,12E+03 | 61,1 | 68,8 | 72,9 | 84,9 |
| 64 | 2,15E+04 | 7,31E+03 | 2,70E+03 | 1,13E+03 | 61,1 | 68,9 | 72,9 | 84,9 |
| 65 | 2,17E+04 | 7,38E+03 | 2,74E+03 | 1,15E+03 | 61,1 | 69,0 | 72,9 | 84,9 |
| 66 | 2,19E+04 | 7,46E+03 | 2,76E+03 | 1,16E+03 | 61,1 | 69,0 | 72,9 | 85,1 |
| 67 | 2,22E+04 | 7,53E+03 | 2,80E+03 | 1,19E+03 | 61,1 | 69,0 | 72,9 | 85,2 |
| 68 | 2,24E+04 | 7,60E+03 | 2,83E+03 | 1,20E+03 | 61,1 | 69,1 | 73,1 | 85,3 |
| 69 | 2,26E+04 | 7,67E+03 | 2,86E+03 | 1,22E+03 | 61,1 | 69,1 | 73,1 | 85,6 |
| 70 | 2,28E+04 | 7,74E+03 | 2,89E+03 | 1,24E+03 | 61,1 | 69,2 | 73,2 | 85,5 |
| 71 | 2,30E+04 | 7,81E+03 | 2,92E+03 | 1,26E+03 | 61,1 | 69,3 | 73,2 | 85,8 |
| 72 | 2,33E+04 | 7,88E+03 | 2,95E+03 | 1,28E+03 | 61,1 | 69,4 | 73,2 | 85,9 |
| 73 | 2,35E+04 | 7,95E+03 | 2,98E+03 | 1,30E+03 | 61,1 | 69,4 | 73,2 | 85,9 |
| 74 | 2,37E+04 | 8,03E+03 | 3,01E+03 | 1,31E+03 | 61,1 | 69,4 | 73,3 | 86,0 |
| 75 | 2,39E+04 | 8,10E+03 | 3,04E+03 | 1,34E+03 | 61,1 | 69,5 | 73,4 | 86,0 |
| 76 | 2,41E+04 | 8,16E+03 | 3,07E+03 | 1,36E+03 | 61,1 | 69,6 | 73,4 | 86,2 |
| 77 | 2,44E+04 | 8,23E+03 | 3,10E+03 | 1,37E+03 | 61,1 | 69,6 | 73,4 | 86,5 |

|     |          |          |          |          |      |      |      |      |
|-----|----------|----------|----------|----------|------|------|------|------|
| 78  | 2,46E+04 | 8,30E+03 | 3,13E+03 | 1,40E+03 | 61,1 | 69,7 | 73,5 | 86,6 |
| 79  | 2,48E+04 | 8,37E+03 | 3,15E+03 | 1,41E+03 | 61,1 | 69,8 | 73,5 | 86,6 |
| 80  | 2,50E+04 | 8,44E+03 | 3,19E+03 | 1,44E+03 | 61,1 | 69,8 | 73,5 | 86,7 |
| 81  | 2,52E+04 | 8,51E+03 | 3,21E+03 | 1,46E+03 | 61,2 | 69,9 | 73,7 | 86,8 |
| 82  | 2,54E+04 | 8,58E+03 | 3,24E+03 | 1,48E+03 | 61,1 | 69,9 | 73,7 | 86,7 |
| 83  | 2,56E+04 | 8,65E+03 | 3,27E+03 | 1,50E+03 | 61,1 | 70,0 | 73,9 | 87,1 |
| 84  | 2,58E+04 | 8,72E+03 | 3,30E+03 | 1,52E+03 | 61,1 | 70,1 | 73,9 | 87,1 |
| 85  | 2,60E+04 | 8,79E+03 | 3,32E+03 | 1,54E+03 | 61,1 | 70,2 | 73,9 | 87,3 |
| 86  | 2,62E+04 | 8,85E+03 | 3,35E+03 | 1,56E+03 | 61,2 | 70,2 | 74,0 | 87,4 |
| 87  | 2,64E+04 | 8,92E+03 | 3,38E+03 | 1,58E+03 | 61,1 | 70,2 | 74,1 | 87,3 |
| 88  | 2,66E+04 | 8,99E+03 | 3,41E+03 | 1,61E+03 | 61,2 | 70,3 | 74,1 | 87,8 |
| 89  | 2,67E+04 | 9,06E+03 | 3,44E+03 | 1,63E+03 | 61,2 | 70,4 | 74,1 | 87,7 |
| 90  | 2,69E+04 | 9,13E+03 | 3,46E+03 | 1,65E+03 | 61,2 | 70,5 | 74,1 | 87,7 |
| 91  | 2,71E+04 | 9,19E+03 | 3,49E+03 | 1,67E+03 | 61,2 | 70,6 | 74,3 | 42,7 |
| 92  | 2,73E+04 | 9,26E+03 | 3,52E+03 | 1,69E+03 | 61,2 | 70,6 | 74,2 | 43,1 |
| 93  | 2,75E+04 | 9,33E+03 | 3,55E+03 | 1,71E+03 | 61,2 | 70,7 | 74,3 | 43,1 |
| 94  | 2,77E+04 | 9,40E+03 | 3,57E+03 | 1,73E+03 | 61,2 | 70,8 | 74,5 | 43,1 |
| 95  | 2,78E+04 | 9,46E+03 | 3,59E+03 | 1,77E+03 | 61,2 | 70,8 | 74,4 | 43,3 |
| 96  | 2,80E+04 | 9,52E+03 | 3,62E+03 | 1,79E+03 | 61,3 | 71,0 | 74,6 | 43,4 |
| 97  | 2,82E+04 | 9,59E+03 | 3,65E+03 | 1,81E+03 | 61,3 | 71,0 | 74,6 | 43,4 |
| 98  | 2,84E+04 | 9,65E+03 | 3,67E+03 | 1,83E+03 | 61,3 | 71,1 | 74,7 | 43,5 |
| 99  | 2,86E+04 | 9,72E+03 | 3,71E+03 | 1,86E+03 | 61,3 | 71,2 | 74,7 | 43,8 |
| 100 | 2,87E+04 | 9,79E+03 | 3,73E+03 | 1,88E+03 | 61,3 | 71,3 | 74,8 | 43,6 |

**Tabela A 4- Módulo dinâmico e ângulo de fase para o ligante AB-R30 condição virgem.**

| Frequência de ensaio $\omega$ (rad/s) | Temperatura de ensaio (°C) |          |          |          | Temperatura de ensaio (°C) |      |      |      |
|---------------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------------------------|------|------|------|
|                                       | 52                         | 64       | 76       | 88       | 52                         | 64   | 76   | 88   |
|                                       | AB-R30                     |          |          |          |                            |      |      |      |
|                                       | $ G^* $ (Pa)               |          |          |          | Ângulo de fase (°)         |      |      |      |
| 1                                     | 3,03E+03                   | 1,47E+03 | 9,64E+02 | 7,82E+02 | 50,3                       | 38,0 | 27,4 | 19,6 |
| 2                                     | 4,57E+03                   | 1,99E+03 | 1,19E+03 | 8,94E+02 | 53,7                       | 44,0 | 32,9 | 24,2 |
| 3                                     | 5,88E+03                   | 2,43E+03 | 1,37E+03 | 9,88E+02 | 54,9                       | 47,1 | 36,4 | 27,2 |
| 4                                     | 7,04E+03                   | 2,84E+03 | 1,54E+03 | 1,07E+03 | 55,6                       | 49,2 | 38,8 | 29,5 |
| 5                                     | 8,14E+03                   | 3,22E+03 | 1,69E+03 | 1,14E+03 | 55,7                       | 50,6 | 40,6 | 31,1 |
| 6                                     | 9,12E+03                   | 3,58E+03 | 1,83E+03 | 1,21E+03 | 55,9                       | 51,7 | 42,3 | 32,8 |
| 7                                     | 1,01E+04                   | 3,92E+03 | 1,97E+03 | 1,27E+03 | 55,9                       | 52,4 | 43,6 | 34,0 |
| 8                                     | 1,10E+04                   | 4,24E+03 | 2,09E+03 | 1,33E+03 | 55,9                       | 53,1 | 44,7 | 35,3 |
| 9                                     | 1,18E+04                   | 4,56E+03 | 2,22E+03 | 1,39E+03 | 55,9                       | 53,6 | 45,7 | 36,2 |
| 10                                    | 1,26E+04                   | 4,86E+03 | 2,34E+03 | 1,45E+03 | 55,8                       | 54,1 | 46,5 | 37,2 |
| 11                                    | 1,34E+04                   | 5,16E+03 | 2,46E+03 | 1,50E+03 | 55,8                       | 54,4 | 47,3 | 38,0 |

|    |          |          |          |          |      |      |      |      |
|----|----------|----------|----------|----------|------|------|------|------|
| 12 | 1,41E+04 | 5,44E+03 | 2,57E+03 | 1,56E+03 | 55,7 | 54,7 | 48,0 | 38,8 |
| 13 | 1,49E+04 | 5,72E+03 | 2,69E+03 | 1,61E+03 | 55,7 | 54,9 | 48,5 | 39,4 |
| 14 | 1,56E+04 | 6,00E+03 | 2,80E+03 | 1,66E+03 | 55,6 | 55,1 | 49,1 | 40,1 |
| 15 | 1,63E+04 | 6,26E+03 | 2,91E+03 | 1,71E+03 | 55,6 | 55,3 | 49,5 | 40,7 |
| 16 | 1,70E+04 | 6,53E+03 | 3,01E+03 | 1,76E+03 | 55,7 | 55,5 | 50,0 | 41,2 |
| 17 | 1,76E+04 | 6,78E+03 | 3,12E+03 | 1,80E+03 | 55,5 | 55,6 | 50,3 | 41,8 |
| 18 | 1,83E+04 | 7,03E+03 | 3,22E+03 | 1,85E+03 | 55,5 | 55,7 | 50,7 | 42,3 |
| 19 | 1,89E+04 | 7,28E+03 | 3,32E+03 | 1,90E+03 | 55,4 | 55,8 | 51,0 | 42,7 |
| 20 | 1,95E+04 | 7,52E+03 | 3,42E+03 | 1,94E+03 | 55,4 | 55,9 | 51,4 | 43,2 |
| 21 | 2,01E+04 | 7,76E+03 | 3,52E+03 | 1,98E+03 | 55,3 | 56,0 | 51,7 | 43,7 |
| 22 | 2,07E+04 | 7,99E+03 | 3,62E+03 | 2,03E+03 | 55,3 | 56,0 | 51,9 | 44,1 |
| 23 | 2,13E+04 | 8,22E+03 | 3,72E+03 | 2,07E+03 | 55,2 | 56,1 | 52,1 | 44,4 |
| 24 | 2,19E+04 | 8,45E+03 | 3,81E+03 | 2,11E+03 | 55,2 | 56,1 | 52,4 | 44,8 |
| 25 | 2,24E+04 | 8,68E+03 | 3,91E+03 | 2,16E+03 | 55,2 | 56,2 | 52,6 | 45,1 |
| 26 | 2,30E+04 | 8,90E+03 | 4,00E+03 | 2,20E+03 | 55,2 | 56,2 | 52,8 | 45,5 |
| 27 | 2,35E+04 | 9,12E+03 | 4,09E+03 | 2,24E+03 | 55,1 | 56,2 | 53,0 | 45,8 |
| 28 | 2,41E+04 | 9,33E+03 | 4,18E+03 | 2,28E+03 | 55,1 | 56,3 | 53,2 | 46,1 |
| 29 | 2,46E+04 | 9,54E+03 | 4,27E+03 | 2,32E+03 | 55,0 | 56,3 | 53,4 | 46,4 |
| 30 | 2,51E+04 | 9,76E+03 | 4,36E+03 | 2,36E+03 | 55,0 | 56,3 | 53,5 | 46,6 |
| 31 | 2,56E+04 | 9,96E+03 | 4,45E+03 | 2,41E+03 | 55,0 | 56,3 | 53,6 | 46,9 |
| 32 | 2,61E+04 | 1,02E+04 | 4,54E+03 | 2,45E+03 | 54,9 | 56,3 | 53,8 | 47,1 |
| 33 | 2,66E+04 | 1,04E+04 | 4,63E+03 | 2,48E+03 | 54,9 | 56,3 | 53,9 | 47,4 |
| 34 | 2,71E+04 | 1,06E+04 | 4,72E+03 | 2,53E+03 | 54,9 | 56,3 | 54,0 | 47,6 |
| 35 | 2,76E+04 | 1,08E+04 | 4,80E+03 | 2,56E+03 | 54,8 | 56,3 | 54,1 | 47,9 |
| 36 | 2,81E+04 | 1,10E+04 | 4,89E+03 | 2,60E+03 | 54,8 | 56,3 | 54,3 | 48,1 |
| 37 | 2,85E+04 | 1,12E+04 | 4,97E+03 | 2,64E+03 | 54,8 | 56,3 | 54,3 | 48,3 |
| 38 | 2,90E+04 | 1,14E+04 | 5,06E+03 | 2,68E+03 | 54,8 | 56,3 | 54,4 | 48,5 |
| 39 | 2,95E+04 | 1,16E+04 | 5,14E+03 | 2,72E+03 | 54,8 | 56,3 | 54,5 | 48,7 |
| 40 | 2,99E+04 | 1,17E+04 | 5,22E+03 | 2,76E+03 | 54,7 | 56,3 | 54,6 | 48,9 |
| 41 | 3,04E+04 | 1,19E+04 | 5,31E+03 | 2,80E+03 | 54,7 | 56,3 | 54,7 | 49,1 |
| 42 | 3,08E+04 | 1,21E+04 | 5,39E+03 | 2,83E+03 | 54,7 | 56,3 | 54,8 | 49,3 |
| 43 | 3,13E+04 | 1,23E+04 | 5,47E+03 | 2,87E+03 | 54,7 | 56,3 | 54,9 | 49,5 |
| 44 | 3,17E+04 | 1,25E+04 | 5,55E+03 | 2,91E+03 | 54,7 | 56,3 | 54,9 | 49,7 |
| 45 | 3,22E+04 | 1,27E+04 | 5,63E+03 | 2,95E+03 | 54,7 | 56,3 | 55,0 | 49,8 |
| 46 | 3,26E+04 | 1,29E+04 | 5,71E+03 | 2,98E+03 | 54,6 | 56,3 | 55,0 | 49,9 |
| 47 | 3,30E+04 | 1,30E+04 | 5,79E+03 | 3,02E+03 | 54,6 | 56,3 | 55,1 | 50,1 |
| 48 | 3,34E+04 | 1,32E+04 | 5,87E+03 | 3,05E+03 | 54,6 | 56,3 | 55,2 | 50,3 |
| 49 | 3,39E+04 | 1,34E+04 | 5,95E+03 | 3,09E+03 | 54,6 | 56,3 | 55,2 | 50,4 |
| 50 | 3,43E+04 | 1,36E+04 | 6,03E+03 | 3,13E+03 | 54,5 | 56,3 | 55,3 | 50,6 |
| 51 | 3,47E+04 | 1,37E+04 | 6,11E+03 | 3,17E+03 | 54,5 | 56,2 | 55,3 | 50,7 |
| 52 | 3,51E+04 | 1,39E+04 | 6,18E+03 | 3,20E+03 | 54,5 | 56,2 | 55,4 | 50,8 |

|    |          |          |          |          |      |      |      |      |
|----|----------|----------|----------|----------|------|------|------|------|
| 53 | 3,55E+04 | 1,41E+04 | 6,26E+03 | 3,24E+03 | 54,5 | 56,2 | 55,4 | 51,0 |
| 54 | 3,59E+04 | 1,43E+04 | 6,34E+03 | 3,27E+03 | 54,5 | 56,2 | 55,5 | 51,1 |
| 55 | 3,63E+04 | 1,44E+04 | 6,41E+03 | 3,31E+03 | 54,5 | 56,2 | 55,5 | 51,2 |
| 56 | 3,67E+04 | 1,46E+04 | 6,49E+03 | 3,35E+03 | 54,5 | 56,2 | 55,5 | 51,3 |
| 57 | 3,71E+04 | 1,48E+04 | 6,57E+03 | 3,38E+03 | 54,4 | 56,2 | 55,6 | 51,4 |
| 58 | 3,75E+04 | 1,49E+04 | 6,64E+03 | 3,42E+03 | 54,4 | 56,1 | 55,6 | 51,6 |
| 59 | 3,79E+04 | 1,51E+04 | 6,72E+03 | 3,45E+03 | 54,4 | 56,1 | 55,6 | 51,7 |
| 60 | 3,83E+04 | 1,53E+04 | 6,79E+03 | 3,48E+03 | 54,4 | 56,1 | 55,7 | 51,8 |
| 61 | 3,86E+04 | 1,54E+04 | 6,86E+03 | 3,52E+03 | 54,4 | 56,1 | 55,7 | 51,9 |
| 62 | 3,90E+04 | 1,56E+04 | 6,94E+03 | 3,55E+03 | 54,3 | 56,1 | 55,7 | 52,0 |
| 63 | 3,94E+04 | 1,57E+04 | 7,01E+03 | 3,58E+03 | 54,3 | 56,1 | 55,7 | 52,0 |
| 64 | 3,98E+04 | 1,59E+04 | 7,07E+03 | 3,60E+03 | 54,3 | 56,1 | 55,7 | 52,1 |
| 65 | 4,01E+04 | 1,60E+04 | 7,14E+03 | 3,64E+03 | 54,3 | 56,1 | 55,7 | 52,2 |
| 66 | 4,05E+04 | 1,62E+04 | 7,20E+03 | 3,67E+03 | 54,3 | 56,1 | 55,8 | 52,3 |
| 67 | 4,09E+04 | 1,63E+04 | 7,28E+03 | 3,71E+03 | 54,3 | 56,0 | 55,8 | 52,4 |
| 68 | 4,13E+04 | 1,65E+04 | 7,35E+03 | 3,74E+03 | 54,3 | 56,0 | 55,8 | 52,5 |
| 69 | 4,16E+04 | 1,67E+04 | 7,42E+03 | 3,77E+03 | 54,3 | 56,0 | 55,8 | 52,6 |
| 70 | 4,20E+04 | 1,68E+04 | 7,49E+03 | 3,81E+03 | 54,3 | 56,0 | 55,8 | 52,7 |
| 71 | 4,23E+04 | 1,70E+04 | 7,56E+03 | 3,84E+03 | 54,2 | 56,0 | 55,8 | 52,8 |
| 72 | 4,27E+04 | 1,71E+04 | 7,63E+03 | 3,87E+03 | 54,2 | 55,9 | 55,8 | 52,8 |
| 73 | 4,31E+04 | 1,73E+04 | 7,70E+03 | 3,91E+03 | 54,2 | 55,9 | 55,8 | 52,9 |
| 74 | 4,34E+04 | 1,74E+04 | 7,77E+03 | 3,94E+03 | 54,2 | 55,9 | 55,9 | 53,0 |
| 75 | 4,38E+04 | 1,76E+04 | 7,84E+03 | 3,97E+03 | 54,2 | 55,9 | 55,9 | 53,1 |
| 76 | 4,42E+04 | 1,77E+04 | 7,90E+03 | 4,00E+03 | 54,2 | 55,9 | 55,9 | 53,2 |
| 77 | 4,45E+04 | 1,79E+04 | 7,97E+03 | 4,04E+03 | 54,2 | 55,9 | 55,9 | 53,3 |
| 78 | 4,49E+04 | 1,80E+04 | 8,04E+03 | 4,06E+03 | 54,2 | 55,8 | 55,9 | 53,4 |
| 79 | 4,52E+04 | 1,82E+04 | 8,11E+03 | 4,10E+03 | 54,1 | 55,8 | 55,9 | 53,5 |
| 80 | 4,55E+04 | 1,83E+04 | 8,17E+03 | 4,13E+03 | 54,2 | 55,8 | 55,9 | 53,5 |
| 81 | 4,59E+04 | 1,85E+04 | 8,24E+03 | 4,16E+03 | 54,1 | 55,8 | 55,9 | 53,6 |
| 82 | 4,63E+04 | 1,86E+04 | 8,31E+03 | 4,19E+03 | 54,1 | 55,8 | 55,9 | 53,7 |
| 83 | 4,66E+04 | 1,87E+04 | 8,38E+03 | 4,23E+03 | 54,1 | 55,7 | 55,9 | 53,8 |
| 84 | 4,70E+04 | 1,89E+04 | 8,44E+03 | 4,26E+03 | 54,1 | 55,7 | 55,9 | 53,8 |
| 85 | 4,72E+04 | 1,90E+04 | 8,51E+03 | 4,29E+03 | 54,1 | 55,7 | 55,9 | 53,8 |
| 86 | 4,76E+04 | 1,92E+04 | 8,58E+03 | 4,32E+03 | 54,1 | 55,7 | 55,9 | 53,9 |
| 87 | 4,80E+04 | 1,93E+04 | 8,64E+03 | 4,36E+03 | 54,0 | 55,7 | 55,9 | 54,0 |
| 88 | 4,83E+04 | 1,95E+04 | 8,71E+03 | 4,39E+03 | 54,0 | 55,6 | 55,9 | 54,0 |
| 89 | 4,87E+04 | 1,96E+04 | 8,78E+03 | 4,42E+03 | 54,0 | 55,6 | 55,9 | 54,0 |
| 90 | 4,90E+04 | 1,97E+04 | 8,84E+03 | 4,45E+03 | 54,0 | 55,6 | 55,9 | 54,2 |
| 91 | 4,93E+04 | 1,99E+04 | 8,91E+03 | 4,48E+03 | 54,0 | 55,6 | 55,9 | 54,2 |
| 92 | 4,96E+04 | 2,00E+04 | 8,97E+03 | 4,51E+03 | 54,0 | 55,6 | 55,9 | 54,3 |
| 93 | 5,00E+04 | 2,02E+04 | 9,04E+03 | 4,54E+03 | 54,0 | 55,6 | 55,9 | 54,4 |

|     |          |          |          |          |      |      |      |      |
|-----|----------|----------|----------|----------|------|------|------|------|
| 94  | 5,03E+04 | 2,03E+04 | 9,10E+03 | 4,57E+03 | 53,9 | 55,6 | 55,9 | 54,5 |
| 95  | 5,07E+04 | 2,04E+04 | 9,17E+03 | 4,60E+03 | 54,0 | 55,5 | 55,9 | 54,5 |
| 96  | 5,10E+04 | 2,06E+04 | 9,23E+03 | 4,63E+03 | 53,9 | 55,5 | 55,9 | 54,5 |
| 97  | 5,13E+04 | 2,07E+04 | 9,29E+03 | 4,67E+03 | 53,9 | 55,5 | 55,9 | 54,7 |
| 98  | 5,17E+04 | 2,08E+04 | 9,35E+03 | 4,70E+03 | 53,9 | 55,5 | 55,9 | 54,7 |
| 99  | 5,20E+04 | 2,10E+04 | 9,42E+03 | 4,73E+03 | 53,9 | 55,4 | 55,8 | 54,7 |
| 100 | 5,23E+04 | 2,11E+04 | 9,48E+03 | 4,77E+03 | 53,9 | 55,4 | 55,9 | 54,9 |

## B. TABELAS DE RESULTADOS PARA O MÓDULO DINÂMICO E ÂNGULO DE FASE DOS LIGANTES ENVELHECIDOS

As tabelas a seguir apresentaram os resultados da média de três amostras ensaiadas às temperaturas de 52, 64, 76 e 88°C para os ligantes envelhecidos nas frequências de 1 a 100 rad/s.

**Tabela B 1-** Módulo dinâmico e ângulo de fase para o ligante CAP 50/70 condição envelhecida.

| Frequência de ensaio $\omega$ (rad/s) | Temperatura de ensaio (°C) |          |          |          | Temperatura de ensaio (°C) |      |      |      |
|---------------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------------------------|------|------|------|
|                                       | 52                         | 64       | 76       | 88       | 52                         | 64   | 76   | 88   |
|                                       | CAP 50/70                  |          |          |          |                            |      |      |      |
|                                       | G*  (Pa)                   |          |          |          | Ângulo de fase (°)         |      |      |      |
| 1                                     | 1,94E+03                   | 5,90E+02 | 2,11E+02 | 8,32E+01 | 63,3                       | 66,6 | 67,5 | 64,7 |
| 2                                     | 3,13E+03                   | 9,87E+02 | 3,60E+02 | 1,35E+02 | 62,3                       | 66,0 | 68,5 | 69,0 |
| 3                                     | 4,13E+03                   | 1,33E+03 | 4,94E+02 | 1,91E+02 | 61,8                       | 65,3 | 68,6 | 68,3 |
| 4                                     | 5,01E+03                   | 1,63E+03 | 6,14E+02 | 2,39E+02 | 61,5                       | 64,9 | 68,1 | 69,6 |
| 5                                     | 5,81E+03                   | 1,91E+03 | 7,26E+02 | 2,82E+02 | 61,4                       | 64,4 | 67,8 | 68,9 |
| 6                                     | 6,58E+03                   | 2,18E+03 | 8,36E+02 | 3,25E+02 | 61,2                       | 64,1 | 67,9 | 69,1 |
| 7                                     | 7,30E+03                   | 2,43E+03 | 9,38E+02 | 3,67E+02 | 61,2                       | 63,9 | 67,5 | 69,1 |
| 8                                     | 7,98E+03                   | 2,67E+03 | 1,04E+03 | 4,06E+02 | 61,2                       | 63,7 | 67,1 | 69,1 |
| 9                                     | 8,63E+03                   | 2,90E+03 | 1,13E+03 | 4,47E+02 | 61,1                       | 63,6 | 67,0 | 69,2 |
| 10                                    | 9,27E+03                   | 3,12E+03 | 1,22E+03 | 4,86E+02 | 61,1                       | 63,4 | 66,9 | 69,0 |
| 11                                    | 9,88E+03                   | 3,34E+03 | 1,31E+03 | 5,24E+02 | 61,1                       | 63,3 | 66,8 | 68,9 |
| 12                                    | 1,05E+04                   | 3,55E+03 | 1,40E+03 | 5,62E+02 | 61,2                       | 63,2 | 66,6 | 68,8 |
| 13                                    | 1,11E+04                   | 3,75E+03 | 1,48E+03 | 5,97E+02 | 61,2                       | 63,1 | 66,4 | 68,5 |
| 14                                    | 1,16E+04                   | 3,95E+03 | 1,56E+03 | 6,33E+02 | 61,2                       | 63,1 | 66,4 | 68,4 |
| 15                                    | 1,22E+04                   | 4,15E+03 | 1,64E+03 | 6,68E+02 | 61,2                       | 63,0 | 66,3 | 68,3 |
| 16                                    | 1,27E+04                   | 4,34E+03 | 1,72E+03 | 7,03E+02 | 61,3                       | 63,0 | 66,2 | 68,2 |
| 17                                    | 1,33E+04                   | 4,53E+03 | 1,80E+03 | 7,36E+02 | 61,4                       | 63,0 | 66,2 | 68,1 |
| 18                                    | 1,38E+04                   | 4,72E+03 | 1,87E+03 | 7,71E+02 | 61,3                       | 62,9 | 66,1 | 67,9 |
| 19                                    | 1,43E+04                   | 4,90E+03 | 1,95E+03 | 8,04E+02 | 61,4                       | 62,9 | 66,0 | 67,8 |
| 20                                    | 1,48E+04                   | 5,09E+03 | 2,02E+03 | 8,37E+02 | 61,4                       | 62,9 | 66,0 | 67,6 |
| 21                                    | 1,53E+04                   | 5,27E+03 | 2,09E+03 | 8,69E+02 | 61,3                       | 62,9 | 66,0 | 67,5 |
| 22                                    | 1,58E+04                   | 5,45E+03 | 2,16E+03 | 9,02E+02 | 61,5                       | 62,9 | 65,9 | 67,4 |

|    |          |          |          |          |      |      |      |      |
|----|----------|----------|----------|----------|------|------|------|------|
| 23 | 1,63E+04 | 5,61E+03 | 2,24E+03 | 9,35E+02 | 61,4 | 62,9 | 65,9 | 67,4 |
| 24 | 1,68E+04 | 5,79E+03 | 2,30E+03 | 9,66E+02 | 61,5 | 62,8 | 65,9 | 67,1 |
| 25 | 1,73E+04 | 5,98E+03 | 2,37E+03 | 9,95E+02 | 61,5 | 62,9 | 65,9 | 67,0 |
| 26 | 1,77E+04 | 6,15E+03 | 2,44E+03 | 1,03E+03 | 61,6 | 62,8 | 65,8 | 67,0 |
| 27 | 1,82E+04 | 6,33E+03 | 2,51E+03 | 1,06E+03 | 61,6 | 62,8 | 65,8 | 66,9 |
| 28 | 1,87E+04 | 6,50E+03 | 2,57E+03 | 1,09E+03 | 61,6 | 62,9 | 65,8 | 66,7 |
| 29 | 1,91E+04 | 6,67E+03 | 2,64E+03 | 1,12E+03 | 61,6 | 62,9 | 65,8 | 66,5 |
| 30 | 1,96E+04 | 6,83E+03 | 2,70E+03 | 1,15E+03 | 61,7 | 62,9 | 65,8 | 66,5 |
| 31 | 2,00E+04 | 6,99E+03 | 2,76E+03 | 1,18E+03 | 61,7 | 62,8 | 65,8 | 66,5 |
| 32 | 2,05E+04 | 7,16E+03 | 2,82E+03 | 1,21E+03 | 61,7 | 62,9 | 65,8 | 66,3 |
| 33 | 2,09E+04 | 7,33E+03 | 2,89E+03 | 1,24E+03 | 61,7 | 62,9 | 65,8 | 66,2 |
| 34 | 2,14E+04 | 7,49E+03 | 2,95E+03 | 1,27E+03 | 61,8 | 62,9 | 65,8 | 66,2 |
| 35 | 2,18E+04 | 7,64E+03 | 3,01E+03 | 1,29E+03 | 61,8 | 62,9 | 65,8 | 66,1 |
| 36 | 2,22E+04 | 7,80E+03 | 3,07E+03 | 1,33E+03 | 61,8 | 62,9 | 65,8 | 65,9 |
| 37 | 2,27E+04 | 7,96E+03 | 3,12E+03 | 1,35E+03 | 61,8 | 63,0 | 65,8 | 65,9 |
| 38 | 2,31E+04 | 8,11E+03 | 3,18E+03 | 1,38E+03 | 61,8 | 63,0 | 65,9 | 65,8 |
| 39 | 2,35E+04 | 8,27E+03 | 3,24E+03 | 1,41E+03 | 61,9 | 63,0 | 65,9 | 65,7 |
| 40 | 2,39E+04 | 8,41E+03 | 3,29E+03 | 1,44E+03 | 61,9 | 63,0 | 65,9 | 65,6 |
| 41 | 2,43E+04 | 8,57E+03 | 3,35E+03 | 1,47E+03 | 61,9 | 63,0 | 65,9 | 65,4 |
| 42 | 2,47E+04 | 8,71E+03 | 3,41E+03 | 1,50E+03 | 61,9 | 63,1 | 65,9 | 65,4 |
| 43 | 2,52E+04 | 8,86E+03 | 3,47E+03 | 1,52E+03 | 62,0 | 63,1 | 66,0 | 65,4 |
| 44 | 2,56E+04 | 9,01E+03 | 3,52E+03 | 1,55E+03 | 62,0 | 63,1 | 66,0 | 65,1 |
| 45 | 2,60E+04 | 9,15E+03 | 3,58E+03 | 1,58E+03 | 62,0 | 63,1 | 66,0 | 65,1 |
| 46 | 2,64E+04 | 9,29E+03 | 3,63E+03 | 1,61E+03 | 62,1 | 63,2 | 66,1 | 65,0 |
| 47 | 2,68E+04 | 9,43E+03 | 3,69E+03 | 1,64E+03 | 62,1 | 63,2 | 66,1 | 65,0 |
| 48 | 2,72E+04 | 9,57E+03 | 3,74E+03 | 1,67E+03 | 62,1 | 63,2 | 66,1 | 64,8 |
| 49 | 2,75E+04 | 9,71E+03 | 3,79E+03 | 1,69E+03 | 62,1 | 63,3 | 66,1 | 64,8 |
| 50 | 2,79E+04 | 9,84E+03 | 3,85E+03 | 1,72E+03 | 62,1 | 63,3 | 66,2 | 64,6 |
| 51 | 2,83E+04 | 9,98E+03 | 3,90E+03 | 1,75E+03 | 62,2 | 63,4 | 66,2 | 64,6 |
| 52 | 2,87E+04 | 1,01E+04 | 3,95E+03 | 1,77E+03 | 62,2 | 63,4 | 66,3 | 64,5 |
| 53 | 2,91E+04 | 1,02E+04 | 4,00E+03 | 1,80E+03 | 62,2 | 63,4 | 66,3 | 64,5 |
| 54 | 2,95E+04 | 1,04E+04 | 4,05E+03 | 1,83E+03 | 62,2 | 63,4 | 66,4 | 64,4 |
| 55 | 2,98E+04 | 1,05E+04 | 4,10E+03 | 1,86E+03 | 62,2 | 63,5 | 66,4 | 64,3 |
| 56 | 3,02E+04 | 1,06E+04 | 4,15E+03 | 1,88E+03 | 62,2 | 63,5 | 66,5 | 64,2 |
| 57 | 3,06E+04 | 1,07E+04 | 4,21E+03 | 1,91E+03 | 62,3 | 63,5 | 66,6 | 64,2 |
| 58 | 3,10E+04 | 1,09E+04 | 4,26E+03 | 1,94E+03 | 62,3 | 63,6 | 66,5 | 64,0 |
| 59 | 3,13E+04 | 1,10E+04 | 4,31E+03 | 1,97E+03 | 62,3 | 63,6 | 66,6 | 63,8 |
| 60 | 3,17E+04 | 1,11E+04 | 4,35E+03 | 1,98E+03 | 62,3 | 63,7 | 66,6 | 63,8 |
| 61 | 3,20E+04 | 1,12E+04 | 4,37E+03 | 1,99E+03 | 62,3 | 63,7 | 66,6 | 63,8 |
| 62 | 3,24E+04 | 1,13E+04 | 4,42E+03 | 2,02E+03 | 62,3 | 63,8 | 66,7 | 63,5 |
| 63 | 3,28E+04 | 1,14E+04 | 4,47E+03 | 2,04E+03 | 62,4 | 63,8 | 66,8 | 63,5 |
| 64 | 3,31E+04 | 1,15E+04 | 4,51E+03 | 2,07E+03 | 62,4 | 63,8 | 66,8 | 63,4 |
| 65 | 3,35E+04 | 1,16E+04 | 4,56E+03 | 2,09E+03 | 62,4 | 63,9 | 66,8 | 63,4 |
| 66 | 3,38E+04 | 1,17E+04 | 4,61E+03 | 2,12E+03 | 62,4 | 63,9 | 66,9 | 63,2 |
| 67 | 3,42E+04 | 1,18E+04 | 4,66E+03 | 2,14E+03 | 62,4 | 64,0 | 67,0 | 63,1 |

|     |          |          |          |          |      |      |      |      |
|-----|----------|----------|----------|----------|------|------|------|------|
| 68  | 3,45E+04 | 1,19E+04 | 4,70E+03 | 2,17E+03 | 62,4 | 64,0 | 67,0 | 63,3 |
| 69  | 3,48E+04 | 1,20E+04 | 4,75E+03 | 2,19E+03 | 62,5 | 64,0 | 67,0 | 63,1 |
| 70  | 3,52E+04 | 1,21E+04 | 4,79E+03 | 2,22E+03 | 62,5 | 64,1 | 67,1 | 63,0 |
| 71  | 3,55E+04 | 1,22E+04 | 4,84E+03 | 2,24E+03 | 62,5 | 64,1 | 67,2 | 63,0 |
| 72  | 3,59E+04 | 1,23E+04 | 4,88E+03 | 2,27E+03 | 62,5 | 64,2 | 67,2 | 62,9 |
| 73  | 3,62E+04 | 1,25E+04 | 4,93E+03 | 2,29E+03 | 62,5 | 64,2 | 67,3 | 62,8 |
| 74  | 3,65E+04 | 1,26E+04 | 4,97E+03 | 2,32E+03 | 62,5 | 64,2 | 67,4 | 62,7 |
| 75  | 3,69E+04 | 1,27E+04 | 5,01E+03 | 2,34E+03 | 62,5 | 64,3 | 67,4 | 62,7 |
| 76  | 3,72E+04 | 1,28E+04 | 5,06E+03 | 2,37E+03 | 62,6 | 64,3 | 67,5 | 62,5 |
| 77  | 3,75E+04 | 1,29E+04 | 5,10E+03 | 2,39E+03 | 62,6 | 64,3 | 67,5 | 62,5 |
| 78  | 3,78E+04 | 1,30E+04 | 5,15E+03 | 2,42E+03 | 62,6 | 64,4 | 67,6 | 62,4 |
| 79  | 3,82E+04 | 1,31E+04 | 5,19E+03 | 2,44E+03 | 62,6 | 64,4 | 67,7 | 62,3 |
| 80  | 3,85E+04 | 1,32E+04 | 5,23E+03 | 2,47E+03 | 62,6 | 64,5 | 67,7 | 62,2 |
| 81  | 3,88E+04 | 1,33E+04 | 5,27E+03 | 2,50E+03 | 62,6 | 64,5 | 67,8 | 62,3 |
| 82  | 3,91E+04 | 1,34E+04 | 5,32E+03 | 2,52E+03 | 62,6 | 64,6 | 67,8 | 62,1 |
| 83  | 3,95E+04 | 1,35E+04 | 5,36E+03 | 2,55E+03 | 62,6 | 64,6 | 67,9 | 62,1 |
| 84  | 3,98E+04 | 1,36E+04 | 5,40E+03 | 2,57E+03 | 62,7 | 64,6 | 68,0 | 61,9 |
| 85  | 4,01E+04 | 1,37E+04 | 5,44E+03 | 2,59E+03 | 62,7 | 64,7 | 68,0 | 62,0 |
| 86  | 4,04E+04 | 1,38E+04 | 5,49E+03 | 2,62E+03 | 62,7 | 64,7 | 68,0 | 61,9 |
| 87  | 4,07E+04 | 1,39E+04 | 5,53E+03 | 2,64E+03 | 62,7 | 64,8 | 68,2 | 61,8 |
| 88  | 4,11E+04 | 1,40E+04 | 5,57E+03 | 2,67E+03 | 62,7 | 64,8 | 68,2 | 61,8 |
| 89  | 4,14E+04 | 1,41E+04 | 5,61E+03 | 2,70E+03 | 62,7 | 64,9 | 68,3 | 61,7 |
| 90  | 4,17E+04 | 1,42E+04 | 5,65E+03 | 2,72E+03 | 62,7 | 64,9 | 68,3 | 61,6 |
| 91  | 4,20E+04 | 1,43E+04 | 5,69E+03 | 2,75E+03 | 62,7 | 64,9 | 68,5 | 61,6 |
| 92  | 4,24E+04 | 1,44E+04 | 5,73E+03 | 2,77E+03 | 62,8 | 65,0 | 68,5 | 61,6 |
| 93  | 4,27E+04 | 1,46E+04 | 5,77E+03 | 2,79E+03 | 62,8 | 65,0 | 68,6 | 61,4 |
| 94  | 4,30E+04 | 1,47E+04 | 5,82E+03 | 2,82E+03 | 62,8 | 65,1 | 68,6 | 61,5 |
| 95  | 4,33E+04 | 1,48E+04 | 5,85E+03 | 2,84E+03 | 62,8 | 65,1 | 68,8 | 61,4 |
| 96  | 4,36E+04 | 1,49E+04 | 5,89E+03 | 2,86E+03 | 62,8 | 65,2 | 68,8 | 61,2 |
| 97  | 4,40E+04 | 1,50E+04 | 5,94E+03 | 2,89E+03 | 62,8 | 65,2 | 68,9 | 61,4 |
| 98  | 4,43E+04 | 1,51E+04 | 5,97E+03 | 2,91E+03 | 62,8 | 65,2 | 68,9 | 61,2 |
| 99  | 4,46E+04 | 1,52E+04 | 6,02E+03 | 2,94E+03 | 62,8 | 65,3 | 69,0 | 61,1 |
| 100 | 4,49E+04 | 1,53E+04 | 6,04E+03 | 2,97E+03 | 62,8 | 65,3 | 69,1 | 61,2 |

**Tabela B 2-** Módulo dinâmico e ângulo de fase para o ligante AB-P condição envelhecida.

| Frequência de ensaio $\omega$ (rad/s) | Temperatura de ensaio (°C) |          |          |          | Temperatura de ensaio (°C) |      |      |      |
|---------------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------------------------|------|------|------|
|                                       | 52                         | 64       | 76       | 88       | 52                         | 64   | 76   | 88   |
|                                       | AB-P                       |          |          |          |                            |      |      |      |
|                                       | G*  (Pa)                   |          |          |          | Ângulo de fase (°)         |      |      |      |
| 1                                     | 3,82E+03                   | 8,59E+02 | 2,48E+02 | 7,31E+01 | 68,7                       | 73,8 | 77,6 | 78,3 |
| 2                                     | 6,44E+03                   | 1,51E+03 | 4,47E+02 | 1,32E+02 | 67,6                       | 72,1 | 75,2 | 79,2 |
| 3                                     | 8,71E+03                   | 2,08E+03 | 6,33E+02 | 1,90E+02 | 67,2                       | 71,2 | 74,7 | 77,8 |

|    |          |          |          |          |      |      |      |      |
|----|----------|----------|----------|----------|------|------|------|------|
| 4  | 1,08E+04 | 2,62E+03 | 8,02E+02 | 2,41E+02 | 66,9 | 70,5 | 74,2 | 77,7 |
| 5  | 1,27E+04 | 3,11E+03 | 9,61E+02 | 3,00E+02 | 66,7 | 70,2 | 73,7 | 77,7 |
| 6  | 1,45E+04 | 3,59E+03 | 1,11E+03 | 3,45E+02 | 66,6 | 69,9 | 73,5 | 76,8 |
| 7  | 1,63E+04 | 4,04E+03 | 1,26E+03 | 3,94E+02 | 66,5 | 69,6 | 73,1 | 77,1 |
| 8  | 1,79E+04 | 4,48E+03 | 1,40E+03 | 4,41E+02 | 66,5 | 69,4 | 72,8 | 77,0 |
| 9  | 1,96E+04 | 4,90E+03 | 1,54E+03 | 4,91E+02 | 66,4 | 69,3 | 72,6 | 76,6 |
| 10 | 2,11E+04 | 5,32E+03 | 1,68E+03 | 5,32E+02 | 66,4 | 69,2 | 72,4 | 76,4 |
| 11 | 2,27E+04 | 5,72E+03 | 1,80E+03 | 5,78E+02 | 66,3 | 69,0 | 72,2 | 76,2 |
| 12 | 2,42E+04 | 6,11E+03 | 1,94E+03 | 6,24E+02 | 66,3 | 68,9 | 72,1 | 75,9 |
| 13 | 2,56E+04 | 6,49E+03 | 2,06E+03 | 6,67E+02 | 66,3 | 68,8 | 71,9 | 75,7 |
| 14 | 2,70E+04 | 6,86E+03 | 2,18E+03 | 7,08E+02 | 66,3 | 68,8 | 71,9 | 75,9 |
| 15 | 2,84E+04 | 7,23E+03 | 2,31E+03 | 7,51E+02 | 66,2 | 68,7 | 71,7 | 75,6 |
| 16 | 2,98E+04 | 7,60E+03 | 2,43E+03 | 7,98E+02 | 66,2 | 68,6 | 71,6 | 75,4 |
| 17 | 3,12E+04 | 7,95E+03 | 2,54E+03 | 8,35E+02 | 66,2 | 68,5 | 71,5 | 75,6 |
| 18 | 3,25E+04 | 8,30E+03 | 2,66E+03 | 8,78E+02 | 66,2 | 68,5 | 71,4 | 75,5 |
| 19 | 3,38E+04 | 8,65E+03 | 2,77E+03 | 9,16E+02 | 66,2 | 68,5 | 71,4 | 75,3 |
| 20 | 3,51E+04 | 8,98E+03 | 2,88E+03 | 9,58E+02 | 66,2 | 68,4 | 71,3 | 75,4 |
| 21 | 3,63E+04 | 9,32E+03 | 2,99E+03 | 9,97E+02 | 66,2 | 68,4 | 71,3 | 75,2 |
| 22 | 3,76E+04 | 9,65E+03 | 3,10E+03 | 1,03E+03 | 66,2 | 68,3 | 71,2 | 75,1 |
| 23 | 3,88E+04 | 9,97E+03 | 3,21E+03 | 1,07E+03 | 66,2 | 68,3 | 71,2 | 75,1 |
| 24 | 4,00E+04 | 1,03E+04 | 3,31E+03 | 1,11E+03 | 66,2 | 68,3 | 71,2 | 75,0 |
| 25 | 4,12E+04 | 1,06E+04 | 3,42E+03 | 1,15E+03 | 66,1 | 68,2 | 71,2 | 75,1 |
| 26 | 4,24E+04 | 1,09E+04 | 3,52E+03 | 1,18E+03 | 66,1 | 68,2 | 71,1 | 75,0 |
| 27 | 4,36E+04 | 1,12E+04 | 3,62E+03 | 1,22E+03 | 66,1 | 68,2 | 71,2 | 74,9 |
| 28 | 4,47E+04 | 1,15E+04 | 3,72E+03 | 1,26E+03 | 66,1 | 68,2 | 71,1 | 74,9 |
| 29 | 4,59E+04 | 1,18E+04 | 3,82E+03 | 1,30E+03 | 66,1 | 68,2 | 71,1 | 74,9 |
| 30 | 4,70E+04 | 1,21E+04 | 3,93E+03 | 1,34E+03 | 66,1 | 68,2 | 71,1 | 74,8 |
| 31 | 4,81E+04 | 1,24E+04 | 4,02E+03 | 1,37E+03 | 66,1 | 68,1 | 71,1 | 74,8 |
| 32 | 4,93E+04 | 1,27E+04 | 4,12E+03 | 1,40E+03 | 66,1 | 68,1 | 71,1 | 74,7 |
| 33 | 5,03E+04 | 1,30E+04 | 4,22E+03 | 1,44E+03 | 66,1 | 68,1 | 71,1 | 74,7 |
| 34 | 5,14E+04 | 1,33E+04 | 4,32E+03 | 1,48E+03 | 66,1 | 68,1 | 71,1 | 74,7 |
| 35 | 5,25E+04 | 1,36E+04 | 4,41E+03 | 1,51E+03 | 66,1 | 68,1 | 71,1 | 74,6 |
| 36 | 5,37E+04 | 1,39E+04 | 4,51E+03 | 1,54E+03 | 66,1 | 68,1 | 71,1 | 74,6 |
| 37 | 5,46E+04 | 1,42E+04 | 4,60E+03 | 1,58E+03 | 66,1 | 68,1 | 71,1 | 74,7 |
| 38 | 5,57E+04 | 1,44E+04 | 4,70E+03 | 1,61E+03 | 66,1 | 68,1 | 71,1 | 74,6 |
| 39 | 5,68E+04 | 1,47E+04 | 4,79E+03 | 1,65E+03 | 66,1 | 68,1 | 71,2 | 74,7 |
| 40 | 5,78E+04 | 1,50E+04 | 4,88E+03 | 1,68E+03 | 66,1 | 68,1 | 71,1 | 74,6 |
| 41 | 5,89E+04 | 1,53E+04 | 4,97E+03 | 1,72E+03 | 66,1 | 68,0 | 71,1 | 74,6 |
| 42 | 6,00E+04 | 1,55E+04 | 5,07E+03 | 1,75E+03 | 66,1 | 68,0 | 71,2 | 74,6 |
| 43 | 6,10E+04 | 1,58E+04 | 5,16E+03 | 1,78E+03 | 66,0 | 68,0 | 71,2 | 74,6 |
| 44 | 6,19E+04 | 1,61E+04 | 5,25E+03 | 1,82E+03 | 66,1 | 68,1 | 71,2 | 74,6 |

|    |          |          |          |          |      |      |      |      |
|----|----------|----------|----------|----------|------|------|------|------|
| 45 | 6,30E+04 | 1,63E+04 | 5,34E+03 | 1,85E+03 | 66,1 | 68,1 | 71,2 | 74,6 |
| 46 | 6,40E+04 | 1,66E+04 | 5,43E+03 | 1,89E+03 | 66,0 | 68,1 | 71,2 | 74,7 |
| 47 | 6,50E+04 | 1,69E+04 | 5,51E+03 | 1,92E+03 | 66,1 | 68,0 | 71,3 | 74,6 |
| 48 | 6,60E+04 | 1,71E+04 | 5,60E+03 | 1,95E+03 | 66,0 | 68,1 | 71,3 | 74,6 |
| 49 | 6,70E+04 | 1,74E+04 | 5,69E+03 | 1,98E+03 | 66,0 | 68,1 | 71,3 | 74,6 |
| 50 | 6,80E+04 | 1,76E+04 | 5,78E+03 | 2,02E+03 | 66,0 | 68,1 | 71,3 | 74,7 |
| 51 | 6,90E+04 | 1,79E+04 | 5,87E+03 | 2,05E+03 | 66,0 | 68,1 | 71,4 | 74,6 |
| 52 | 7,00E+04 | 1,81E+04 | 5,95E+03 | 2,08E+03 | 66,0 | 68,1 | 71,4 | 74,8 |
| 53 | 7,10E+04 | 1,84E+04 | 6,04E+03 | 2,12E+03 | 66,0 | 68,1 | 71,4 | 74,6 |
| 54 | 7,19E+04 | 1,86E+04 | 6,13E+03 | 2,15E+03 | 66,0 | 68,1 | 71,5 | 74,7 |
| 55 | 7,29E+04 | 1,89E+04 | 6,21E+03 | 2,18E+03 | 66,0 | 68,1 | 71,5 | 74,8 |
| 56 | 7,39E+04 | 1,91E+04 | 6,30E+03 | 2,21E+03 | 66,0 | 68,1 | 71,5 | 74,7 |
| 57 | 7,48E+04 | 1,94E+04 | 6,38E+03 | 2,24E+03 | 66,0 | 68,1 | 71,6 | 74,7 |
| 58 | 7,58E+04 | 1,96E+04 | 6,47E+03 | 2,28E+03 | 66,0 | 68,1 | 71,6 | 74,7 |
| 59 | 7,68E+04 | 1,99E+04 | 6,55E+03 | 2,29E+03 | 66,0 | 68,1 | 71,7 | 75,0 |
| 60 | 7,77E+04 | 2,01E+04 | 6,62E+03 | 2,32E+03 | 66,0 | 68,1 | 71,8 | 74,9 |
| 61 | 7,87E+04 | 2,04E+04 | 6,69E+03 | 2,33E+03 | 66,0 | 68,1 | 71,8 | 74,9 |
| 62 | 7,96E+04 | 2,06E+04 | 6,77E+03 | 2,37E+03 | 65,9 | 68,1 | 71,8 | 74,9 |
| 63 | 8,07E+04 | 2,09E+04 | 6,85E+03 | 2,39E+03 | 65,9 | 68,2 | 71,9 | 75,0 |
| 64 | 8,16E+04 | 2,11E+04 | 6,93E+03 | 2,42E+03 | 66,0 | 68,1 | 71,9 | 75,0 |
| 65 | 8,26E+04 | 2,14E+04 | 7,01E+03 | 2,46E+03 | 65,9 | 68,1 | 71,9 | 75,0 |
| 66 | 8,35E+04 | 2,16E+04 | 7,09E+03 | 2,48E+03 | 65,9 | 68,1 | 72,0 | 75,1 |
| 67 | 8,45E+04 | 2,19E+04 | 7,17E+03 | 2,51E+03 | 65,9 | 68,1 | 72,0 | 75,2 |
| 68 | 8,54E+04 | 2,21E+04 | 7,24E+03 | 2,54E+03 | 65,9 | 68,2 | 72,1 | 75,0 |
| 69 | 8,63E+04 | 2,24E+04 | 7,32E+03 | 2,57E+03 | 65,9 | 68,2 | 72,1 | 75,2 |
| 70 | 8,73E+04 | 2,26E+04 | 7,40E+03 | 2,60E+03 | 65,9 | 68,2 | 72,2 | 75,2 |
| 71 | 8,83E+04 | 2,29E+04 | 7,47E+03 | 2,63E+03 | 65,9 | 68,2 | 72,2 | 75,2 |
| 72 | 8,92E+04 | 2,31E+04 | 7,55E+03 | 2,66E+03 | 65,9 | 68,2 | 72,3 | 75,2 |
| 73 | 9,01E+04 | 2,33E+04 | 7,63E+03 | 2,69E+03 | 65,9 | 68,2 | 72,3 | 75,3 |
| 74 | 9,11E+04 | 2,36E+04 | 7,70E+03 | 2,71E+03 | 65,9 | 68,2 | 72,3 | 75,4 |
| 75 | 9,21E+04 | 2,38E+04 | 7,78E+03 | 2,74E+03 | 65,9 | 68,2 | 72,4 | 75,3 |
| 76 | 9,30E+04 | 2,41E+04 | 7,85E+03 | 2,77E+03 | 65,9 | 68,2 | 72,5 | 75,3 |
| 77 | 9,39E+04 | 2,43E+04 | 7,93E+03 | 2,80E+03 | 65,8 | 68,2 | 72,5 | 75,3 |
| 78 | 9,48E+04 | 2,45E+04 | 8,01E+03 | 2,83E+03 | 65,9 | 68,2 | 72,6 | 75,2 |
| 79 | 9,58E+04 | 2,48E+04 | 8,08E+03 | 2,86E+03 | 65,8 | 68,2 | 72,6 | 75,4 |
| 80 | 9,67E+04 | 2,50E+04 | 8,15E+03 | 2,89E+03 | 65,8 | 68,2 | 72,7 | 75,4 |
| 81 | 9,76E+04 | 2,53E+04 | 8,22E+03 | 2,91E+03 | 65,8 | 68,2 | 72,7 | 75,5 |
| 82 | 9,85E+04 | 2,55E+04 | 8,30E+03 | 2,94E+03 | 65,8 | 68,2 | 72,7 | 75,5 |
| 83 | 9,94E+04 | 2,57E+04 | 8,38E+03 | 2,97E+03 | 65,8 | 68,2 | 72,8 | 75,6 |
| 84 | 1,00E+05 | 2,60E+04 | 8,45E+03 | 3,00E+03 | 65,8 | 68,2 | 72,9 | 75,7 |
| 85 | 1,01E+05 | 2,62E+04 | 8,52E+03 | 3,02E+03 | 65,8 | 68,2 | 72,9 | 75,6 |

|     |          |          |          |          |      |      |      |      |
|-----|----------|----------|----------|----------|------|------|------|------|
| 86  | 1,02E+05 | 2,64E+04 | 8,59E+03 | 3,05E+03 | 65,8 | 68,2 | 73,0 | 75,7 |
| 87  | 1,03E+05 | 2,67E+04 | 8,67E+03 | 3,08E+03 | 65,8 | 68,2 | 73,0 | 75,7 |
| 88  | 1,04E+05 | 2,69E+04 | 8,74E+03 | 3,11E+03 | 65,7 | 68,3 | 73,1 | 75,8 |
| 89  | 1,05E+05 | 2,71E+04 | 8,81E+03 | 3,13E+03 | 65,8 | 68,3 | 73,2 | 75,6 |
| 90  | 1,06E+05 | 2,73E+04 | 8,88E+03 | 3,16E+03 | 65,8 | 68,3 | 73,2 | 75,9 |
| 91  | 1,06E+05 | 2,76E+04 | 8,95E+03 | 3,18E+03 | 65,8 | 68,3 | 73,3 | 76,1 |
| 92  | 1,07E+05 | 2,78E+04 | 9,03E+03 | 3,22E+03 | 65,8 | 68,3 | 73,3 | 76,1 |
| 93  | 1,08E+05 | 2,80E+04 | 9,10E+03 | 3,25E+03 | 65,8 | 68,3 | 73,4 | 76,1 |
| 94  | 1,09E+05 | 2,82E+04 | 9,16E+03 | 3,27E+03 | 65,7 | 68,3 | 73,4 | 76,0 |
| 95  | 1,10E+05 | 2,85E+04 | 9,24E+03 | 3,30E+03 | 65,7 | 68,3 | 73,5 | 76,1 |
| 96  | 1,11E+05 | 2,87E+04 | 9,31E+03 | 3,32E+03 | 65,7 | 68,3 | 73,6 | 76,2 |
| 97  | 1,12E+05 | 2,89E+04 | 9,38E+03 | 3,35E+03 | 65,7 | 68,3 | 73,6 | 76,3 |
| 98  | 1,13E+05 | 2,91E+04 | 9,45E+03 | 3,38E+03 | 65,7 | 68,3 | 73,7 | 76,1 |
| 99  | 1,13E+05 | 2,93E+04 | 9,52E+03 | 3,40E+03 | 65,7 | 68,3 | 73,7 | 76,2 |
| 100 | 1,14E+05 | 2,96E+04 | 9,58E+03 | 3,43E+03 | 65,7 | 68,3 | 73,8 | 76,2 |

**Tabela B 3-** Módulo dinâmico e ângulo de fase para o ligante AB-R25 condição envelhecida.

| Frequência de ensaio $\omega$ (rad/s) | Temperatura de ensaio (°C) |          |          |          | Temperatura de ensaio (°C) |      |      |      |
|---------------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------------------------|------|------|------|
|                                       | 52                         | 64       | 76       | 88       | 52                         | 64   | 76   | 88   |
|                                       | AB-R25                     |          |          |          |                            |      |      |      |
|                                       | G*  (Pa)                   |          |          |          | Ângulo de fase (°)         |      |      |      |
| 1                                     | 1,15E+03                   | 2,63E+02 | 6,91E+01 | 2,44E+01 | 74,5                       | 79,5 | 81,8 | 76,0 |
| 2                                     | 2,03E+03                   | 4,85E+02 | 1,34E+02 | 4,47E+01 | 73,0                       | 77,8 | 81,5 | 82,6 |
| 3                                     | 2,81E+03                   | 6,89E+02 | 1,93E+02 | 6,41E+01 | 72,1                       | 77,1 | 80,3 | 81,5 |
| 4                                     | 3,52E+03                   | 8,77E+02 | 2,49E+02 | 8,28E+01 | 71,5                       | 76,2 | 79,9 | 80,3 |
| 5                                     | 4,20E+03                   | 1,06E+03 | 3,03E+02 | 1,01E+02 | 71,2                       | 75,9 | 79,6 | 81,9 |
| 6                                     | 4,85E+03                   | 1,23E+03 | 3,59E+02 | 1,22E+02 | 71,0                       | 75,5 | 78,9 | 82,8 |
| 7                                     | 5,47E+03                   | 1,40E+03 | 4,07E+02 | 1,38E+02 | 70,8                       | 75,1 | 78,3 | 81,0 |
| 8                                     | 6,07E+03                   | 1,57E+03 | 4,63E+02 | 1,54E+02 | 70,6                       | 74,7 | 78,3 | 80,8 |
| 9                                     | 6,65E+03                   | 1,73E+03 | 5,10E+02 | 1,71E+02 | 70,5                       | 74,4 | 77,8 | 80,0 |
| 10                                    | 7,21E+03                   | 1,88E+03 | 5,57E+02 | 1,92E+02 | 70,4                       | 74,3 | 77,6 | 78,9 |
| 11                                    | 7,76E+03                   | 2,03E+03 | 6,07E+02 | 2,07E+02 | 70,3                       | 74,1 | 77,2 | 79,9 |
| 12                                    | 8,31E+03                   | 2,19E+03 | 6,55E+02 | 2,26E+02 | 70,2                       | 73,9 | 77,2 | 80,1 |
| 13                                    | 8,83E+03                   | 2,33E+03 | 7,04E+02 | 2,42E+02 | 70,2                       | 73,8 | 76,8 | 79,3 |
| 14                                    | 9,35E+03                   | 2,48E+03 | 7,50E+02 | 2,61E+02 | 70,1                       | 73,7 | 76,5 | 78,8 |
| 15                                    | 9,86E+03                   | 2,62E+03 | 7,95E+02 | 2,76E+02 | 70,1                       | 73,5 | 76,1 | 78,3 |
| 16                                    | 1,04E+04                   | 2,76E+03 | 8,41E+02 | 2,93E+02 | 70,0                       | 73,4 | 76,0 | 78,6 |
| 17                                    | 1,09E+04                   | 2,90E+03 | 8,85E+02 | 3,09E+02 | 70,0                       | 73,3 | 75,7 | 78,7 |
| 18                                    | 1,13E+04                   | 3,03E+03 | 9,31E+02 | 3,26E+02 | 70,0                       | 73,3 | 75,5 | 78,0 |
| 19                                    | 1,18E+04                   | 3,17E+03 | 9,73E+02 | 3,42E+02 | 69,9                       | 73,3 | 75,2 | 78,1 |
| 20                                    | 1,23E+04                   | 3,30E+03 | 1,02E+03 | 3,55E+02 | 69,9                       | 73,2 | 75,1 | 77,6 |

|    |          |          |          |          |      |      |      |      |
|----|----------|----------|----------|----------|------|------|------|------|
| 21 | 1,28E+04 | 3,44E+03 | 1,06E+03 | 3,74E+02 | 69,9 | 73,1 | 74,9 | 77,0 |
| 22 | 1,32E+04 | 3,57E+03 | 1,10E+03 | 3,92E+02 | 69,9 | 73,1 | 74,6 | 76,8 |
| 23 | 1,37E+04 | 3,70E+03 | 1,15E+03 | 4,07E+02 | 69,9 | 73,0 | 74,5 | 76,8 |
| 24 | 1,41E+04 | 3,83E+03 | 1,19E+03 | 4,24E+02 | 69,9 | 73,0 | 74,4 | 76,5 |
| 25 | 1,46E+04 | 3,95E+03 | 1,23E+03 | 4,38E+02 | 69,8 | 73,0 | 74,3 | 76,4 |
| 26 | 1,50E+04 | 4,08E+03 | 1,28E+03 | 4,56E+02 | 69,9 | 73,0 | 74,1 | 76,1 |
| 27 | 1,55E+04 | 4,21E+03 | 1,32E+03 | 4,72E+02 | 69,8 | 72,9 | 73,8 | 75,9 |
| 28 | 1,59E+04 | 4,33E+03 | 1,36E+03 | 4,87E+02 | 69,8 | 72,9 | 73,6 | 75,6 |
| 29 | 1,63E+04 | 4,46E+03 | 1,40E+03 | 5,02E+02 | 69,8 | 72,9 | 73,5 | 75,6 |
| 30 | 1,68E+04 | 4,58E+03 | 1,44E+03 | 5,18E+02 | 69,9 | 72,9 | 73,3 | 75,4 |
| 31 | 1,72E+04 | 4,70E+03 | 1,48E+03 | 5,37E+02 | 69,8 | 72,9 | 73,2 | 75,1 |
| 32 | 1,76E+04 | 4,82E+03 | 1,52E+03 | 5,49E+02 | 69,9 | 72,9 | 73,0 | 75,1 |
| 33 | 1,80E+04 | 4,94E+03 | 1,56E+03 | 5,65E+02 | 69,9 | 72,9 | 72,9 | 74,8 |
| 34 | 1,84E+04 | 5,06E+03 | 1,61E+03 | 5,82E+02 | 69,9 | 72,9 | 72,8 | 74,5 |
| 35 | 1,89E+04 | 5,18E+03 | 1,64E+03 | 5,99E+02 | 69,9 | 72,9 | 72,6 | 74,4 |
| 36 | 1,93E+04 | 5,29E+03 | 1,69E+03 | 6,14E+02 | 69,9 | 72,9 | 72,5 | 74,0 |
| 37 | 1,97E+04 | 5,41E+03 | 1,73E+03 | 6,30E+02 | 69,9 | 72,9 | 72,4 | 73,9 |
| 38 | 2,01E+04 | 5,53E+03 | 1,77E+03 | 6,45E+02 | 69,9 | 72,9 | 72,3 | 73,8 |
| 39 | 2,05E+04 | 5,64E+03 | 1,81E+03 | 6,60E+02 | 69,9 | 72,9 | 72,0 | 73,5 |
| 40 | 2,09E+04 | 5,76E+03 | 1,85E+03 | 6,75E+02 | 69,9 | 72,9 | 72,0 | 73,3 |
| 41 | 2,13E+04 | 5,87E+03 | 1,88E+03 | 6,91E+02 | 69,9 | 72,9 | 71,8 | 73,0 |
| 42 | 2,17E+04 | 5,98E+03 | 1,93E+03 | 7,06E+02 | 70,0 | 73,0 | 71,7 | 72,9 |
| 43 | 2,21E+04 | 6,09E+03 | 1,96E+03 | 7,22E+02 | 70,0 | 73,0 | 71,6 | 72,5 |
| 44 | 2,24E+04 | 6,20E+03 | 2,00E+03 | 7,40E+02 | 70,0 | 73,0 | 71,4 | 72,6 |
| 45 | 2,28E+04 | 6,31E+03 | 2,04E+03 | 7,52E+02 | 70,0 | 73,0 | 71,4 | 72,5 |
| 46 | 2,32E+04 | 6,42E+03 | 2,08E+03 | 7,68E+02 | 70,0 | 73,0 | 71,2 | 72,3 |
| 47 | 2,36E+04 | 6,53E+03 | 2,12E+03 | 7,84E+02 | 70,0 | 73,0 | 71,1 | 72,0 |
| 48 | 2,40E+04 | 6,64E+03 | 2,16E+03 | 8,00E+02 | 70,0 | 73,1 | 71,0 | 71,8 |
| 49 | 2,44E+04 | 6,75E+03 | 2,20E+03 | 8,11E+02 | 70,0 | 73,1 | 70,8 | 71,9 |
| 50 | 2,47E+04 | 6,85E+03 | 2,24E+03 | 8,34E+02 | 70,0 | 73,1 | 70,7 | 71,5 |
| 51 | 2,51E+04 | 6,95E+03 | 2,28E+03 | 8,49E+02 | 70,0 | 73,2 | 70,6 | 71,3 |
| 52 | 2,55E+04 | 7,05E+03 | 2,32E+03 | 8,64E+02 | 70,0 | 73,2 | 70,5 | 71,4 |
| 53 | 2,59E+04 | 7,16E+03 | 2,36E+03 | 8,81E+02 | 70,1 | 73,2 | 70,3 | 71,0 |
| 54 | 2,62E+04 | 7,26E+03 | 2,39E+03 | 8,95E+02 | 70,1 | 73,3 | 70,2 | 70,9 |
| 55 | 2,66E+04 | 7,38E+03 | 2,43E+03 | 9,12E+02 | 70,1 | 73,2 | 70,1 | 70,9 |
| 56 | 2,70E+04 | 7,47E+03 | 2,47E+03 | 9,26E+02 | 70,1 | 73,3 | 70,0 | 70,5 |
| 57 | 2,73E+04 | 7,57E+03 | 2,51E+03 | 9,44E+02 | 70,1 | 73,3 | 69,8 | 70,6 |
| 58 | 2,77E+04 | 7,67E+03 | 2,55E+03 | 9,58E+02 | 70,1 | 73,4 | 69,7 | 70,3 |
| 59 | 2,81E+04 | 7,77E+03 | 2,58E+03 | 9,53E+02 | 70,1 | 73,4 | 69,6 | 70,0 |
| 60 | 2,84E+04 | 7,84E+03 | 2,62E+03 | 9,58E+02 | 70,1 | 73,5 | 69,6 | 69,5 |
| 61 | 2,88E+04 | 7,94E+03 | 2,63E+03 | 9,73E+02 | 70,1 | 73,6 | 69,5 | 69,6 |
| 62 | 2,92E+04 | 8,03E+03 | 2,67E+03 | 9,87E+02 | 70,2 | 73,6 | 69,3 | 69,3 |
| 63 | 2,95E+04 | 8,13E+03 | 2,71E+03 | 1,00E+03 | 70,2 | 73,6 | 69,2 | 68,9 |
| 64 | 2,99E+04 | 8,22E+03 | 2,74E+03 | 1,01E+03 | 70,2 | 73,7 | 69,0 | 69,0 |
| 65 | 3,02E+04 | 8,32E+03 | 2,78E+03 | 1,03E+03 | 70,2 | 73,7 | 68,9 | 68,8 |

|     |          |          |          |          |      |      |      |      |
|-----|----------|----------|----------|----------|------|------|------|------|
| 66  | 3,06E+04 | 8,42E+03 | 2,81E+03 | 1,05E+03 | 70,2 | 73,8 | 68,8 | 68,5 |
| 67  | 3,09E+04 | 8,51E+03 | 2,85E+03 | 1,06E+03 | 70,2 | 73,8 | 68,8 | 68,5 |
| 68  | 3,13E+04 | 8,60E+03 | 2,89E+03 | 1,07E+03 | 70,2 | 73,8 | 68,5 | 68,2 |
| 69  | 3,17E+04 | 8,69E+03 | 2,93E+03 | 1,09E+03 | 70,2 | 73,9 | 68,5 | 68,2 |
| 70  | 3,20E+04 | 8,79E+03 | 2,96E+03 | 1,10E+03 | 70,2 | 73,9 | 68,4 | 67,9 |
| 71  | 3,24E+04 | 8,88E+03 | 3,00E+03 | 1,12E+03 | 70,3 | 73,9 | 68,4 | 67,6 |
| 72  | 3,27E+04 | 8,97E+03 | 3,04E+03 | 1,13E+03 | 70,3 | 74,0 | 68,2 | 67,5 |
| 73  | 3,31E+04 | 9,06E+03 | 3,07E+03 | 1,14E+03 | 70,3 | 74,0 | 68,1 | 67,4 |
| 74  | 3,34E+04 | 9,15E+03 | 3,11E+03 | 1,16E+03 | 70,3 | 74,1 | 67,9 | 67,4 |
| 75  | 3,38E+04 | 9,24E+03 | 3,14E+03 | 1,17E+03 | 70,3 | 74,1 | 67,9 | 67,1 |
| 76  | 3,41E+04 | 9,34E+03 | 3,18E+03 | 1,18E+03 | 70,3 | 74,2 | 67,8 | 66,8 |
| 77  | 3,45E+04 | 9,43E+03 | 3,22E+03 | 1,20E+03 | 70,3 | 74,2 | 67,6 | 66,9 |
| 78  | 3,48E+04 | 9,52E+03 | 3,25E+03 | 1,22E+03 | 70,4 | 74,2 | 67,6 | 66,6 |
| 79  | 3,51E+04 | 9,61E+03 | 3,29E+03 | 1,23E+03 | 70,4 | 74,3 | 67,5 | 66,3 |
| 80  | 3,55E+04 | 9,70E+03 | 3,33E+03 | 1,25E+03 | 70,4 | 74,3 | 67,2 | 66,2 |
| 81  | 3,58E+04 | 9,79E+03 | 3,36E+03 | 1,26E+03 | 70,4 | 74,4 | 67,2 | 66,0 |
| 82  | 3,62E+04 | 9,88E+03 | 3,40E+03 | 1,27E+03 | 70,4 | 74,4 | 67,1 | 66,0 |
| 83  | 3,65E+04 | 9,97E+03 | 3,44E+03 | 1,29E+03 | 70,4 | 74,5 | 67,0 | 65,9 |
| 84  | 3,68E+04 | 1,01E+04 | 3,48E+03 | 1,30E+03 | 70,4 | 74,5 | 66,9 | 65,7 |
| 85  | 3,72E+04 | 1,02E+04 | 3,51E+03 | 1,32E+03 | 70,4 | 74,6 | 66,8 | 65,5 |
| 86  | 3,75E+04 | 1,02E+04 | 3,54E+03 | 1,33E+03 | 70,4 | 74,6 | 66,8 | 65,4 |
| 87  | 3,78E+04 | 1,03E+04 | 3,58E+03 | 1,34E+03 | 70,5 | 74,6 | 66,6 | 65,0 |
| 88  | 3,82E+04 | 1,04E+04 | 3,62E+03 | 1,36E+03 | 70,5 | 74,7 | 66,5 | 64,9 |
| 89  | 3,85E+04 | 1,05E+04 | 3,65E+03 | 1,37E+03 | 70,5 | 74,7 | 66,5 | 64,7 |
| 90  | 3,88E+04 | 1,06E+04 | 3,69E+03 | 1,39E+03 | 70,5 | 74,8 | 66,3 | 64,6 |
| 91  | 3,92E+04 | 1,07E+04 | 3,73E+03 | 1,40E+03 | 70,5 | 74,8 | 66,2 | 64,7 |
| 92  | 3,95E+04 | 1,08E+04 | 3,76E+03 | 1,42E+03 | 70,5 | 74,9 | 66,2 | 64,0 |
| 93  | 3,98E+04 | 1,09E+04 | 3,79E+03 | 1,43E+03 | 70,5 | 74,9 | 66,0 | 64,1 |
| 94  | 4,02E+04 | 1,09E+04 | 3,84E+03 | 1,44E+03 | 70,6 | 74,9 | 66,0 | 63,9 |
| 95  | 4,05E+04 | 1,10E+04 | 3,87E+03 | 1,46E+03 | 70,6 | 75,0 | 65,8 | 63,7 |
| 96  | 4,08E+04 | 1,11E+04 | 3,90E+03 | 1,47E+03 | 70,6 | 75,1 | 65,7 | 63,6 |
| 97  | 4,11E+04 | 1,12E+04 | 3,94E+03 | 1,48E+03 | 70,6 | 75,2 | 65,6 | 63,3 |
| 98  | 4,14E+04 | 1,13E+04 | 3,98E+03 | 1,50E+03 | 70,6 | 75,1 | 65,5 | 63,3 |
| 99  | 4,18E+04 | 1,14E+04 | 3,98E+03 | 1,52E+03 | 70,6 | 75,2 | 65,2 | 63,0 |
| 100 | 4,21E+04 | 1,15E+04 | 4,05E+03 | 1,53E+03 | 70,6 | 75,3 | 65,3 | 62,8 |

**Tabela B 4-** Módulo dinâmico e ângulo de fase para o ligante AB-R30 condição envelhecida.

| Frequência de ensaio $\omega$ (rad/s) | Temperatura de ensaio (°C) |          |          |          | Temperatura de ensaio (°C) |      |      |      |
|---------------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------------------------|------|------|------|
|                                       | 52                         | 64       | 76       | 88       | 52                         | 64   | 76   | 88   |
|                                       | AB-R30                     |          |          |          |                            |      |      |      |
|                                       | G*  (Pa)                   |          |          |          | Ângulo de fase (°)         |      |      |      |
| 1                                     | 1,81E+03                   | 5,25E+02 | 1,53E+02 | 5,80E+01 | 67,4                       | 71,4 | 71,7 | 64,4 |
| 2                                     | 3,00E+03                   | 9,08E+02 | 2,70E+02 | 1,02E+02 | 66,1                       | 70,6 | 72,8 | 69,7 |
| 3                                     | 4,02E+03                   | 1,24E+03 | 3,78E+02 | 1,41E+02 | 65,4                       | 69,5 | 72,8 | 69,6 |
| 4                                     | 4,94E+03                   | 1,55E+03 | 4,78E+02 | 1,84E+02 | 64,9                       | 69,0 | 72,7 | 70,1 |
| 5                                     | 5,79E+03                   | 1,83E+03 | 5,73E+02 | 2,21E+02 | 64,7                       | 68,3 | 72,9 | 70,8 |
| 6                                     | 6,60E+03                   | 2,10E+03 | 6,67E+02 | 2,53E+02 | 64,5                       | 68,1 | 72,6 | 70,4 |
| 7                                     | 7,36E+03                   | 2,36E+03 | 7,53E+02 | 2,88E+02 | 64,4                       | 67,7 | 71,9 | 71,1 |
| 8                                     | 8,09E+03                   | 2,60E+03 | 8,40E+02 | 3,22E+02 | 64,3                       | 67,4 | 72,0 | 71,5 |
| 9                                     | 8,80E+03                   | 2,84E+03 | 9,22E+02 | 3,58E+02 | 64,2                       | 67,2 | 71,8 | 71,7 |
| 10                                    | 9,48E+03                   | 3,07E+03 | 9,99E+02 | 3,91E+02 | 64,2                       | 67,0 | 71,7 | 71,9 |
| 11                                    | 1,02E+04                   | 3,29E+03 | 1,08E+03 | 4,22E+02 | 64,1                       | 66,9 | 71,5 | 71,8 |
| 12                                    | 1,08E+04                   | 3,50E+03 | 1,16E+03 | 4,51E+02 | 64,1                       | 66,7 | 71,4 | 71,0 |
| 13                                    | 1,14E+04                   | 3,71E+03 | 1,23E+03 | 4,80E+02 | 64,0                       | 66,5 | 71,3 | 72,0 |
| 14                                    | 1,21E+04                   | 3,92E+03 | 1,30E+03 | 5,17E+02 | 64,0                       | 66,4 | 71,2 | 71,7 |
| 15                                    | 1,27E+04                   | 4,11E+03 | 1,38E+03 | 5,44E+02 | 64,1                       | 66,3 | 70,9 | 71,8 |
| 16                                    | 1,33E+04                   | 4,31E+03 | 1,45E+03 | 5,73E+02 | 64,1                       | 66,3 | 71,2 | 72,1 |
| 17                                    | 1,39E+04                   | 4,50E+03 | 1,52E+03 | 6,03E+02 | 64,0                       | 66,2 | 71,0 | 71,8 |
| 18                                    | 1,45E+04                   | 4,69E+03 | 1,58E+03 | 6,34E+02 | 64,0                       | 66,1 | 70,8 | 72,2 |
| 19                                    | 1,51E+04                   | 4,87E+03 | 1,65E+03 | 6,62E+02 | 64,1                       | 66,0 | 70,9 | 72,1 |
| 20                                    | 1,56E+04                   | 5,04E+03 | 1,72E+03 | 6,89E+02 | 64,1                       | 66,0 | 70,8 | 72,0 |
| 21                                    | 1,62E+04                   | 5,22E+03 | 1,78E+03 | 7,15E+02 | 64,1                       | 65,9 | 70,7 | 72,3 |
| 22                                    | 1,68E+04                   | 5,38E+03 | 1,85E+03 | 7,45E+02 | 64,1                       | 65,9 | 70,6 | 72,3 |
| 23                                    | 1,73E+04                   | 5,55E+03 | 1,92E+03 | 7,72E+02 | 64,1                       | 65,8 | 70,8 | 72,4 |
| 24                                    | 1,79E+04                   | 5,71E+03 | 1,97E+03 | 8,01E+02 | 64,1                       | 65,8 | 70,5 | 72,5 |
| 25                                    | 1,85E+04                   | 5,87E+03 | 2,04E+03 | 8,25E+02 | 64,2                       | 65,7 | 70,8 | 72,3 |
| 26                                    | 1,90E+04                   | 6,03E+03 | 2,10E+03 | 8,53E+02 | 64,2                       | 65,7 | 70,8 | 72,5 |
| 27                                    | 1,96E+04                   | 6,19E+03 | 2,16E+03 | 8,80E+02 | 64,2                       | 65,7 | 70,6 | 72,6 |
| 28                                    | 2,01E+04                   | 6,34E+03 | 2,22E+03 | 9,07E+02 | 64,2                       | 65,6 | 70,9 | 72,8 |
| 29                                    | 2,06E+04                   | 6,50E+03 | 2,28E+03 | 9,31E+02 | 64,2                       | 65,6 | 70,7 | 72,5 |
| 30                                    | 2,12E+04                   | 6,65E+03 | 2,34E+03 | 9,60E+02 | 64,3                       | 65,6 | 70,7 | 72,9 |
| 31                                    | 2,17E+04                   | 6,81E+03 | 2,39E+03 | 9,83E+02 | 64,3                       | 65,5 | 70,8 | 72,8 |
| 32                                    | 2,22E+04                   | 6,97E+03 | 2,45E+03 | 1,01E+03 | 64,4                       | 65,5 | 70,8 | 72,9 |
| 33                                    | 2,27E+04                   | 7,13E+03 | 2,51E+03 | 1,04E+03 | 64,3                       | 65,5 | 70,7 | 73,1 |
| 34                                    | 2,32E+04                   | 7,28E+03 | 2,56E+03 | 1,06E+03 | 64,4                       | 65,5 | 71,0 | 73,0 |
| 35                                    | 2,37E+04                   | 7,44E+03 | 2,62E+03 | 1,09E+03 | 64,4                       | 65,5 | 71,1 | 73,2 |

|    |          |          |          |          |      |      |      |      |
|----|----------|----------|----------|----------|------|------|------|------|
| 36 | 2,42E+04 | 7,59E+03 | 2,67E+03 | 1,11E+03 | 64,4 | 65,4 | 70,8 | 73,4 |
| 37 | 2,47E+04 | 7,75E+03 | 2,73E+03 | 1,14E+03 | 64,4 | 65,4 | 71,4 | 73,3 |
| 38 | 2,52E+04 | 7,90E+03 | 2,79E+03 | 1,17E+03 | 64,4 | 65,4 | 71,1 | 73,5 |
| 39 | 2,57E+04 | 8,06E+03 | 2,85E+03 | 1,19E+03 | 64,5 | 65,4 | 71,1 | 73,5 |
| 40 | 2,62E+04 | 8,22E+03 | 2,89E+03 | 1,22E+03 | 64,5 | 65,4 | 71,3 | 73,7 |
| 41 | 2,66E+04 | 8,38E+03 | 2,96E+03 | 1,24E+03 | 64,5 | 65,4 | 71,1 | 73,7 |
| 42 | 2,71E+04 | 8,53E+03 | 3,01E+03 | 1,26E+03 | 64,5 | 65,4 | 71,3 | 73,7 |
| 43 | 2,76E+04 | 8,68E+03 | 3,06E+03 | 1,29E+03 | 64,6 | 65,4 | 71,3 | 73,9 |
| 44 | 2,80E+04 | 8,84E+03 | 3,11E+03 | 1,32E+03 | 64,5 | 65,4 | 71,3 | 73,9 |
| 45 | 2,85E+04 | 8,99E+03 | 3,15E+03 | 1,34E+03 | 64,6 | 65,4 | 71,5 | 74,1 |
| 46 | 2,90E+04 | 9,15E+03 | 3,20E+03 | 1,37E+03 | 64,6 | 65,4 | 71,7 | 74,1 |
| 47 | 2,95E+04 | 9,30E+03 | 3,25E+03 | 1,39E+03 | 64,6 | 65,3 | 71,3 | 74,2 |
| 48 | 2,98E+04 | 9,45E+03 | 3,31E+03 | 1,42E+03 | 64,6 | 65,3 | 71,5 | 74,5 |
| 49 | 3,03E+04 | 9,59E+03 | 3,37E+03 | 1,44E+03 | 64,7 | 65,3 | 71,7 | 74,4 |
| 50 | 3,07E+04 | 9,75E+03 | 3,41E+03 | 1,46E+03 | 64,7 | 65,3 | 71,7 | 74,5 |
| 51 | 3,11E+04 | 9,89E+03 | 3,47E+03 | 1,49E+03 | 64,6 | 65,3 | 71,8 | 74,8 |
| 52 | 3,16E+04 | 1,00E+04 | 3,52E+03 | 1,52E+03 | 64,7 | 65,3 | 71,8 | 74,9 |
| 53 | 3,20E+04 | 1,02E+04 | 3,56E+03 | 1,55E+03 | 64,8 | 65,3 | 72,3 | 74,7 |
| 54 | 3,24E+04 | 1,03E+04 | 3,61E+03 | 1,57E+03 | 64,7 | 65,3 | 72,0 | 75,0 |
| 55 | 3,28E+04 | 1,04E+04 | 3,65E+03 | 1,59E+03 | 64,8 | 65,4 | 72,4 | 75,0 |
| 56 | 3,32E+04 | 1,06E+04 | 3,72E+03 | 1,62E+03 | 64,8 | 65,4 | 72,7 | 75,1 |
| 57 | 3,36E+04 | 1,07E+04 | 3,74E+03 | 1,64E+03 | 64,8 | 65,3 | 72,4 | 75,3 |
| 58 | 3,40E+04 | 1,08E+04 | 3,80E+03 | 1,67E+03 | 64,8 | 65,3 | 72,2 | 75,5 |
| 59 | 3,44E+04 | 1,10E+04 | 3,85E+03 | 1,69E+03 | 64,8 | 65,3 | 72,3 | 75,4 |
| 60 | 3,47E+04 | 1,11E+04 | 3,89E+03 | 1,70E+03 | 64,8 | 65,3 | 72,7 | 75,7 |
| 61 | 3,51E+04 | 1,12E+04 | 3,93E+03 | 1,71E+03 | 64,9 | 65,4 | 72,5 | 75,7 |
| 62 | 3,55E+04 | 1,13E+04 | 3,95E+03 | 1,73E+03 | 64,9 | 65,4 | 72,7 | 76,1 |
| 63 | 3,59E+04 | 1,15E+04 | 4,01E+03 | 1,75E+03 | 64,9 | 65,4 | 72,9 | 76,0 |
| 64 | 3,62E+04 | 1,16E+04 | 4,05E+03 | 1,78E+03 | 65,0 | 65,4 | 73,0 | 76,2 |
| 65 | 3,66E+04 | 1,17E+04 | 4,10E+03 | 1,80E+03 | 65,0 | 65,4 | 73,1 | 76,4 |
| 66 | 3,70E+04 | 1,18E+04 | 4,14E+03 | 1,83E+03 | 65,0 | 65,4 | 73,3 | 76,5 |
| 67 | 3,73E+04 | 1,19E+04 | 4,19E+03 | 1,85E+03 | 65,0 | 65,4 | 73,1 | 76,7 |
| 68 | 3,77E+04 | 1,21E+04 | 4,23E+03 | 1,88E+03 | 65,0 | 65,4 | 73,4 | 76,7 |
| 69 | 3,80E+04 | 1,22E+04 | 4,28E+03 | 1,90E+03 | 65,0 | 65,4 | 73,1 | 76,9 |
| 70 | 3,84E+04 | 1,23E+04 | 4,31E+03 | 1,92E+03 | 65,1 | 65,4 | 73,5 | 76,9 |
| 71 | 3,87E+04 | 1,24E+04 | 4,36E+03 | 1,94E+03 | 65,1 | 65,4 | 73,8 | 77,1 |
| 72 | 3,91E+04 | 1,25E+04 | 4,42E+03 | 1,97E+03 | 65,1 | 65,4 | 73,7 | 77,3 |
| 73 | 3,95E+04 | 1,26E+04 | 4,46E+03 | 1,99E+03 | 65,1 | 65,4 | 73,8 | 77,5 |
| 74 | 3,98E+04 | 1,28E+04 | 4,49E+03 | 2,01E+03 | 65,1 | 65,5 | 73,7 | 77,5 |
| 75 | 4,02E+04 | 1,29E+04 | 4,54E+03 | 2,04E+03 | 65,2 | 65,4 | 74,3 | 77,6 |
| 76 | 4,05E+04 | 1,30E+04 | 4,58E+03 | 2,06E+03 | 65,2 | 65,4 | 74,2 | 78,0 |

|     |          |          |          |          |      |      |      |      |
|-----|----------|----------|----------|----------|------|------|------|------|
| 77  | 4,09E+04 | 1,31E+04 | 4,62E+03 | 2,09E+03 | 65,2 | 65,4 | 73,7 | 77,9 |
| 78  | 4,13E+04 | 1,32E+04 | 4,68E+03 | 2,10E+03 | 65,2 | 65,4 | 74,5 | 78,3 |
| 79  | 4,16E+04 | 1,34E+04 | 4,68E+03 | 2,13E+03 | 65,2 | 65,4 | 74,8 | 78,2 |
| 80  | 4,20E+04 | 1,35E+04 | 4,73E+03 | 2,16E+03 | 65,3 | 65,5 | 74,9 | 78,1 |
| 81  | 4,23E+04 | 1,36E+04 | 4,79E+03 | 2,18E+03 | 65,3 | 65,5 | 74,4 | 78,3 |
| 82  | 4,27E+04 | 1,37E+04 | 4,84E+03 | 2,20E+03 | 65,3 | 65,5 | 74,3 | 78,6 |
| 83  | 4,31E+04 | 1,38E+04 | 4,85E+03 | 2,23E+03 | 65,3 | 65,5 | 74,9 | 78,9 |
| 84  | 4,34E+04 | 1,39E+04 | 4,90E+03 | 2,24E+03 | 65,3 | 65,5 | 75,0 | 78,8 |
| 85  | 4,38E+04 | 1,41E+04 | 4,97E+03 | 2,27E+03 | 65,3 | 65,5 | 74,7 | 79,2 |
| 86  | 4,42E+04 | 1,42E+04 | 4,96E+03 | 2,29E+03 | 65,3 | 65,5 | 75,5 | 79,3 |
| 87  | 4,45E+04 | 1,43E+04 | 5,02E+03 | 2,31E+03 | 65,4 | 65,5 | 75,4 | 79,8 |
| 88  | 4,49E+04 | 1,44E+04 | 5,08E+03 | 2,34E+03 | 65,4 | 65,5 | 75,1 | 79,5 |
| 89  | 4,53E+04 | 1,45E+04 | 5,10E+03 | 2,37E+03 | 65,4 | 65,5 | 75,5 | 79,9 |
| 90  | 4,56E+04 | 1,46E+04 | 5,12E+03 | 2,39E+03 | 65,4 | 65,5 | 75,6 | 79,6 |
| 91  | 4,60E+04 | 1,48E+04 | 5,19E+03 | 2,41E+03 | 65,4 | 65,6 | 75,5 | 80,2 |
| 92  | 4,64E+04 | 1,49E+04 | 5,22E+03 | 2,44E+03 | 65,5 | 65,6 | 75,8 | 80,1 |
| 93  | 4,68E+04 | 1,50E+04 | 5,26E+03 | 2,46E+03 | 65,5 | 65,6 | 76,5 | 80,4 |
| 94  | 4,72E+04 | 1,51E+04 | 5,32E+03 | 2,48E+03 | 65,5 | 65,6 | 76,1 | 80,5 |
| 95  | 4,75E+04 | 1,52E+04 | 5,33E+03 | 2,51E+03 | 65,5 | 65,6 | 76,2 | 80,8 |
| 96  | 4,79E+04 | 1,53E+04 | 5,38E+03 | 2,54E+03 | 65,5 | 65,6 | 77,2 | 80,9 |
| 97  | 4,83E+04 | 1,54E+04 | 5,43E+03 | 2,55E+03 | 65,5 | 65,6 | 76,8 | 80,8 |
| 98  | 4,87E+04 | 1,55E+04 | 5,46E+03 | 2,58E+03 | 65,6 | 65,6 | 77,4 | 80,8 |
| 99  | 4,91E+04 | 1,57E+04 | 5,45E+03 | 2,62E+03 | 65,6 | 65,6 | 77,3 | 81,2 |
| 100 | 4,94E+04 | 1,58E+04 | 5,52E+03 | 2,65E+03 | 65,6 | 65,6 | 77,1 | 81,2 |

### C. TABELAS DE RESULTADOS PARA O MÓDULO DINÂMICO E ÂNGULO DE FASE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

As tabelas a seguir apresentam os resultados dos ensaios de módulo dinâmico e ângulo de fase para as misturas asfálticas MAB-R25, MAB-R30-1, MAB-R30-2 e MAB-R30-3 nas respectivas frequências e temperaturas de ensaio.

**Tabela C 1-** Resultados dos ensaios de módulo dinâmico para três amostras da mistura MAB-R25.

| Temp. (°C) | Freq. (Hz) | E*  (MPa) |           |           | Ângulo de fase (°) |           |           |
|------------|------------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-----------|-----------|
|            |            | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 3 | Amostra 1          | Amostra 2 | Amostra 3 |
| 5          | 20         | 7,93E+03  | 7,10E+03  | 7,19E+03  | 13,3               | 12,8      | 12,0      |
| 5          | 10         | 7,24E+03  | 6,41E+03  | 6,52E+03  | 14,6               | 14,1      | 13,3      |
| 5          | 5          | 6,41E+03  | 5,72E+03  | 5,73E+03  | 16,7               | 16,0      | 15,5      |
| 5          | 2          | 5,57E+03  | 4,82E+03  | 5,10E+03  | 19,4               | 18,8      | 18,5      |
| 5          | 1          | 4,62E+03  | 4,53E+03  | 4,66E+03  | 22,1               | 21,2      | 21,1      |

|    |     |          |          |          |      |      |      |
|----|-----|----------|----------|----------|------|------|------|
| 5  | 0,5 | 4,16E+03 | 3,70E+03 | 3,56E+03 | 24,7 | 23,4 | 23,5 |
| 5  | 0,2 | 3,20E+03 | 2,90E+03 | 2,88E+03 | 28,3 | 26,7 | 27,1 |
| 5  | 0,1 | 2,57E+03 | 2,28E+03 | 2,31E+03 | 31,1 | 29,3 | 29,9 |
| 15 | 20  | 3,73E+03 | 3,57E+03 | 3,87E+03 | 25,8 | 25,6 | 25,6 |
| 15 | 10  | 3,19E+03 | 3,01E+03 | 3,28E+03 | 27,8 | 27,3 | 27,5 |
| 15 | 5   | 2,81E+03 | 2,76E+03 | 2,90E+03 | 30,3 | 29,8 | 30,0 |
| 15 | 2   | 2,21E+03 | 2,22E+03 | 2,35E+03 | 34,3 | 33,5 | 33,9 |
| 15 | 1   | 1,61E+03 | 1,83E+03 | 1,74E+03 | 36,7 | 35,7 | 36,3 |
| 15 | 0,5 | 1,24E+03 | 1,49E+03 | 1,24E+03 | 39,0 | 37,6 | 38,7 |
| 15 | 0,2 | 1,07E+03 | 8,54E+02 | 1,25E+03 | 40,5 | 39,2 | 40,1 |
| 15 | 0,1 | 1,50E+03 | 7,32E+02 | 7,72E+02 | 41,3 | 39,6 | 40,8 |
| 25 | 20  | 1,39E+03 | 1,45E+03 | 1,41E+03 | 44,3 | 42,6 | 43,3 |
| 25 | 10  | 1,09E+03 | 1,10E+03 | 1,12E+03 | 42,5 | 40,7 | 41,8 |
| 25 | 5   | 8,24E+02 | 8,46E+02 | 9,45E+02 | 43,2 | 41,5 | 42,8 |
| 25 | 2   | 6,20E+02 | 6,84E+02 | 6,52E+02 | 43,7 | 42,6 | 43,3 |
| 25 | 1   | 4,02E+02 | 5,80E+02 | 4,53E+02 | 42,6 | 42,5 | 42,9 |
| 25 | 0,5 | 5,29E+02 | 4,36E+02 | 4,36E+02 | 41,6 | 40,9 | 42,3 |
| 25 | 0,2 | 4,81E+02 | 6,72E+02 | 4,57E+02 | 37,7 | 36,4 | 39,9 |
| 25 | 0,1 | 5,90E+02 | 5,93E+02 | 5,39E+02 | 35,3 | 35,8 | 36,1 |
| 35 | 25  | 5,48E+02 | 5,61E+02 | 5,18E+02 | -    | -    | -    |
| 35 | 20  | 5,68E+02 | 4,37E+02 | 4,64E+02 | -    | 65,4 | -    |
| 35 | 15  | 4,42E+02 | 4,08E+02 | 3,92E+02 | 57,3 | 54,7 | 57,6 |
| 35 | 10  | 3,70E+02 | 3,54E+02 | 3,63E+02 | 50,7 | 49,4 | 49,9 |
| 35 | 5   | 3,76E+02 | 3,31E+02 | 3,11E+02 | 46,3 | 44,6 | 45,1 |
| 35 | 2   | 2,57E+02 | 3,03E+02 | 3,09E+02 | 41,5 | 40,3 | 40,5 |
| 35 | 1   | 1,89E+02 | 1,59E+02 | 2,58E+02 | 36,9 | 36,9 | 37,5 |
| 35 | 0,5 | 3,03E+02 | 3,47E+02 | 1,64E+02 | 35,3 | 34,5 | 35,0 |

**Tabela C 2-** Resultados dos ensaios de módulo dinâmico para três amostras da mistura MAB-R30-1.

| Temp. (°C) | Freq. (Hz) | E*  (MPa) |           |           | Ângulo de fase (°) |           |           |
|------------|------------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-----------|-----------|
|            |            | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 3 | Amostra 1          | Amostra 2 | Amostra 3 |
| 5          | 20         | 7,31E+03  | 7,02E+03  | 7,20E+03  | 14,0               | 13,0      | 15,0      |
| 5          | 10         | 6,68E+03  | 6,44E+03  | 6,46E+03  | 15,2               | 15,3      | 16,2      |
| 5          | 5          | 5,89E+03  | 5,59E+03  | 5,60E+03  | 17,1               | 17,5      | 18,0      |
| 5          | 2          | 5,02E+03  | 5,16E+03  | 4,74E+03  | 19,7               | 20,3      | 20,6      |
| 5          | 1          | 4,72E+03  | 4,28E+03  | 4,03E+03  | 22,1               | 22,5      | 23,0      |
| 5          | 0,5        | 3,97E+03  | 3,43E+03  | 3,47E+03  | 24,2               | 24,7      | 25,4      |
| 5          | 0,2        | 3,01E+03  | 2,79E+03  | 2,78E+03  | 27,1               | 27,7      | 28,9      |
| 5          | 0,1        | 2,52E+03  | 2,28E+03  | 2,28E+03  | 28,9               | 29,3      | 31,2      |
| 15         | 20         | 3,53E+03  | 3,29E+03  | 3,29E+03  | 26,3               | 26,4      | 26,4      |
| 15         | 10         | 2,92E+03  | 2,80E+03  | 2,81E+03  | 28,0               | 28,4      | 28,1      |
| 15         | 5          | 2,72E+03  | 2,50E+03  | 2,43E+03  | 30,5               | 30,8      | 30,6      |
| 15         | 2          | 2,16E+03  | 2,01E+03  | 1,97E+03  | 33,9               | 34,1      | 33,9      |
| 15         | 1          | 1,59E+03  | 1,40E+03  | 1,36E+03  | 35,9               | 36,3      | 36,0      |

|    |     |          |          |          |      |      |      |
|----|-----|----------|----------|----------|------|------|------|
| 15 | 0,5 | 1,37E+03 | 1,11E+03 | 1,05E+03 | 37,7 | 37,7 | 37,7 |
| 15 | 0,2 | 1,12E+03 | 1,04E+03 | 7,95E+02 | 38,5 | 38,6 | 39,0 |
| 15 | 0,1 | 7,25E+02 | 9,94E+02 | 6,94E+02 | 39,0 | 39,0 | 39,1 |
| 25 | 20  | 1,40E+03 | 1,32E+03 | 1,30E+03 | 44,1 | 43,2 | 44,5 |
| 25 | 10  | 1,13E+03 | 1,05E+03 | 1,04E+03 | 41,6 | 40,8 | 42,0 |
| 25 | 5   | 8,59E+02 | 8,10E+02 | 7,59E+02 | 42,0 | 41,1 | 42,4 |
| 25 | 2   | 5,62E+02 | 6,24E+02 | 6,62E+02 | 42,3 | 41,5 | 42,2 |
| 25 | 1   | 4,28E+02 | 3,85E+02 | 5,74E+02 | 41,7 | 41,0 | 41,9 |
| 25 | 0,5 | 3,86E+02 | 3,22E+02 | 5,30E+02 | 41,0 | 39,6 | 40,9 |
| 25 | 0,2 | 5,34E+02 | 5,97E+02 | 6,04E+02 | 37,8 | 36,3 | 39,2 |
| 25 | 0,1 | 6,56E+02 | 5,22E+02 | 4,57E+02 | 37,0 | 37,8 | 35,8 |
| 35 | 25  | 5,28E+02 | 5,43E+02 | 4,66E+02 | -    | -    | -    |
| 35 | 20  | 4,36E+02 | 3,87E+02 | 4,14E+02 | -    | -    | -    |
| 35 | 15  | 4,61E+02 | 3,90E+02 | 3,41E+02 | 57,0 | 56,1 | 56,9 |
| 35 | 10  | 3,28E+02 | 3,50E+02 | 3,34E+02 | 50,9 | 50,2 | 50,2 |
| 35 | 5   | 2,80E+02 | 3,19E+02 | 3,09E+02 | 45,4 | 45,2 | 44,6 |
| 35 | 2   | 2,32E+02 | 2,26E+02 | 3,99E+02 | 41,1 | 40,9 | 40,2 |
| 35 | 1   | 3,01E+02 | 1,81E+02 | 1,85E+02 | 38,6 | 37,7 | 37,3 |
| 35 | 0,5 | 3,12E+02 | 1,47E+02 | 3,87E+02 | 45,0 | 36,6 | 34,5 |

**Tabela C 3-** Resultados dos ensaios de módulo dinâmico para três amostras da mistura MAB-R30-2.

| Temp. (°C) | Freq. (Hz) | E*  (MPa) |           |           | Ângulo de fase (°) |           |           |
|------------|------------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-----------|-----------|
|            |            | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 3 | Amostra 1          | Amostra 2 | Amostra 3 |
| 5          | 20         | 7,76E+03  | 8,25E+03  | 7,73E+03  | 14,4               | 11,8      | 13,9      |
| 5          | 10         | 6,98E+03  | 7,37E+03  | 7,04E+03  | 15,7               | 13,5      | 15,2      |
| 5          | 5          | 6,06E+03  | 6,51E+03  | 6,15E+03  | 17,6               | 15,7      | 17,3      |
| 5          | 2          | 5,32E+03  | 5,80E+03  | 5,46E+03  | 20,3               | 18,4      | 20,2      |
| 5          | 1          | 4,65E+03  | 4,66E+03  | 4,48E+03  | 22,7               | 20,9      | 22,6      |
| 5          | 0,5        | 4,08E+03  | 4,22E+03  | 4,09E+03  | 25,0               | 23,5      | 25,2      |
| 5          | 0,2        | 3,15E+03  | 3,22E+03  | 3,04E+03  | 28,1               | 26,5      | 28,6      |
| 5          | 0,1        | 2,56E+03  | 2,64E+03  | 2,45E+03  | 30,2               | 28,9      | 31,0      |
| 15         | 20         | 3,52E+03  | 3,73E+03  | 3,70E+03  | 28,5               | 26,8      | 27,4      |
| 15         | 10         | 3,20E+03  | 3,21E+03  | 3,12E+03  | 28,3               | 28,6      | 29,2      |
| 15         | 5          | 2,72E+03  | 2,79E+03  | 2,77E+03  | 30,5               | 30,9      | 31,6      |
| 15         | 2          | 1,93E+03  | 1,93E+03  | 1,80E+03  | 34,2               | 34,4      | 35,0      |
| 15         | 1          | 1,56E+03  | 1,48E+03  | 1,59E+03  | 36,2               | 36,6      | 37,1      |
| 15         | 0,5        | 1,21E+03  | 1,26E+03  | 1,51E+03  | 37,7               | 38,3      | 38,9      |
| 15         | 0,2        | 9,58E+02  | 1,32E+03  | 1,13E+03  | 39,0               | 39,3      | 40,0      |
| 15         | 0,1        | 8,11E+02  | 1,27E+03  | 1,01E+03  | 39,5               | 39,6      | 40,6      |
| 25         | 20         | 1,36E+03  | 1,40E+03  | 1,37E+03  | 43,4               | 43,7      | 43,2      |
| 25         | 10         | 1,06E+03  | 1,12E+03  | 1,08E+03  | 41,6               | 42,0      | 41,2      |
| 25         | 5          | 8,93E+02  | 9,47E+02  | 9,07E+02  | 42,1               | 42,3      | 41,7      |
| 25         | 2          | 5,91E+02  | 5,72E+02  | 8,04E+02  | 42,3               | 42,4      | 41,9      |
| 25         | 1          | 6,30E+02  | 4,85E+02  | 4,37E+02  | 42,1               | 42,1      | 41,5      |

|    |     |          |          |          |      |      |      |
|----|-----|----------|----------|----------|------|------|------|
| 25 | 0,5 | 4,07E+02 | 3,53E+02 | 5,62E+02 | 41,1 | 40,8 | 40,1 |
| 25 | 0,2 | 7,00E+02 | 7,34E+02 | 5,86E+02 | 39,3 | 36,7 | 38,0 |
| 25 | 0,1 | 6,93E+02 | 8,91E+02 | 6,72E+02 | 38,4 | 34,0 | 36,9 |
| 35 | 25  | 5,46E+02 | 6,12E+02 | 6,13E+02 | -    | -    | -    |
| 35 | 20  | 4,40E+02 | 4,61E+02 | 5,05E+02 | 63,6 | -    | 63,5 |
| 35 | 15  | 4,86E+02 | 4,29E+02 | 5,17E+02 | 54,9 | 55,5 | 53,8 |
| 35 | 10  | 4,05E+02 | 4,16E+02 | 4,22E+02 | 49,4 | 50,0 | 48,7 |
| 35 | 5   | 2,97E+02 | 3,04E+02 | 2,87E+02 | 44,9 | 45,5 | 44,7 |
| 35 | 2   | 3,80E+02 | 2,79E+02 | 2,57E+02 | 41,0 | 42,2 | 39,9 |
| 35 | 1   | 1,89E+02 | 1,76E+02 | 2,63E+02 | 39,1 | 38,6 | 36,6 |
| 35 | 0,5 | 4,46E+02 | 3,96E+02 | 2,78E+02 | 38,4 | 38,4 | 35,3 |

**Tabela C 4-** Resultados dos ensaios de módulo dinâmico para três amostras da mistura MAB-R30-3.

| Temp. (°C) | Freq. (Hz) | E*  (MPa) |           |           | Ângulo de fase (°) |           |           |
|------------|------------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-----------|-----------|
|            |            | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 3 | Amostra 1          | Amostra 2 | Amostra 3 |
| 5          | 20         | 7,07E+03  | 6,65E+03  | 6,69E+03  | 12,7               | 13,4      | 14,7      |
| 5          | 10         | 6,36E+03  | 6,07E+03  | 6,05E+03  | 13,9               | 14,4      | 16,0      |
| 5          | 5          | 5,55E+03  | 5,29E+03  | 5,29E+03  | 15,7               | 16,3      | 18,0      |
| 5          | 2          | 4,80E+03  | 4,63E+03  | 4,67E+03  | 18,4               | 18,9      | 20,8      |
| 5          | 1          | 4,27E+03  | 3,98E+03  | 4,14E+03  | 20,9               | 21,1      | 23,3      |
| 5          | 0,5        | 3,44E+03  | 3,55E+03  | 3,36E+03  | 22,8               | 23,2      | 25,6      |
| 5          | 0,2        | 2,71E+03  | 2,60E+03  | 2,62E+03  | 25,7               | 26,0      | 28,6      |
| 5          | 0,1        | 2,17E+03  | 2,11E+03  | 2,15E+03  | 27,8               | 28,0      | 30,6      |
| 15         | 20         | 3,45E+03  | 3,14E+03  | 3,15E+03  | 26,0               | 26,2      | 27,8      |
| 15         | 10         | 3,00E+03  | 2,64E+03  | 2,72E+03  | 27,5               | 27,6      | 29,3      |
| 15         | 5          | 2,65E+03  | 2,32E+03  | 2,29E+03  | 29,6               | 29,8      | 31,5      |
| 15         | 2          | 2,02E+03  | 1,86E+03  | 1,80E+03  | 32,7               | 32,8      | 34,6      |
| 15         | 1          | 1,33E+03  | 1,22E+03  | 1,36E+03  | 34,5               | 35,0      | 36,6      |
| 15         | 0,5        | 1,09E+03  | 1,29E+03  | 1,07E+03  | 36,0               | 36,7      | 38,2      |
| 15         | 0,2        | 9,53E+02  | 1,05E+03  | 1,03E+03  | 37,0               | 37,8      | 39,2      |
| 15         | 0,1        | 7,74E+02  | 9,84E+02  | 6,68E+02  | 37,1               | 38,0      | 40,1      |
| 25         | 20         | 1,48E+03  | 1,18E+03  | 1,27E+03  | 41,2               | 40,6      | 43,4      |
| 25         | 10         | 1,20E+03  | 9,24E+02  | 1,01E+03  | 39,2               | 38,5      | 40,5      |
| 25         | 5          | 1,01E+03  | 7,68E+02  | 8,41E+02  | 39,4               | 39,3      | 40,7      |
| 25         | 2          | 6,76E+02  | 5,30E+02  | 5,98E+02  | 39,8               | 40,4      | 41,1      |
| 25         | 1          | 4,82E+02  | 4,75E+02  | 5,59E+02  | 39,1               | 39,9      | 40,2      |
| 25         | 0,5        | 9,57E+02  | 3,17E+02  | 5,75E+02  | 38,0               | 38,7      | 39,5      |
| 25         | 0,2        | 6,96E+02  | 8,27E+02  | 7,91E+02  | 36,5               | 37,5      | 38,0      |
| 25         | 0,1        | 6,88E+02  | 8,03E+02  | 5,44E+02  | 37,7               | 37,3      | 39,3      |
| 35         | 25         | 6,32E+02  | 5,66E+02  | 5,48E+02  | -                  | -         | -         |
| 35         | 20         | 5,51E+02  | 5,02E+02  | 4,24E+02  | 60,9               | 57,7      | 63,6      |
| 35         | 15         | 4,95E+02  | 5,27E+02  | 4,98E+02  | 52,2               | 49,9      | 59,1      |
| 35         | 10         | 5,17E+02  | 4,41E+02  | 4,30E+02  | 47,1               | 45,9      | 54,1      |

|    |     |          |          |          |      |      |      |
|----|-----|----------|----------|----------|------|------|------|
| 35 | 5   | 4,26E+02 | 3,40E+02 | 3,64E+02 | 42,7 | 42,1 | 46,4 |
| 35 | 2   | 4,90E+02 | 2,77E+02 | 2,53E+02 | 40,0 | 39,8 | 42,8 |
| 35 | 1   | 2,16E+02 | 3,78E+02 | 1,88E+02 | 37,3 | 38,1 | 37,9 |
| 35 | 0,5 | 4,01E+02 | 2,50E+02 | 1,76E+02 | 36,0 | 37,3 | 25,4 |