


|  |  |                          |
|--|--|--------------------------|
|   | <b>1. Relatório Número:</b><br>CCR-ND-MOD- RF-MAR/2018                                       |                          |
|  | <b>2. Data do Relatório:</b><br>Março de 2018  | <b>3. Folhas:</b><br>241 |
| <b>4. Título da Pesquisa:</b><br>“Determinação do módulo de resiliência, módulo dinâmico e <i>flow number</i> de misturas asfálticas com diversos ligantes asfálticos e faixas granulométricas”  |  |                          |
| <b>5. Responsável pela coordenação da pesquisa:</b><br><br>Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da Concessionária NovaDutra, do Grupo CCR   | <b>6. Relatório Elaborado para:</b><br><br>Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) |                          |
| <b>7. Período de Execução das atividades:</b><br>Maio de 2015 a Março de 2018.   |  |                          |
| <b>8. Relatório preparado por:</b><br><br>Luis Miguel Gutiérrez Klinsky (CPR)<br>Valéria C. de Faria (CPR)   |  |                          |
| <b>9. Resumo:</b><br>A determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas, além de necessária para a elaboração dos modelos de previsão de desempenho, é muito útil na caracterização, seleção, dosagem e projeto estrutural do material. Nesse sentido, nesta pesquisa estudaram-se os materiais utilizados nos revestimentos asfálticos para determinar suas propriedades fundamentais e assim criar um banco de dados que possa ser considerado para futuras aplicações no dimensionamento de reforços de pavimentos da Rodovia Presidente Dutra e também para projetos de construção de novas estruturas relacionadas a faixas adicionais e marginais da rodovia. Foi elaborado um programa laboratorial para analisar 144 misturas asfálticas compostas pela combinação de três agregados minerais, quatro faixas granulométricas e doze ligantes asfálticos. Os ensaios executados no programa laboratorial consistem na caracterização dos materiais, dosagem das misturas asfálticas e ensaios mecânicos de módulo de resiliência, resistência à tração, módulo dinâmico e <i>flow number</i> . |  |                          |
| <b>10. Palavras Chave:</b><br>Misturas asfálticas, módulo de resiliência, módulo dinâmico, <i>flow number</i> .  |  |                          |

# ÍNDICE

|   |               |
|---|---------------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>- 4 -</b>  |
| <b>2. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO (ETAPA A) .....</b>  | <b>- 6 -</b>  |
| 2.1. MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....  | - 6 -         |
| 2.1.1. Ensaio de compressão diametral de cargas repetidas .....                                   | - 7 -         |
| 2.1.2. Normativas para execução do ensaio de MR.....  | - 13 -        |
| 2.1.2.1. Normativa do DNIT .....  | - 13 -        |
| 2.1.2.2. Normativas Norteamericanas .....   | - 15 -        |
| 2.1.2.3. Normativa Australiana .....  | - 20 -        |
| 2.1.3. Fatores que afetam o módulo de resiliência .....   | - 21 -        |
| 2.1.3.1. Efeito dos agregados e granulometria.....  | - 22 -        |
| 2.1.3.2. Efeito do tipo e do teor de ligante asfáltico.....                                       | - 23 -        |
| 2.1.3.3. Estudos desenvolvidos no Brasil .....  | - 24 -        |
| 2.2. MÓDULO DINÂMICO .....  | - 39 -        |
| 2.2.1. Histórico do ensaio .....  | - 39 -        |
| 2.2.2. Fundamentação teórica do ensaio .....  | - 41 -        |
| 2.2.3. Normativas para execução do ensaio .....   | - 44 -        |
| 2.2.4. Construção de curvas mestre.....   | - 47 -        |
| 2.2.5. Modelos preditivos do módulo dinâmico .....  | - 51 -        |
| 2.2.5.1. Modelo de Witczak.....   | - 51 -        |
| 2.2.5.2. Modelo de Hirsch.....  | - 52 -        |
| 2.3. ENSAIO UNIAXIAL DE CARGA REPETIDA (FLOW NUMBER TEST) .....                                   | - 53 -        |
| <b>3. SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS (ETAPA B).....</b>                                   | <b>- 56 -</b> |
| 3.1. AGREGADOS PÉTREOS .....  | - 56 -        |
| 3.1.1. Agregados graníticos do Estado de São Paulo .....  | - 56 -        |
| 3.1.2. Agregados basálticos do Estado de São Paulo.....   | - 58 -        |
| 3.1.2. Agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro .....                                     | - 61 -        |
| 3.2. LIGANTES ASFÁLTICOS .....  | - 63 -        |
| <b>4. DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS (ETAPA C).....</b>  | <b>- 71 -</b> |
| <b>5. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS (ETAPA D) E ANÁLISE DOS RESULTADOS (ETAPA E).....</b> | <b>- 98 -</b> |
| 5.1. RESULTADOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....                             | - 98 -        |

|   |                |
|---|----------------|
| 5.1.1. Faixa Granulométrica Faixa III DERSA ..... | - 98 -         |
| 5.1.2. Faixa Granulométrica EGL 19,0mm.....       | - 109 -        |
| 5.1.3. Faixa Granulométrica EGL 9,5mm .....       | - 119 -        |
| 5.1.4. Faixa Granulométrica Gap Graded .....      | - 129 -        |
| 5.2. RESULTADOS DE MÓDULO DINÂMICO .....          | - 139 -        |
| 5.2.1. Faixa Granulométrica Faixa III-DERSA.....  | - 139 -        |
| 5.2.2. Faixa Granulométrica EGL 19,0mm.....       | - 152 -        |
| 5.2.3. Faixa Granulométrica EGL 9,5mm .....       | - 165 -        |
| 5.2.4. Faixa Granulométrica Gap Graded .....      | - 178 -        |
| 5.3. RESULTADOS DE FLOW NUMBER .....              | - 191 -        |
| 5.3.1. Faixa Granulométrica Faixa III-DERSA.....  | - 191 -        |
| 5.3.2. Faixa Granulométrica EGL 19,0mm.....       | - 198 -        |
| 5.3.1. Faixa Granulométrica EGL 9,5mm .....       | - 204 -        |
| 5.3.4. Faixa Granulométrica Gap Graded .....      | - 210 -        |
| 5.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....                     | - 216 -        |
| 5.4.1. Módulo de Resiliência .....                | - 216 -        |
| 5.4.2. Resistência à Tração.....                  | - 221 -        |
| 5.4.3. Módulo Dinâmico .....                      | - 224 -        |
| 5.4.4. Flow Number.....                           | - 229 -        |
| <b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>              | <b>- 232 -</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>           | <b>- 234 -</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

O incremento do volume de tráfego, das cargas por eixo e da pressão de enchimento dos pneus dos veículos comerciais nas rodovias no Brasil exige cada vez mais o emprego de materiais com maior resistência e durabilidade na construção dos revestimentos de pavimentos rodoviários. O incremento do tráfego também representa uma menor disponibilidade de interromper o tráfego para as atividades de conservação. Nesse sentido a CCR NovaDutra constantemente está à procura de materiais que possam atender a essa problemática, para garantir a segurança e o conforto dos usuários.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar as propriedades fundamentais e de principal interesse para o dimensionamento mecanicista de estruturas de pavimentos, de diversas misturas asfálticas e a influência de:

- A fonte dos agregados;
- A faixa granulométrica;
- O tipo de ligante asfáltico.

Os parâmetros mecânicos foram avaliados por meio de um programa laboratorial que incluiu os seguintes ensaios:

- Caracterização dos materiais e dosagem de misturas asfálticas;
- Módulo de resiliência (MR) por compressão diametral em três temperaturas;
- Resistência à tração (RT);
- Módulo dinâmico ( $E^*$ );
- Compressão uniaxial de carga repetida (*Flow Number, FN*).

Inicialmente, neste estudo foi realizado um levantamento bibliográfico dos parâmetros mecânicos estudados, tanto em publicações no âmbito nacional como no meio internacional. O Capítulo 2 deste relatório apresenta essas informações obtidas em Dissertações de Mestrado, Teses de Doutorado, anais de congressos, revistas e normas técnicas.

O programa laboratorial de ensaios foi executado no laboratório do Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da CCR NovaDutra. Esse programa foi iniciado com a seleção e a caracterização dos agregados

e dos ligantes asfálticos. Os resultados dessa etapa da pesquisa são apresentados no Capítulo 3 deste relatório.

Após a seleção e caracterização dos materiais, foi realizada no CPR a dosagem das 144 misturas asfálticas resultantes da combinação dos fatores avaliados. O Capítulo 4 deste relatório apresenta os resultados dessa etapa.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados dos ensaios mecânicos MR, RT, E\* e FN executados no laboratório do CPR. Os resultados foram avaliados estatisticamente com a ferramenta Análise de Variância (ANOVA) e as tendências obtidas são apresentadas também nesse capítulo.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta de forma resumida algumas considerações e conclusões sobre as observações realizadas nesta pesquisa.

## 2. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO (ETAPA A)

O comportamento dos pavimentos quando submetidos ao carregamento do tráfego precisa de uma adequada caracterização dos materiais utilizados para compor as diversas camadas estruturais. No sistema estrutural de pavimentos, a mistura asfáltica desempenha uma função importante, para resistir às ações variáveis de tráfego e condições climáticas.

O estudo do comportamento mecânico do concreto asfáltico é fundamental para desenvolver modelos que ajudem na predição dos limites de ruptura desse material, tais como: trincamento por fadiga, deformação permanente e trincamento térmico. Os parâmetros necessários dependem do tipo de modelos teóricos empregados para representar o sistema de pavimento, portanto, modelos mais sofisticados demandam também o emprego de ensaios mais sofisticados.

A determinação das propriedades mecânicas do concreto asfáltico, além de necessária para a elaboração dos modelos de previsão de desempenho, é muito útil para caracterizar, selecionar, dosar e projetar adequadamente esse material.

Assim, a seleção adequada do ensaio utilizado para caracterização das propriedades mecânicas do concreto asfáltico é diretamente relacionada com a precisão alvejada e com a praticidade. Para esta pesquisa foram selecionados o ensaio de módulo de resiliência diametral, o módulo dinâmico e o ensaio uniaxial de carga repetida ou *flow number*.

### 2.1. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O dimensionamento de pavimentos na atualidade, no Brasil, exige a verificação mecanicista de tensões e deformações por meio de programas computacionais que aplicam a Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas, TSCE, (ELSYM5, BISAR, MEPADS). Nesses programas, o módulo de resiliência é um dos parâmetros de entrada para caracterizar os materiais.

O módulo de resiliência é o módulo elástico utilizado na teoria elástica de dimensionamento de pavimentos. Sabe-se muito bem que a mistura asfáltica tem um comportamento visco elástico e, portanto, após a aplicação de cada carregamento sofre uma determinada deformação plástica ou permanente. Contudo, considera-se que a deformação é recuperada quase na sua totalidade se o

carregamento é pequeno, quando comparado com a resistência de ruptura do material. A deformação é proporcional ao carregamento aplicado e, já que é considerado que a deformação é recuperável, pode ser considerado o comportamento elástico.

O módulo de resiliência é baseado, portanto, na deformação recuperável devido a um carregamento cíclico e pode ser determinado pela Equação 2.1.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:  $\sigma_d$  = a tensão desviatória;

$\varepsilon_r$  = deformação recuperável.

O módulo de resiliência é avaliado por diversos métodos de ensaio de carregamento cíclico, cada um com suas vantagens e desvantagens. Dentre eles, as configurações mais comuns são:

- o ensaio de tração uniaxial;
- o ensaio de compressão uniaxial;
- o ensaio de flexão de viga;
- o ensaio de compressão triaxial;
- o ensaio de compressão diametral de cargas repetidas.

Neste estudo será abordado com maior detalhe o ensaio de compressão diametral de cargas repetidas, que é mais utilizado no Brasil para caracterizar a rigidez do concreto asfáltico e foi empregado também nesta pesquisa.

### **2.1.1. Ensaio de compressão diametral de cargas repetidas**

O ensaio de compressão diametral foi desenvolvido originalmente pelo Prof. Fernando Luiz Lobo B. Carneiro da COPPE/UFRJ, para avaliar a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de concreto de cimento Portland. No exterior, esse ensaio é conhecido também como “Ensaio Brasileiro”.

Segundo Medina e Motta (2005) a aplicação desse ensaio com carregamento cíclico em misturas asfálticas é atribuído a Schmidt em 1972, Engenheiro da Chevron na Califórnia nos Estados Unidos. No Brasil, desde a década de 1980, o ensaio de compressão diametral começou a ser utilizado de forma estática e dinâmica nas misturas asfálticas.

O carregamento de uma roda em uma estrutura de pavimentos induz o surgimento de tensões em todas as camadas. Para caracterizar adequadamente em laboratório as propriedades mecânicas dos materiais, é importante simular estados de tensão similares aos que são desenvolvidos em campo. Na Figura 2.1 são ilustradas as tensões em um revestimento asfáltico comum, induzidas pelo carregamento de uma roda. Segundo Roque e Buttlar (1992), essas tensões podem ser divididas em quatro casos gerais:

- I. compressão triaxial superficial logo abaixo da roda;
- II. tração longitudinal e transversal combinada com compressão vertical na fibra inferior da camada asfáltica, logo abaixo da roda;
- III. tração longitudinal e transversal na superfície a uma certa distância do carregamento;
- IV. compressão longitudinal e transversal na fibra inferior da camada asfáltica, a uma certa distância do carregamento.

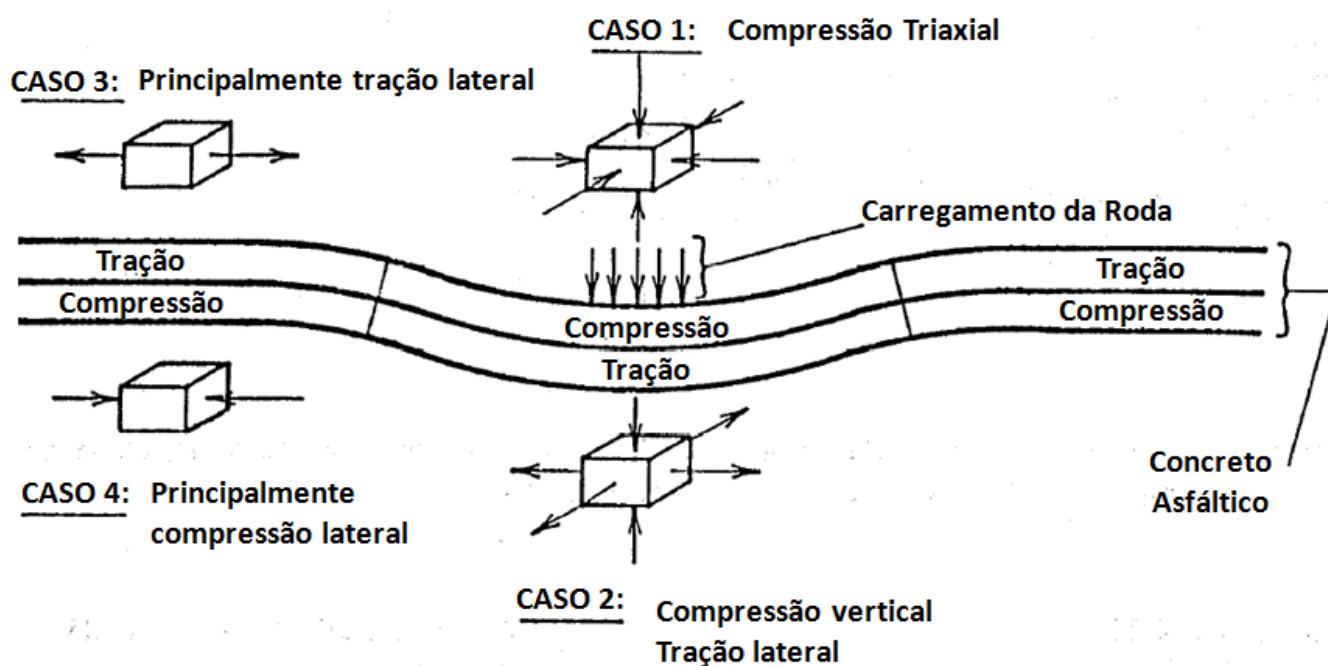


Figura 2.1: estados de tensão típicos no revestimento de concreto asfáltico induzidos pelo carregamento de uma roda. Adaptado de Roque e Buttlar (1992)

De modo geral, as fibras inferiores do concreto asfáltico logo abaixo da carga é considerado o ponto crítico para induzir o trincamento por fadiga no revestimento, onde são desenvolvidas tensões de tração longitudinal e transversal combinadas com compressão vertical. No ensaio de compressão diametral, o carregamento aplicado em um corpo de prova cilíndrico induz um estado de tensão



próximo ao centro com uma configuração muito parecida ao comportamento de campo, contudo, a tensão de tração é induzida apenas em uma direção.

Para execução deste ensaio em misturas asfálticas, tradicionalmente são utilizados corpos de prova (CPs) cilíndricos tipo Marshall com 101,6mm de diâmetro e 63,5mm de altura. Nesses CPs é apoiado um friso metálico curvo e estreito diametralmente, como mostra a Figura 2.2, induzindo um estado biaxial de tensões, de compressão na direção vertical e de tração na horizontal, conforme é apresentado na Figura 2.3 e representado pela Equação 2.2.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{MR} (\sigma_x - \mu \sigma_y) \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde:  $\varepsilon_x$  = deformação de tração no diâmetro horizontal;

$\sigma_x$  = tensão horizontal;

$\sigma_y$  = tensão vertical;

$\mu$  = coeficiente de Poisson;

$MR$  = Módulo de Resiliência.

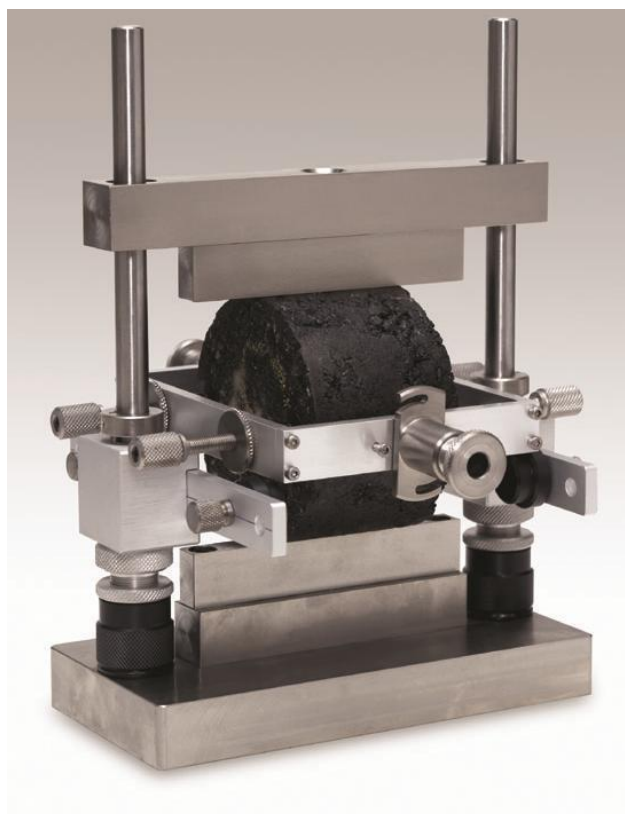


Figura 2.2: Emprego de frisos metálicos para aplicar o carregamento diametral em CPs cilíndricos tipo Marshall (FONTE: IPC-Global, 2015)

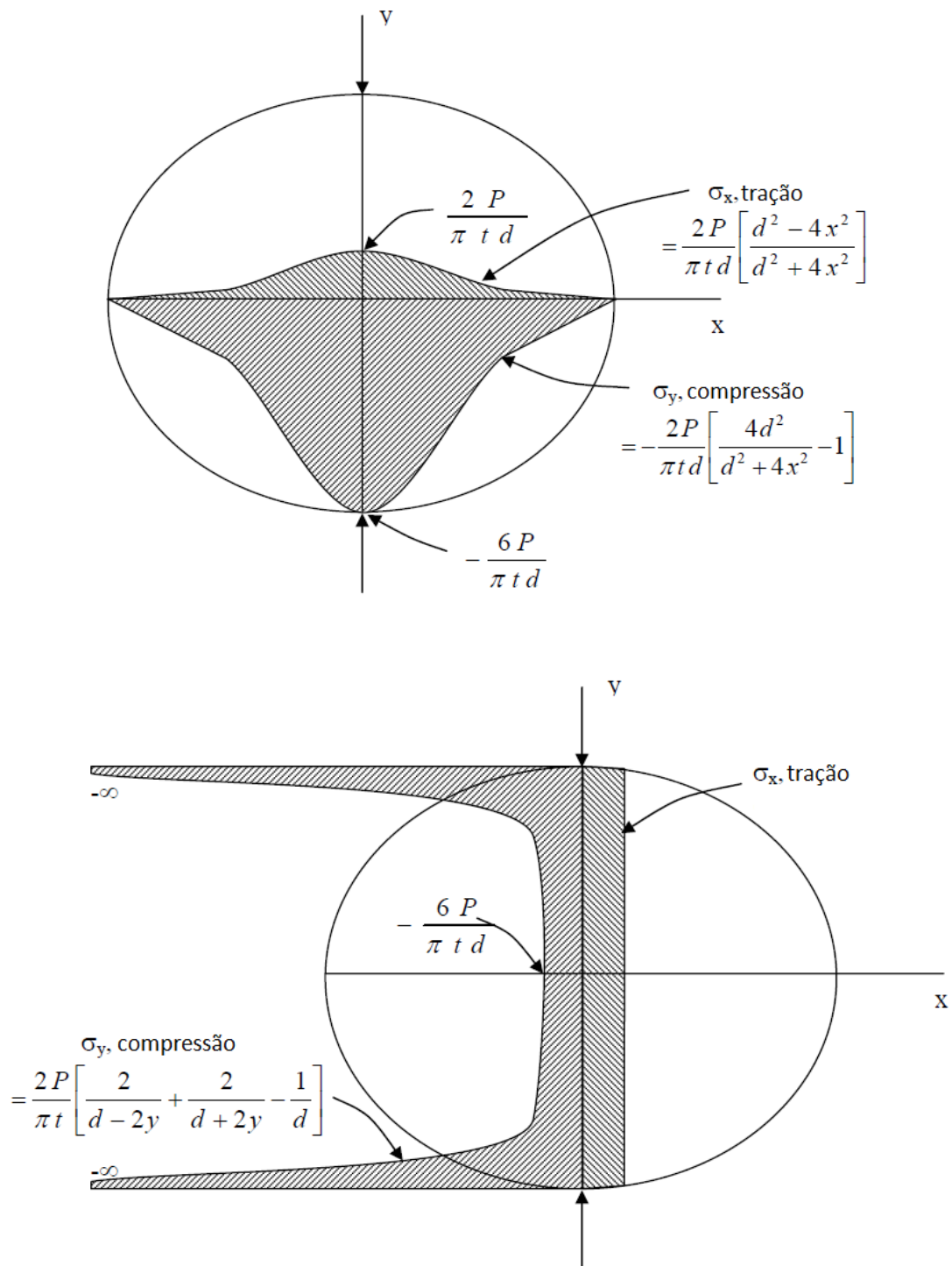


Figura 2.3: Distribuição teórica das tensões de tração e compressão nos planos diametraais do corpo cilíndrico durante o ensaio de compressão diametral

Timoshenko e Goodier (1951) estudaram inicialmente a distribuição de tensões dentro de um disco comprimido por duas cargas pontuais opostas. Posteriormente Hondros (1959) analisou o efeito do carregamento diametral por meio dos frisos curvos e estreitos e obteve as Equações 2.3 a 2.6 para descrever as tensões no diâmetro vertical e horizontal.

$$\sigma_x(x) = \frac{2P}{\pi ad} \left[ \frac{\frac{1-x^2}{R^2} \sin 2\alpha}{\frac{1+2x^2}{R^2 \cos 2\alpha} + \frac{x^4}{R^4}} - \arctan \left( \frac{\frac{1-x^2}{R^2}}{\frac{1+x^2}{R^2}} \tan \alpha \right) \right] \quad \text{Equação 2.3}$$

$$\sigma_y(x) = -\frac{2P}{\pi ad} \left[ \frac{\frac{1-x^2}{R^2} \sin 2\alpha}{\frac{1+2x^2}{R^2 \cos 2\alpha} + \frac{x^4}{R^4}} + \arctan \left( \frac{\frac{1-x^2}{R^2}}{\frac{1+x^2}{R^2}} \tan \alpha \right) \right] \quad \text{Equação 2.4}$$

$$\sigma_x(y) = \frac{2P}{\pi ad} \left[ \frac{\frac{1-y^2}{R^2} \sin 2\alpha}{\frac{1+2y^2}{R^2 \cos 2\alpha} + \frac{y^4}{R^4}} - \arctan \left( \frac{\frac{1+y^2}{R^2}}{\frac{1-y^2}{R^2}} \tan \alpha \right) \right] \quad \text{Equação 2.5}$$

$$\sigma_y(y) = -\frac{2P}{\pi ad} \left[ \frac{\frac{1-y^2}{R^2} \sin 2\alpha}{\frac{1+2y^2}{R^2 \cos 2\alpha} + \frac{y^4}{R^4}} + \arctan \left( \frac{\frac{1+y^2}{R^2}}{\frac{1-y^2}{R^2}} \tan \alpha \right) \right] \quad \text{Equação 2.6}$$

Onde:  $\sigma$  = tensão ao longo do diâmetro vertical e do diâmetro horizontal;

$P$  = carregamento aplicado;

$a$  = largura do friso;

$d$  = altura do corpo de prova;

$R$  = raio do corpo de prova;

$\alpha$  = ângulo radial formado pelo carregamento no friso.

Para o cálculo do módulo de resiliência (MR) do concreto asfáltico, Schmidt (1972) adaptou a solução de Hondros (195), resultando a Equação 2.7.

$$MR = \frac{P(\mu+0,2732)}{t\Delta} \quad \text{Equação 2.7}$$

Onde: MR = módulo de elasticidade, assumida de ser igual ao módulo de resiliência;

$\mu$  = coeficiente de Poisson;

t = altura do corpo de prova;

$\Delta$  = deslocamento horizontal total.

Na Equação 2.7 proposta por Schmidt (1972) o coeficiente de Poisson deve ser conhecido e esse autor sugeriu o emprego de 0,35. Segundo Pinto e Preussler (2001), o coeficiente de Poisson de 0,25 a 0,30 pode ser atribuído às misturas asfálticas.

Heinicke e Vinson (1988) também desenvolveram equações para calcular o módulo de resiliência e o coeficiente de Poisson, assumindo condições de material homogêneo e isotrópico. As Equações 2.8 e 2.9, propostas por esses pesquisadores, são recomendadas pelo SHRP (*Strategic Highway Research Program*).

$$MR = \frac{P}{H \cdot t} (\mu + 0,27) \quad \text{Equação 2.8}$$

$$\mu = \frac{-3,59 - 0,27 \left( \frac{V}{H} \right)}{-0,063 + \left( \frac{V}{H} \right)} \quad \text{Equação 2.9}$$

A deformação na tração ( $\varepsilon_t$ ) no centro do corpo de prova cilíndrico pode ser calculada pela Equação 2.10.

$$\varepsilon_t = \left( \frac{0,16 + 0,48\mu}{0,27 + \mu} \right) H \quad \text{Equação 2.10}$$

As Equações 2.8, 2.9 e 2.10 são válidas apenas para corpos de prova de 100mm de diâmetro e foram verificadas por análise de elemento finito, considerando dos modelos bi-dimensionais e dos modelos tri-dimensionais. Os resultados indicaram que o ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral representado adequadamente pela teoria elástica e pela hipótese de resposta no plano de tensão. Neste caso, atribuir um valor específico no coeficiente de Poisson teve um efeito muito pequeno na precisão dos resultados de módulo de resiliência. Os resultados também indicam que existe uma dependência do módulo de resiliência no nível de deformação e essa dependência se

incrementa em temperaturas mais elevadas, o que pode ser atribuído à acentuação do comportamento viscoelástico da mistura asfáltica nessas temperaturas.

## 2.1.2. Normativas para execução do ensaio de MR

### 2.1.2.1. Normativa do DNIT

No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes estabelece na Norma DNIT 135/2010 – ME os procedimentos metodológicos para determinar o módulo de resiliência de misturas asfálticas na temperatura de 25°C.

De acordo com essa normativa os corpos de prova empregados no ensaio podem ser moldados em laboratório ou retirados diretamente da pista por extração, por meio de sonda rotativa, com altura entre 35mm e 65mm e diâmetro de  $100 \pm 2$ mm. Nessa normativa não se especifica uma tolerância relacionada ao volume de vazios que deve ser utilizado para a moldagem dos CPs.

Para execução do ensaio se recomenda um sistema pneumático de carregamento e um sistema de medição de deformação da amostra constituídos por LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*).

A Equação 2.11 é recomendada na DNIT 135/2010 –ME para realizar os cálculos do módulo de resiliência com os resultados obtidos no sistema de aquisição de dados durante o ensaio.

$$MR = \frac{F}{100\Delta H} (0,9976\mu + 0,2692) \quad \text{Equação 2.11}$$

Onde: MR = módulo de resiliência em MPa;

F = carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova, em N;

$\Delta$  = deformação elástica ou resiliente registrada no microcomputador, para aplicações da carga (F), em cm;

H = altura do corpo de prova, em cm.

Nessa normativa não se especifica o critério que deve ser utilizado para selecionar o nível de carregamento utilizado no ensaio. Tampouco se faz referência da necessidade de pré-condicionamento do corpo de prova para execução do ensaio nem do número de ciclos necessário para determinar o MR.

Contudo, na versão da norma do DNER-ME 133/94 se recomendava executar uma fase de condicionamento do CP por meio da aplicação de 200 vezes um carregamento cíclico de modo a se

obter uma tensão menor ou igual a 30% da resistência à tração determinada no ensaio de compressão diametral estático. A frequência recomendada para o ensaio era de 1Hz, com aplicação da carga durante 0,1s e descanso de 0,9s, conforme ilustra a Figura 2.4.

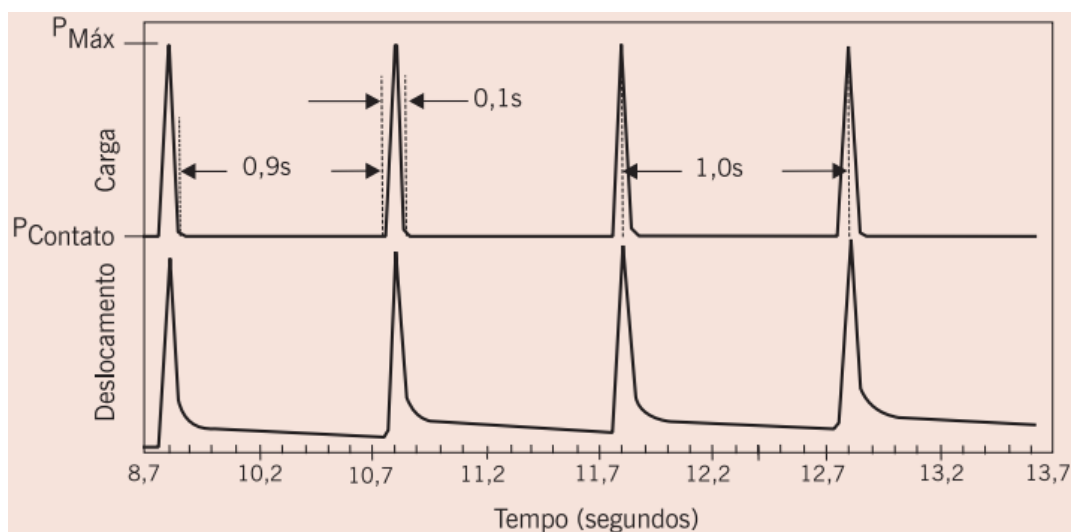


Figura 2.4: duração dos tempos de carregamento e repouso. FONTE: Bernucci et al. (2008)

A DNER-ME 133/94 recomenda empregar o coeficiente de Poisson de 0,30 e calcular o MR como a média do valor obtido a 300, 400 e 500 aplicações de carga.

Segundo Bernucci et al. (2008), mesmo em ensaios conduzidos com carregamento de 5% da tensão de ruptura, ainda são perceptíveis deslocamentos plásticos (deslocamento permanente ilustrado na Figura 2.5) que não devem ser contabilizados no cálculo do MR.

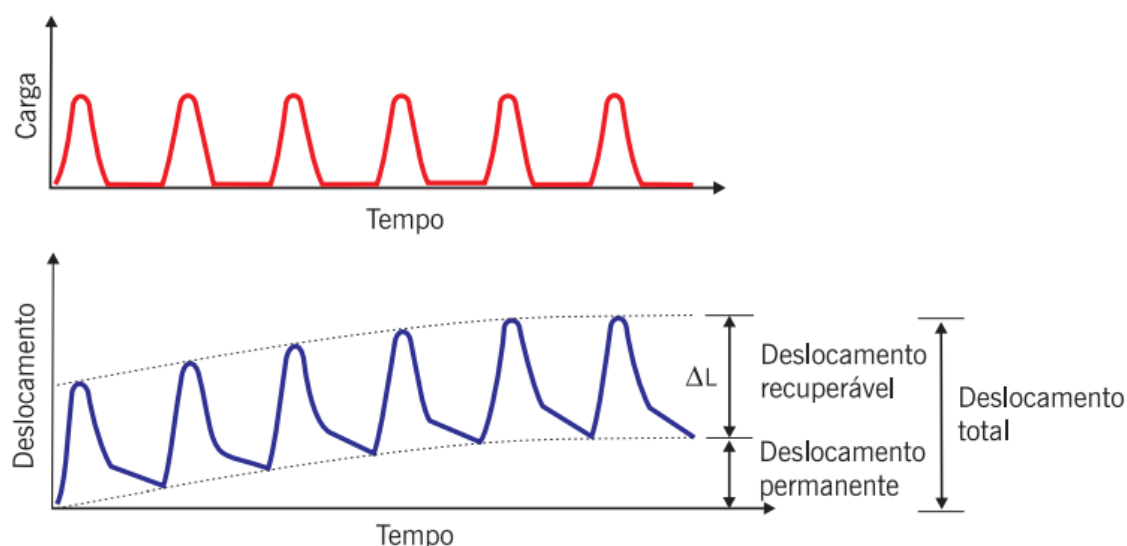


Figura 2.5: Parcelas dos deslocamentos resilientes e permanentes registrados durante os ensaios de módulo de resiliência. FONTE: Bernucci et al. (2008)

### 2.1.2.2. Normativas Norteamericanas

A *American Society for Testing and Materials* apresenta duas normativas para determinação do módulo de resiliência de misturas asfálticas. A ASTM D4123-82 estabelece execução do ensaio de MR por carregamento diametral com determinação dos deslocamentos horizontais, enquanto que a ASTM D7369-09 recomenda a obtenção dos deslocamentos horizontais e verticais. O ensaio é mais conhecido como *IDT*, do inglês *Indirect Tensile Test*.

Nessa normativa não é necessário assumir o valor do coeficiente de Poisson e de posse dos deslocamentos horizontais e verticais obtidos no ensaio pode-se calcular o valor do coeficiente pela Equação 2.12.

$$\mu = \frac{-1,0695 - 0,2339 \frac{\delta_v}{\delta_h}}{0,3074 + 0,7801 \frac{\delta_v}{\delta_h}} \quad \text{Equação 2.12}$$

Onde:  $\delta_h$ ,  $\delta_v$  = deslocamentos horizontais e verticais, respectivamente, medidos em uma faixa correspondente a três quartos do diâmetro do corpo de prova.

O ensaio pode ser executado em corpos de prova com diâmetro de  $101,6 \pm 3,8\text{mm}$  ou  $152,4 \pm 9\text{mm}$  e altura de 38,1mm até 63,5mm. Os CPs podem ser obtidos por sondagem em pista ou moldados em laboratório com o compactador Marshall ou com o compactador Giratório.

A temperatura para determinação do MR pode ser fixada em 5°C, 15°C, 20°C e 25°C, para uma frequência pré-determinada. Os CPs devem ser condicionados na temperatura alvejada durante no mínimo 6 horas.

O carregamento empregado para o ensaio deve ser em torno de 10% até 20% da resistência à tração da mistura asfáltica, previamente determinada em um corpo de prova com as mesmas características do material que está sendo avaliado. O pulso de carga deve ter a forma da função  $\frac{1 - \cos(\phi)}{2}$  (*Haversine Function*), mostrada na Figura 2.6, que de acordo a diversos estudos simula adequadamente o carregamento decorrente da passagem dos pneus dos veículos no pavimento.

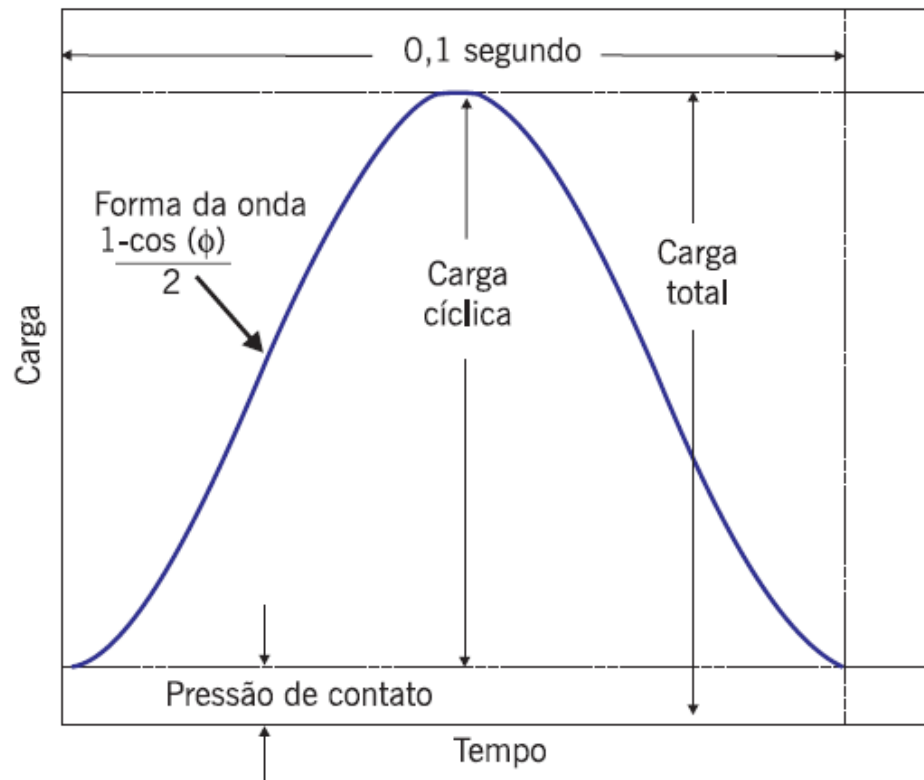


Figura 2.6: Forma do pulso de carregamento adaptado de NCHRP-285.

FONTE: Bernucci et al. (2008)

A normativa ASTM 7369-09 recomenda realizar o carregamento diametral inicialmente em um eixo do corpo de prova cilíndrico e após girar o CP 90° e repetir o ensaio. Esse carregamento cíclico deve ser aplicado 100 vezes a modo de pré-condicionamento do CP, mas o número de ciclos necessário para determinação do MR deve ser o suficiente para obter cinco ciclos estáveis consecutivos com erro inferior a 1%. Nessa normativa, os deslocamentos são subdivididos em instantâneos e totais, conforme ilustra a Figura 2.7.



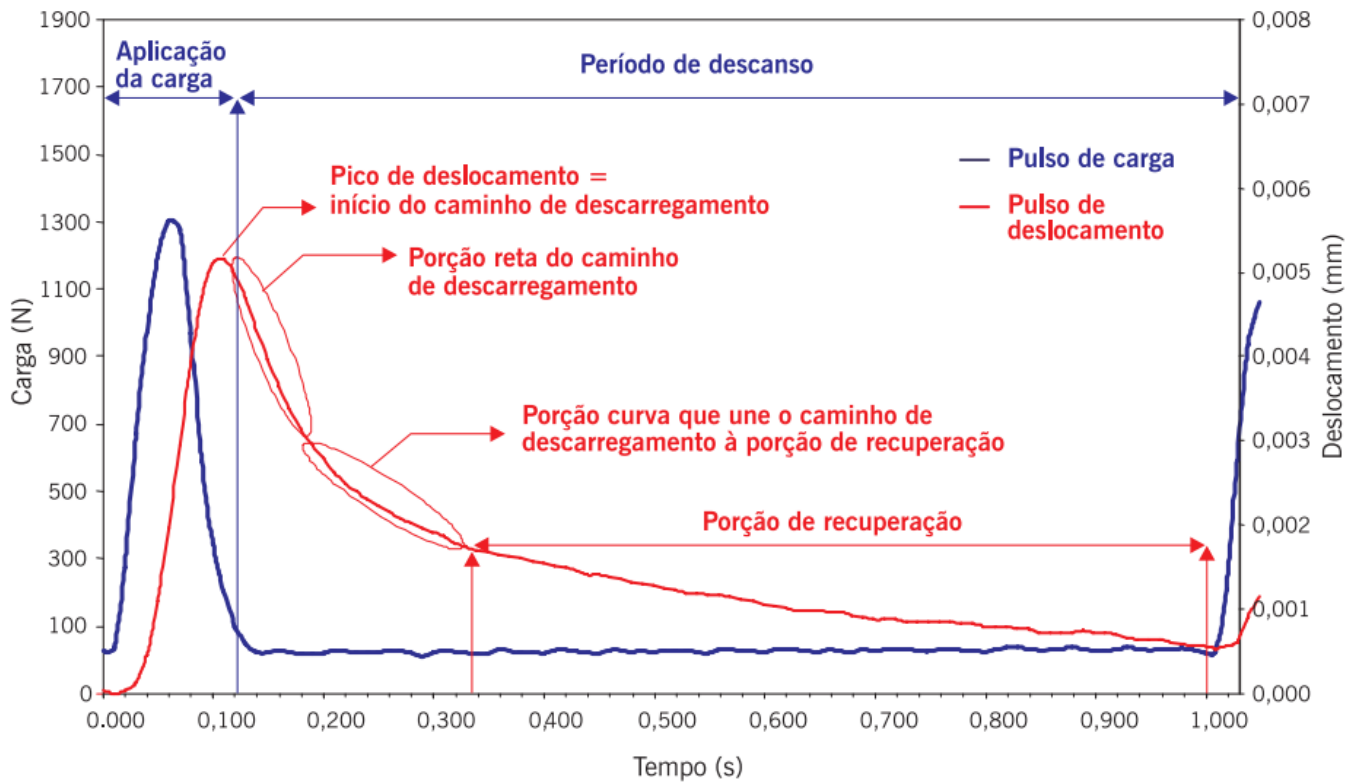


Figura 2.7: Subdivisões do pulso de deslocamento na norma ASTM7369-09.

FONTE: Bernucci et al. (2008)

Segundo explicação de Bernucci et al. (2008), para os deslocamentos instantâneos são determinadas as regressões para as três porções da curva de deslocamento, conforme descrito a seguir e na Figura 2.8:

- regressão linear na porção reta do caminho de descarregamento;
- regressão na porção curva que liga o caminho de descarregamento à porção de recuperação de modo a se obter uma equação hiperbólica do tipo  $y = a + \frac{b}{x}$ ;
- regressão na porção de recuperação nos intervalos de 40% a 90% (intervalo recomendado) do período de descanso de maneira a produzir uma equação hiperbólica. Uma tangente a esta hipérbole deve ser obtida no ponto correspondente a 55% (ponto recomendado) do período de descanso.

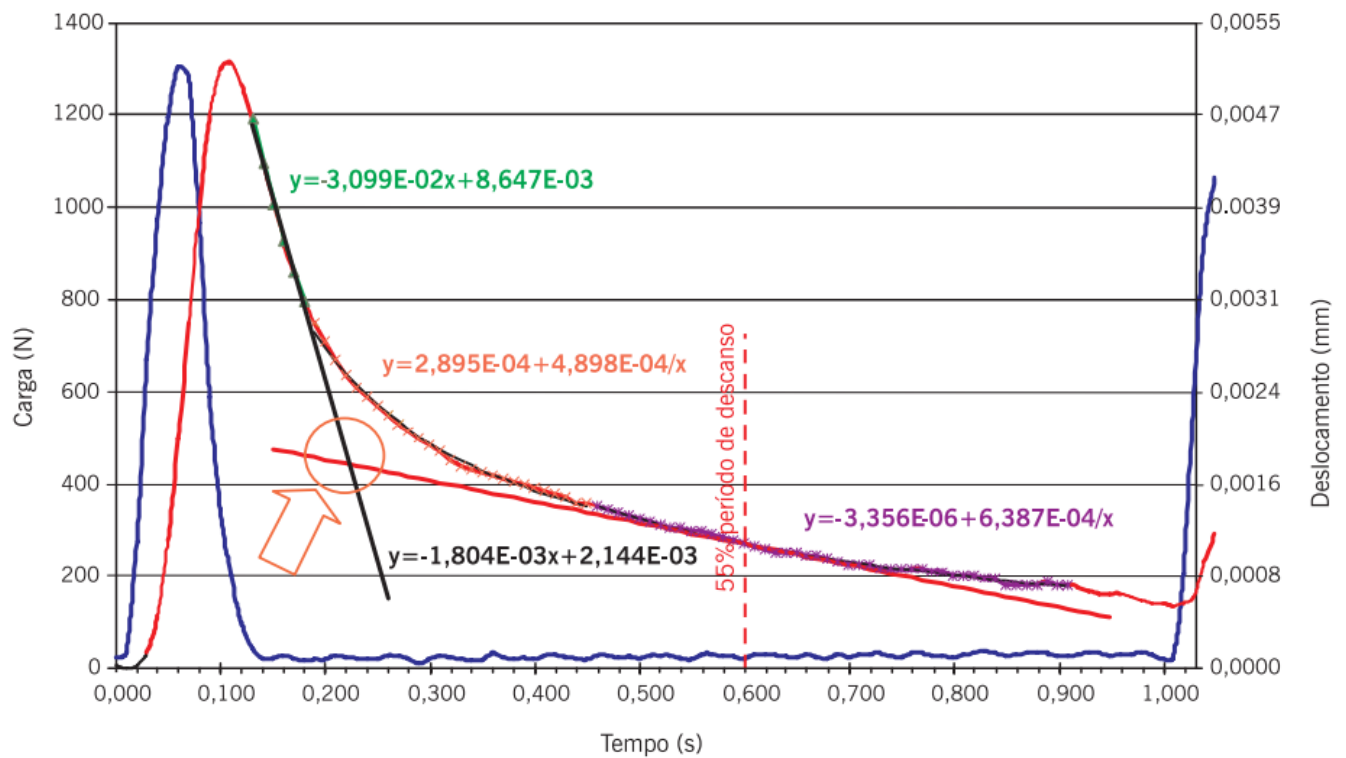


Figura 2.8: Regressões das porções de descarregamento do pulso de deslocamento.

FONTE: Bernucci et al. (2008)

As duas equações lineares da Figura 2.8 são resolvidas para determinação do ponto de interseção. O ponto na curva hiperbólica correspondente ao tempo coordenado (valor no eixo x) da interseção é selecionado para determinar o deslocamento instantâneo pela subtração do pico de deslocamento, como mostra a Figura 2.9. O cálculo do deslocamento total consiste em medir-se o valor obtido através da média dos valores de deslocamento no período de 85% e 95% do período de descanso, pelo pico de deslocamento (Figura 2.10).

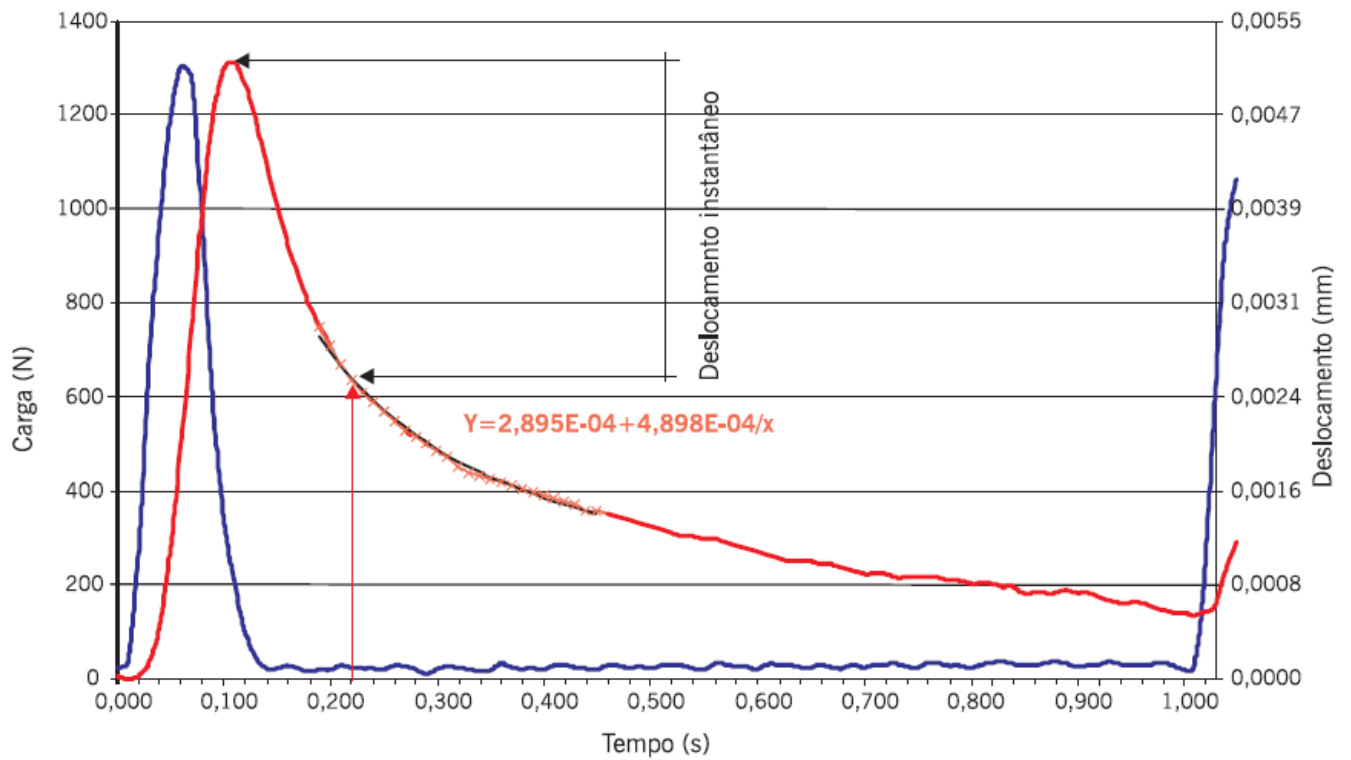


Figura 2.9: Deslocamento resiliente instantâneo. FONTE: Bernucci et al. (2008)

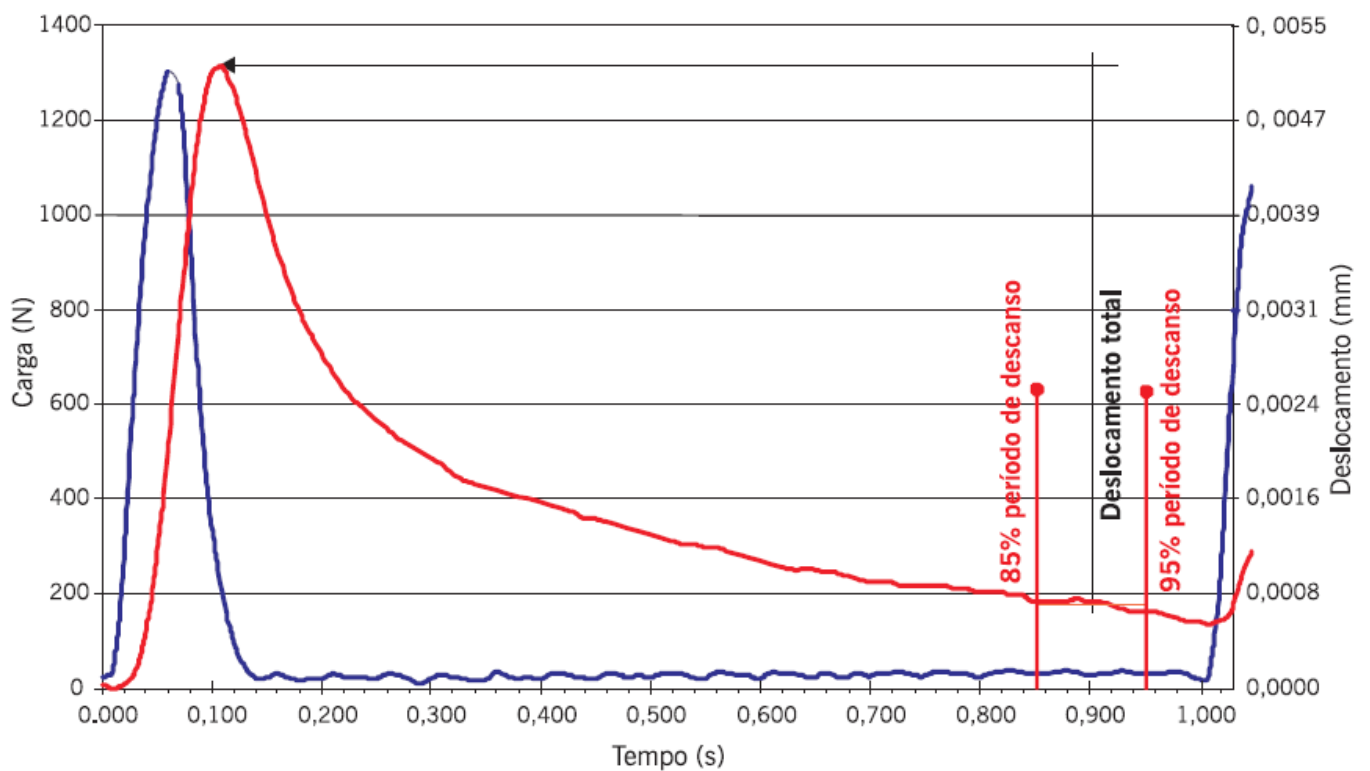


Figura 2.10: Deslocamento resiliente total. FONTE: Bernucci et al. (2008)

Obtidos os deslocamentos instantâneos e totais durante o ensaio, determina-se o módulo de resiliência instantâneo e o módulo de resiliência total. Quanto mais próximos forem estes dois módulos, mais rápida é a recuperação elástica do material, quando submetido à ação de cargas (Brito, 2006).

Na normativa americana AASHTO TP31 também se estabelece a determinação do módulo de resiliência de misturas asfálticas em corpos de prova cilíndricos tipo Marshall. Basicamente não existem grandes mudanças com relação à normativa ASTM 7369-09. Recomenda-se também a aquisição de deslocamentos na direção horizontal e na direção vertical, conforme ilustra a Figura 2.11.



Figura 2.11: Aquisição dos deslocamentos horizontais e verticais durante o ensaio de módulo de resiliência. FONTE: IPC Global (2015)

### 2.1.2.3. Normativa Australiana

Na Austrália a determinação do Módulo de Resiliência do concreto asfáltico é normatizado pela *AS/NZS 2891.13.1:2013 Method 13.1: Determination of the resilient modulus of asphalt – Indirect tensile method*. Nessa normativa o ensaio é executado por carregamento cíclico diametral e os deslocamentos são medidos na direção horizontal.

A AUSTRROADS (2008) recomenda que os CPs para o ensaio tenham de 35mm a 70mm de altura e  $100 \pm 2$ mm de diâmetro, caso a mistura asfáltica testada tenha diâmetro máximo de 20mm. Se os CPs testados são moldados em laboratório recomenda-se o volume de vazios de  $5 \pm 0,5\%$ . Dados daquele

estudo indicam que incrementos de 1% de volume de vazios implicam na redução de aproximadamente 350MPa.

Definida a temperatura do ensaio, é recomendado condicionar os corpos de prova em câmara capaz de conservar a temperatura durante pelo menos duas horas. O carregamento empregado deve ser tal que no CP seja registrado um nível de deformação horizontal de  $40\mu\epsilon$ , durante pelo menos cinco ciclos. Também recomenda-se realizar um pré-condicionamento de no mínimo cinco pulsos. Na Figura 2.12 é apresentada uma ilustração das condições de carregamento no ensaio australiano.

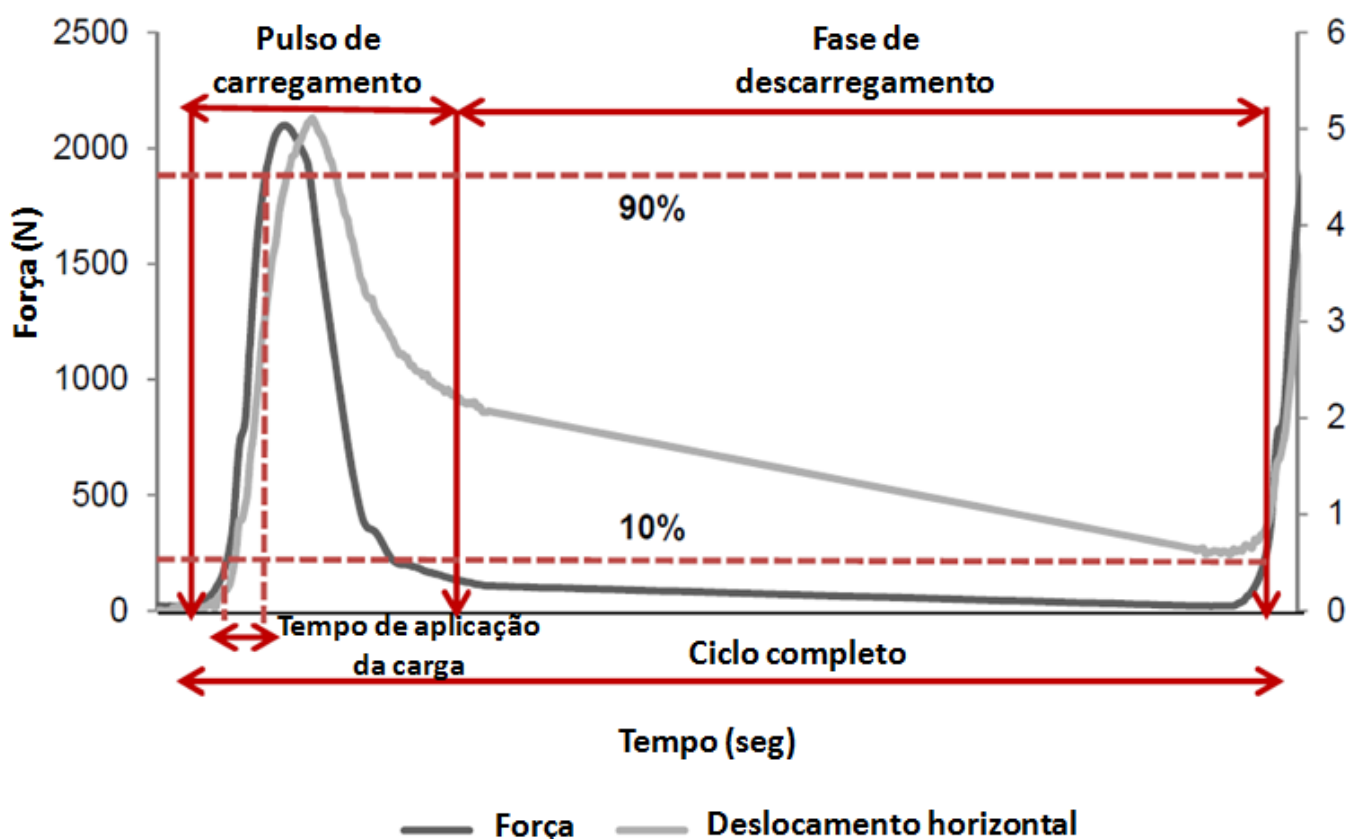


Figura 2.12: ciclo de carregamento e descarregamento no ensaio de módulo de resiliência australiano. FONTE: Kumlai et al. (2014)

### 2.1.3. Fatores que afetam o módulo de resiliência

São vários os fatores que podem influenciar nos resultados do módulo de resiliência de misturas asfálticas. Na continuação são relacionados os fatores principais de acordo com a bibliográfica consultada neste estudo.

### 2.1.3.1. Efeito dos agregados e granulometria

Desde os primeiros estudos e sistemáticas de dosagem de misturas asfálticas foi reconhecido que os agregados influenciam suas características volumétricas e mecânicas. De acordo com Prowell et al. (2005), a granulometria influencia a rigidez, a estabilidade, a durabilidade, a permeabilidade, a trabalhabilidade, a resistência à fadiga e ao dano por umidade.

Atualmente existem diversos tipos de misturas asfálticas empregadas nos revestimentos dos pavimentos flexíveis. As misturas asfálticas densas ou bem graduadas são utilizadas como camadas de bases e revestimentos com função estrutural e as misturas asfálticas descontínuas são normalmente usadas como revestimentos funcionais, com a finalidade de melhorar o conforto ao rolamento, o atrito, a drenagem superficial e a redução de ruído.

As misturas asfálticas densas ou bem graduadas apresentam uma distribuição granulométrica contínua, com um esqueleto mineral com poucos vazios, visto que os grãos de dimensões menores preenchem os vazios dos grãos maiores.

As misturas asfálticas de granulometria descontínua apresentam na sua composição o excesso de grãos de um mesmo tamanho ou podem não apresentar a presença de grãos de um determinado tamanho. Misturas asfálticas do tipo *gap-graded*, *open-graded* e SMA (*stone matrix asphalt*), por exemplo, são consideradas misturas asfálticas descontínuas.

De modo geral, nas misturas asfálticas densas obtém-se uma maior densificação do material e, conseqüentemente, a rigidez é superior à observada em misturas asfálticas de graduação descontínua, (LAY, 2009; ONGEL, 2007).

Com relação aos agregados graúdos, o tamanho máximo nominal (TMN) é um fator influente na rigidez das misturas asfálticas. De modo geral, misturas asfálticas mais graúdas tendem a demandar teores de ligante asfáltico inferiores, quando comparadas com misturas asfálticas de granulometria mais fina. Essa tendência se traduz em misturas asfálticas mais rígidas conforme aumenta o tamanho máximo nominal. Kumlai et al. (2014), por exemplo, testaram três misturas asfálticas com TMN de 7mm, 10mm e 14mm e notaram que conforme o TMN aumenta, o módulo de resiliência da mistura asfáltica também se incrementa.

Os agregados finos e o fíler também influenciam diretamente na rigidez das misturas asfálticas. Esses finos, componentes da mistura asfáltica, modificam as propriedades do ligante asfáltico ao associar-se com ele formando o denominado morteiro asfáltico ou mastic asfáltico. Muitas pesquisas ao

redor do mundo e no Brasil se desenvolveram para avaliar o efeito dos agregados finos e do fíler no comportamento mecânico das misturas asfálticas. Kandhal e Parker (1998) e Kandhal (2001) realizaram uma síntese dos principais efeitos do fíler mineral no desempenho das misturas asfálticas:

- De acordo com o tamanho das partículas, os finos podem atuar como fíler ou como extensores do ligante asfáltico. No último caso, uma mistura asfáltica rica em asfalto pode correr o risco de exsudar e deformar. Em muitos casos, o teor de ligante asfáltico pode ser reduzido para prevenir a perda de estabilidade ou a exsudação.
- Alguns finos podem ter influência significativa no ligante asfáltico, atuando como um agente enrijecedor e modificando o comportamento do concreto asfáltico com relação à fratura.
- Alguns finos podem induzir a misturas asfálticas mais suscetíveis ao dano por umidade induzida.

Bardini (2013) desenvolveu um estudo para avaliar o efeito de diversos tipos e teores de fíleres nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas. Os fíleres utilizados por essa pesquisadora foram o calcário, a sílica, o cimento Portland e a cal hidratada. O emprego de fíleres ativos, do tipo cimento Portland e cal hidratada, produziu misturas asfálticas com os maiores valores de módulo de resiliência naquele estudo.

#### **2.1.3.2. Efeito do tipo e do teor de ligante asfáltico**

O ligante asfáltico também é um fator influente nos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas. Nas últimas décadas, a mudança nos esquemas de refino de petróleo e o emprego de modificadores tais como polímero, borracha de pneu moída ou outros, modificaram as características dos ligantes asfálticos e, portanto, as propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

Os ligantes asfálticos convencionais, no Brasil, são comumente caracterizados pela dureza à luz do ensaio de penetração (NBR 6576), sendo o CAP 30/45 e o CAP 50/70 os mais comumente utilizados. Muitos estudos foram desenvolvidos no país fazendo uso desses ligantes asfálticos para avaliar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas. De modo geral, inúmeras pesquisas demonstraram que o emprego de ligantes asfálticos mais duros, de penetração inferior, incrementa o módulo de resiliência das misturas asfálticas, (ABCR, 2008; BERNUCCI et al. 2008).

A modificação dos ligantes asfálticos teve sua origem na necessidade de melhorar as características relacionadas à termo-sensibilidade, elasticidade e durabilidade. Os asfaltos modificados por polímeros comumente empregados para modificar os ligantes asfálticos podem ser classificados em:

- Termorrígidos, tais como resina epóxi, poliéster, poliuretano.
- Termoplásticos, por exemplo o polietileno, polipropileno, PVC.
- Elastômeros, com o SBR (borracha estireno butadieno).
- Elastômeros termoplásticos, como o SBS (estireno butadieno estireno) e o EVA (etileno de acetato de vinila).

No Brasil, o polímero do tipo SBS é o mais utilizado para modificar ligantes asfálticos usados em misturas asfálticas usinadas à quente. O emprego desse tipo de ligantes asfálticos modificados por polímero tende a produzir misturas asfálticas com rigidez inferior, nas temperaturas intermediárias. Contudo, para temperaturas mais elevadas a rigidez dessas misturas asfálticas tende a ser superior do que em misturas asfálticas com ligantes asfálticos convencionais, (Kim, 2003; Ping, 2013).

O emprego de ligante asfáltico modificado por borracha moída de pneus também modifica as propriedades volumétricas e mecânicas das misturas asfálticas. O incremento da viscosidade do asfalto borracha demanda teores mais elevados nas misturas asfálticas e, sabe-se que conforme o teor das misturas asfálticas aumenta, a rigidez é diminuída, (De Cezaro, 2008; Specht, 2004).

Os ligantes asfálticos duros têm sido utilizados nos últimos anos em algumas Rodovias do país, como por exemplo a Rodovia Presidente Dutra. Esse material caracteriza-se por apresentar penetração de 10 a 25dmm e ponto de amolecimento superior a 63°C. O módulo de resiliência de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos duros usualmente é superior a 10.000MPa, (Assis, 2012; Pereira, 2012).

#### **2.1.3.3. Estudos desenvolvidos no Brasil**

O módulo de resiliência diametral é o ensaio que tem sido mais utilizado no país por diversos centros de pesquisas e universidades. Neste estudo realizou-se um levantamento bibliográfico das principais pesquisas que empregaram este ensaio para avaliar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas. As seguintes universidades foram as que apresentaram maior número de estudos:

- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP)
- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP-USP)
- Universidade Federal do Ceará (UFC)
- Universidade Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS)
- Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Esse levantamento bibliográfico é apresentado no formato de tabelas a seguir.



Tabela 2.1: Valores de MR e RT obtidos em pesquisas da EESC-USP

| Fonte                | Agregados      |               | Ligante Asfáltico |                                   |          | Projeto de Mistura |                  |                              |                  | Parâmetros Mecânicos |               |
|----------------------|----------------|---------------|-------------------|-----------------------------------|----------|--------------------|------------------|------------------------------|------------------|----------------------|---------------|
|                      | Faixa Gran.    | Fonte Mineral | Tipo              | Modificador                       | Teor (%) | Aditivo            | Volume de Vazios | Produção da Mistura Afáltica | Moldagem dos CPs | MR 25°C (MPa)        | RT 25°C (MPa) |
| Furlan (2006)        | Faixa "C" DNIT | Basalto       | CAP 20            |                                   | 5,50%    |                    | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall         | 5.782                | 1,48          |
|                      |                |               |                   |                                   | 1% Cal   |                    |                  | 8.138                        | 1,63             |                      |               |
|                      |                | Granito       |                   |                                   | 5,50%    |                    | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall         | 6.891                | 1,66          |
|                      |                |               |                   |                                   | 1% Cal   |                    |                  | 8.839                        | 1,62             |                      |               |
|                      |                | Gabro         |                   |                                   | 5,50%    |                    | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall         | 7.461                | 1,74          |
|                      |                |               |                   |                                   | 1% Cal   |                    |                  | 9.195                        | 1,78             |                      |               |
|                      | Faixa "C" DNIT | Basalto       | CAP 40            |                                   | 5,50%    |                    | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall         | 11.713               | 2,82          |
|                      |                |               |                   |                                   | 1% Cal   | 4,0%               | 13.041           |                              |                  | 2,91                 |               |
|                      |                | Granito       |                   |                                   | 5,50%    |                    | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall         | 13.797               | 2,49          |
|                      |                |               |                   |                                   | 1% Cal   | 4,0%               | 15.871           |                              |                  | 2,36                 |               |
| Anitelli (2013)      | Faixa "C" DNIT | Granito       | CAP 50/70         | SBS                               | 4,30%    |                    | 4,0%             | Laboratório                  | CGS              | 5.331                | 1,41          |
|                      |                |               |                   |                                   | 1% Cal   |                    |                  | 4.923                        | 1,40             |                      |               |
|                      |                |               | CAP 60/85         |                                   | 4,50%    |                    | 4,0%             | Laboratório                  | CGS              | 5.287                | 1,73          |
|                      |                |               |                   |                                   | 1% Cal   |                    |                  | 5.675                        | 1,62             |                      |               |
| Bardini (2008)       | Superpave 25mm | Basalto       | CAP 50/70         | -                                 | 5,85%    | 3,5% Fíler Mineral | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall         | 7.273                | 1,74          |
|                      |                |               |                   |                                   | 5,00%    | 6% Fíler Mineral   |                  |                              |                  | 8.022                | 1,58          |
|                      |                |               |                   | Cinza da queima de casca de pinus | 5,85%    | 3,5% Cinza         |                  |                              |                  | 6.280                | 1,45          |
|                      |                |               |                   |                                   | 5,00%    | 6% Cinza           |                  |                              |                  | 6.815                | 1,48          |
| Coutinho Neto (2004) | Faixa "C" DNIT | Basalto       |                   | Areia de Fundição                 | 5,20%    | 5% AF              | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall         | 9.000                | 1,60          |
|                      |                |               |                   |                                   | 5,50%    | 10% AF             |                  |                              |                  | 6.500                | 1,50          |
|                      |                |               |                   |                                   | 6,00%    | 15% AF             |                  |                              |                  | 6.000                | 1,30          |
| Cunha (2004)         | Bayley         | Basalto       | CAP-20            |                                   | 4,90%    |                    | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall         | 2.871                | 1,13          |
|                      | AZR            |               |                   |                                   | 4,90%    |                    |                  |                              |                  | 5.246                | 1,38          |
|                      | Bayley         | Gabro         |                   |                                   | 5,10%    |                    |                  |                              |                  | 3.597                | 1,19          |
|                      | AZR            |               |                   |                                   | 4,90%    |                    |                  |                              |                  | 5.514                | 1,39          |
| Gigante (2007)       | Faixa "C" DNIT | Basalto       | CAP-20            |                                   | 5,50%    |                    | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall         | 6.252                | 1,62          |
|                      |                |               |                   |                                   | 5,50%    | Cal                |                  |                              |                  | 6.911                | 1,68          |
|                      |                | Granito       |                   |                                   | 5,50%    |                    |                  |                              |                  | 9.431                | 1,71          |
|                      |                |               |                   |                                   | 5,50%    | Cal                |                  |                              |                  | 8.160                | 1,64          |
|                      |                | Gabro         |                   |                                   | 5,50%    |                    |                  |                              |                  | 7.093                | 1,90          |
|                      |                |               |                   |                                   | 5,50%    | Cal                |                  |                              |                  | 7.237                | 2,11          |
|                      |                | Basalto       | CAP 40            |                                   | 5,50%    |                    | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall         | 10.871               | 2,82          |
|                      |                |               |                   |                                   | 5,50%    | Cal                |                  |                              |                  | 13.516               | 2,89          |
|                      |                | Granito       |                   |                                   | 5,50%    |                    |                  |                              |                  | 12.915               | 2,49          |
|                      |                |               |                   |                                   | 5,50%    | Cal                |                  |                              |                  | 12.662               | 2,36          |
|                      |                | Gabro         |                   |                                   | 5,50%    |                    |                  |                              |                  | 12.088               | 2,50          |
|                      |                |               |                   |                                   | 5,50%    | Cal                |                  |                              |                  | 10.746               | 2,02          |

Tabela 2.1: Valores de MR e RT obtidos em pesquisas da EESC-USP (continuação 1)

| Fonte            | Agregados             |               | Ligante Asfáltico |                                |             | Projeto de Mistura |                  |                              |                       | Parâmetros Mecânicos |               |      |
|------------------|-----------------------|---------------|-------------------|--------------------------------|-------------|--------------------|------------------|------------------------------|-----------------------|----------------------|---------------|------|
|                  | Faixa Gran.           | Fonte Mineral | Tipo              | Modifi-<br>cador               | Teor (%)    | Aditivo            | Volume de Vazios | Produção da Mistura Afáltica | Molda-<br>gem dos CPs | MR 25°C (MPa)        | RT 25°C (MPa) |      |
| Ildefonso (2007) | Superpave 25mm        | Basalto       | CAP 50/70         | Resíduo EVA Indústria Calçados | 5,80%       | 2,5% EVA           | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall              | 6.033                | 1,23          |      |
|                  |                       |               |                   |                                | 5,80%       | 5,0% EVA           |                  |                              |                       | 6.686                | 1,14          |      |
|                  |                       |               |                   |                                | 5,80%       | 7,5% EVA           |                  |                              |                       | 6.585                | 1066,00       |      |
|                  |                       |               |                   |                                | 5,80%       | 10% EVA            |                  |                              |                       | 3.013                | 0,97          |      |
| El-Hage (2012)   | Faixa II-DER-SP       | Basalto       | CAP AMP 60/85     | SBS                            | 7,30%       |                    | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall 50g          | 3.251                | 1,24          |      |
|                  | 7,30%                 |               |                   |                                |             | Giratório 69g      |                  |                              | 2.738                 | 1,01                 |               |      |
|                  | 6,80%                 |               |                   |                                |             | Giratório 100g     |                  |                              | 3.099                 | 1,22                 |               |      |
|                  | Faixa TMN 12,5 AASHTO |               |                   |                                | Laboratório | Marshall 50g       |                  | 3.147                        | 1,26                  |                      |               |      |
|                  |                       |               |                   |                                |             | Giratório 77g      |                  | 2.668                        | 1,08                  |                      |               |      |
|                  |                       |               |                   |                                |             | Giratório 100g     |                  | 3.050                        | 1,12                  |                      |               |      |
| Bardini (2013)   | Superpave 25mm        | Granito       | CAP 50/70         |                                | 4,70%       | Cal Hidratada      | 4,0%             | Laboratório                  | Giratório             | 7.448                | 1,82          |      |
|                  |                       |               |                   |                                | 4,80%       | Cimento Portland   |                  |                              |                       | 6.845                | 1,97          |      |
|                  |                       |               |                   |                                | 4,80%       | Calcário           |                  |                              |                       | 6.458                | 1,84          |      |
|                  |                       | Basalto       |                   |                                | 4,80%       | Cal Hidratada      |                  |                              |                       | 6.460                | 1,97          |      |
|                  |                       |               |                   |                                | 4,90%       | Cimento Portland   |                  |                              |                       | 6.716                | 2,12          |      |
|                  |                       |               |                   |                                | 4,80%       | Calcário           |                  |                              |                       | 6.329                | 1,99          |      |
|                  |                       | Granito       | CAP 85/100        |                                | 4,70%       | Cal Hidratada      |                  |                              |                       | 4.779                | 1,03          |      |
|                  |                       |               |                   |                                | 4,70%       | Cimento Portland   |                  |                              |                       | 4.431                | 1,08          |      |
|                  |                       |               |                   |                                | 4,50%       | Calcário           |                  |                              |                       | 3.790                | 1,05          |      |
|                  |                       |               |                   |                                | Basalto     | 4,70%              |                  |                              |                       | Cal Hidratada        | 4.199         | 1,15 |
|                  |                       |               |                   |                                |             | 4,70%              |                  |                              |                       | Cimento Portland     | 3.851         | 1,21 |
|                  |                       |               |                   |                                |             | 4,50%              |                  |                              |                       | Calcário             | 4.069         | 1,18 |
| Greco (2004)     | Faixa "B" DNIT        | CAP 20        | -                 | 4,5                            | 4,00%       | Laboratório        | Marshall         | 11830                        | 1,75                  |                      |               |      |
|                  | Faixa "C" DNIT        |               |                   | 5                              |             |                    |                  | 3677                         | 1,97                  |                      |               |      |
|                  | Faixa "B" DNIT        | CAP AMP       | 4,5% SBS          | 4,5                            |             |                    |                  | 10729                        | 2,204                 |                      |               |      |
|                  | Faixa "C" DNIT        |               |                   | 5                              |             |                    |                  | 4908                         | 2,108                 |                      |               |      |
|                  | Faixa "B" DNIT        | CAP AB        | 20% Borracha      | 4,5                            |             |                    |                  | 14923                        | 1,773                 |                      |               |      |
|                  | Faixa "C" DNIT        |               |                   | 5                              |             |                    |                  | 4882                         | 1,745                 |                      |               |      |

Tabela 2.1: Valores de MR e RT obtidos em pesquisas da EESC-USP (continuação 2)

| Fonte          | Agregados                  |               | Ligante Asfáltico |                  |          | Projeto de Mistura |                  |                              |                       | Parâmetros Mecânicos |               |
|----------------|----------------------------|---------------|-------------------|------------------|----------|--------------------|------------------|------------------------------|-----------------------|----------------------|---------------|
|                | Faixa Gran.                | Fonte Mineral | Tipo              | Modifi-<br>cador | Teor (%) | Aditivo            | Volume de Vazios | Produção da Mistura Afáltica | Molda-<br>gem dos CPs | MR 25°C (MPa)        | RT 25°C (MPa) |
| Grande (2011)  | Mix IV-B Asphalt Institute |               | CAP 50/70         | -                | 4,6      |                    | 4,00%            | Laboratório                  | Giratório             | 5313                 | 1,67          |
|                |                            |               |                   | 0,6% PPA         |          |                    |                  |                              |                       | 5351                 | 1,73          |
|                |                            |               |                   | 1,2% PPA         |          |                    |                  |                              |                       | 8360                 | 1,94          |
|                |                            |               |                   | -                |          | 1,5% Cal           |                  |                              |                       | 5183                 | 1,46          |
|                |                            |               |                   | 0,6% PPA         |          | 1,5% Cal           |                  |                              |                       | 5995                 | 1,56          |
|                |                            |               |                   | 1,2% PPA         |          | 1,5% Cal           |                  |                              |                       | 6530                 | 1,88          |
|                |                            |               |                   | -                |          | 3,0% Cal           |                  |                              |                       | 5737                 | 1,42          |
|                |                            |               |                   | 0,6% PPA         |          | 3,0% Cal           |                  |                              |                       | 5513                 | 1,69          |
|                |                            |               |                   | 1,2% PPA         |          | 3,0% Cal           |                  |                              |                       | 5668                 | 1,74          |
|                |                            |               | CAP 50/70         | -                | 4,6      |                    | 7,00%            | Laboratório                  | Giratório             | 3352                 | 1,19          |
|                |                            |               |                   | 0,6% PPA         |          |                    |                  |                              |                       | 5517                 | 1,26          |
|                |                            |               |                   | 1,2% PPA         |          |                    |                  |                              |                       | 7649                 | 1,58          |
|                |                            |               |                   | -                |          | 1,5% Cal           |                  |                              |                       | 4489                 | 1,13          |
|                |                            |               |                   | 0,6% PPA         |          | 1,5% Cal           |                  |                              |                       | 5037                 | 1,12          |
|                |                            |               |                   | 1,2% PPA         |          | 1,5% Cal           |                  |                              |                       | 6068                 | 1,19          |
|                |                            |               |                   | -                |          | 3,0% Cal           |                  |                              |                       | 4095                 | 1,1           |
|                |                            |               |                   | 0,6% PPA         |          | 3,0% Cal           |                  |                              |                       | 4571                 | 1,2           |
|                |                            |               |                   | 1,2% PPA         |          | 3,0% Cal           |                  |                              |                       | 5044                 | 1,25          |
| Iwanaga (2007) | Faixa "C" DNIT             | Basalto       | CAP 20            |                  |          | -                  | 4,00%            | Laboratório                  | Marshall              | 5374                 | 1,6           |
|                |                            |               |                   |                  |          | Cal                |                  |                              |                       | 7163                 | 1,7           |
|                |                            | Granito       |                   |                  |          | -                  |                  |                              |                       | 6370                 | 1,7           |
|                |                            |               |                   |                  |          | Cal                |                  |                              |                       | 6705                 | 1,64          |
|                |                            | Gabro         | CAP 40            |                  |          | -                  |                  |                              |                       | 7367                 | 1,9           |
|                |                            |               |                   |                  |          | Cal                |                  |                              |                       | 9042                 | 2,1           |
|                |                            | Basalto       |                   |                  |          | -                  |                  |                              |                       | 11751                | 2,8           |
|                |                            | Granito       |                   |                  |          | -                  |                  |                              |                       | 13177                | 2,5           |

Tabela 2.2: Valores de MR e RT obtidos em pesquisas da EP-USP

| Fonte           | Agregados       |               | Ligante Asfáltico          |                                      |          | Projeto de Mistura |                  |                              |                  | Parâmetros Mecânicos |               |
|-----------------|-----------------|---------------|----------------------------|--------------------------------------|----------|--------------------|------------------|------------------------------|------------------|----------------------|---------------|
|                 | Faixa Gran.     | Fonte Mineral | Tipo                       | Modificador                          | Teor (%) | Aditivo            | Volume de Vazios | Produção da Mistura Afáltica | Moldagem dos CPs | MR 25°C (MPa)        | RT 25°C (MPa) |
| Pereira (2012)  | EME020          | Granito       | CAP Módulo Elevado A       |                                      | 5,50%    | Cal Hidratada      | 3,7%             | Laboratório                  | Marshall         | 4.926                | 2,40          |
|                 |                 |               | CAP Módulo Elevado B       |                                      | 4,80%    |                    | 3,7%             | Laboratório                  | Marshall         | 10.648               | 3,20          |
|                 |                 |               | CAP 30/45                  |                                      | 4,80%    |                    | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall         | 5.485                | 2,30          |
| Silva (2005)    | SMA 0/8S        | Granito       | CAP 20                     |                                      | 7,00%    |                    | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall         | 7.182                | 0,96          |
|                 |                 |               | CAP 50/60                  |                                      |          |                    |                  |                              |                  | 4.421                | 0,81          |
|                 |                 |               | AMP                        | 3,0% SBS                             |          |                    |                  |                              |                  | 4.886                | 0,92          |
|                 |                 |               | AMP                        | 6,5% SBS                             |          |                    |                  |                              |                  | 5.024                | 0,91          |
| Negrão (2006)   | Faixa III DERSA | Basalto       | CAP 20                     | 0,22% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> | 5,00%    |                    | 3,7%             | Laboratório                  | Marshall         | 5.961                | 1,23          |
|                 |                 |               | CAP 20 + 1,5% Polímero RET | 0,22% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> | 5,00%    |                    | 3,7%             |                              |                  | 5.900                | 1,58          |
|                 |                 |               | CAP 40                     | 0,22% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> | 5,10%    |                    | 3,8%             |                              |                  | 7.672                | 1,90          |
|                 |                 |               | CAP 40 + 1,0% Polímero RET | 0,22% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> | 5,10%    |                    | 3,8%             |                              |                  | 7.419                | 1,88          |
| Nogueira (2008) | Faixa C DNIT    | Granito       | CAP 50/70                  |                                      | 4,70%    | Cal Hidratada      | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall         | 5.528                | 1,34          |
|                 |                 |               |                            |                                      |          |                    |                  | Usina                        | Marshall         | 6.357                | 1,49          |
|                 |                 |               |                            |                                      |          |                    |                  | Usina                        | Campo            | 5.377                | 1,07          |
|                 |                 |               |                            |                                      | 4,40%    |                    | 3,9%             | Laboratório                  | Giratório        | 7.166                | 1,38          |
|                 |                 |               |                            |                                      |          |                    |                  | Usina                        | Giratório        | 5.682                | 1,33          |
|                 |                 |               |                            |                                      |          |                    |                  | Usina                        | Campo            | 3.340                | 0,8           |
|                 |                 |               | CAP 30/45                  |                                      | 5,00%    |                    | 4,1%             | Laboratório                  | Marshall         | 6.572                | 2,25          |
|                 |                 |               |                            |                                      |          |                    |                  | Usina                        | Marshall         | 9.358                | 2,19          |
|                 |                 |               |                            |                                      |          |                    |                  | Usina                        | Campo            | 6.247                | 1,26          |

Tabela 2.2: Valores de MR e RT obtidos em pesquisas da EP-USP (continuação 1)

| Fonte        | Agregados                |               | Ligante Asfáltico |             |          | Projeto de Mistura |                  |                              |                  | Parâmetros Mecânicos |               |
|--------------|--------------------------|---------------|-------------------|-------------|----------|--------------------|------------------|------------------------------|------------------|----------------------|---------------|
|              | Faixa Gran.              | Fonte Mineral | Tipo              | Modificador | Teor (%) | Aditivo            | Volume de Vazios | Produção da Mistura Afáltica | Moldagem dos CPs | MR 25°C (MPa)        | RT 25°C (MPa) |
| Motta (2011) | Faixa C DNIT             | Granito       | CAP 50/70         |             | 4,40%    | Cal Hidratada      | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall         |                      | 1,99          |
|              |                          |               |                   | Cecabase RT |          |                    |                  |                              |                  |                      | 1,44          |
|              | Faixa C DNIT             | Granito       | CAP 30/45         |             | 5,00%    |                    | 4,2%             |                              |                  | 3.791                | 1,90          |
|              |                          |               |                   | Gemul XT14  |          |                    |                  |                              |                  | 2.942                | 1,39          |
|              | Gap Graded Caltrans 3/8" | Basalto       | CAP Borracha      |             | 6,50%    |                    | 5,1%             |                              |                  | 2.125                | 1,01          |
|              |                          |               |                   | Gemul XT14  |          |                    |                  |                              |                  | 2.014                | 0,92          |

Tabela 2.3: Valores de MR e RT obtidos em pesquisas da UFC

| Fonte                 | Agregados               |               | Ligante Asfáltico |                                |                        | Projeto de Mistura |                  |                              |                  | Parâmetros Mecânicos |               |       |             |      |             |          |       |      |
|-----------------------|-------------------------|---------------|-------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------|------------------|------------------------------|------------------|----------------------|---------------|-------|-------------|------|-------------|----------|-------|------|
|                       | Faixa Gran.             | Fonte Mineral | Tipo              | Modificador                    | Teor (%)               | Aditivo            | Volume de Vazios | Produção da Mistura Afáltica | Moldagem dos CPs | MR 25°C (MPa)        | RT 25°C (MPa) |       |             |      |             |          |       |      |
| Vasconcellos (2004)   | Faixa C DNIT Abaixo ZR  | Granito       | CAP 50/60         |                                | 5,90%                  | Cal Hidratada      | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall         | 2.660                | 1,13          |       |             |      |             |          |       |      |
|                       |                         |               |                   |                                | 6,40%                  |                    |                  |                              | Giratório        | 6.003                | 1,72          |       |             |      |             |          |       |      |
|                       | Faixa C DNIT Acima ZR   |               |                   |                                | 5,80%                  |                    |                  |                              | Marshall         | 3.506                | 1,07          |       |             |      |             |          |       |      |
|                       |                         |               |                   |                                | 6,40%                  |                    |                  |                              | Giratório        | 6.421                | 1,47          |       |             |      |             |          |       |      |
|                       | Faixa C DNIT Através ZR |               |                   |                                | 5,60%                  |                    |                  |                              | Marshall         | 3.326                | 1,28          |       |             |      |             |          |       |      |
|                       |                         |               |                   |                                | 6,10%                  |                    |                  |                              | Giratório        | 4.181                | 1,43          |       |             |      |             |          |       |      |
|                       | SMA 12,5mm              |               |                   |                                | 6,60%                  |                    |                  |                              | Marshall         |                      |               |       |             |      |             |          |       |      |
|                       |                         |               |                   |                                | 6,90%                  |                    |                  |                              | Giratório        | 4.747                | 0,98          |       |             |      |             |          |       |      |
|                       | SMA 9,5mm               |               |                   |                                | 7,10%                  |                    |                  |                              | Marshall         |                      |               |       |             |      |             |          |       |      |
|                       |                         |               |                   |                                | 7,20%                  |                    |                  |                              | Giratório        | 3.367                | 0,82          |       |             |      |             |          |       |      |
| Vale (2007)           | SMA 12,5mm              | Granito       | CAP 50/70         |                                | 6,20%                  | Cal Hidratada      | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall         | 3.423                | 0,56          |       |             |      |             |          |       |      |
|                       |                         |               |                   |                                | 5,90%                  |                    |                  |                              | Giratório        | 4.340                | 1,04          |       |             |      |             |          |       |      |
|                       |                         |               |                   | Fibras de Celulose VIATOP      | 5,80%                  |                    |                  |                              | Marshall         | 3.184                | 0,67          |       |             |      |             |          |       |      |
|                       |                         |               |                   |                                | 6,10%                  |                    |                  |                              | Giratório        | 4.111                | 1,14          |       |             |      |             |          |       |      |
|                       |                         |               |                   | Fibras de Coco                 | 6,10%                  |                    |                  |                              | Marshall         | 2.689                | 0,76          |       |             |      |             |          |       |      |
|                       |                         |               |                   |                                | 6,80%                  |                    |                  |                              | Giratório        | 4.003                | 1,11          |       |             |      |             |          |       |      |
|                       |                         |               |                   | Lima (2003)                    | Faixa C DNIT Abaixo ZR |                    |                  |                              | Granito          | CAP 50/60            |               | 6,00% |             | 4,3% | Laboratório | Marshall | 3.200 | 1,20 |
|                       |                         |               |                   |                                |                        |                    |                  |                              |                  |                      | 0,5% AR-75    | 5,80% | 10% Fresado | 4,0% |             |          | 4.776 | 1,30 |
| 0,8% AR-75            | 5,10%                   | 30% Fresado   | 4,4%              |                                |                        | 7.524              | 1,30             |                              |                  |                      |               |       |             |      |             |          |       |      |
| 1,2% AR-75            | 5,20%                   | 50% Fresado   | 3,7%              |                                |                        | 8.901              | 1,60             |                              |                  |                      |               |       |             |      |             |          |       |      |
| Oliveira Filho (2007) | SMA 12,5mm (I)          | Granito       | CAP 50/70         | 0,3% Fibras de Celulose VIATOP | 7,70%                  |                    | 4,0%             | Laboratório                  | Giratório        | 4.821                | 0,87          |       |             |      |             |          |       |      |
|                       | SMA 12,5mm (II)         |               |                   |                                | 6,80%                  |                    | 3,9%             |                              |                  | 3.745                | 1,10          |       |             |      |             |          |       |      |
|                       | SMA 12,5mm (III)        |               |                   |                                | 7,20%                  |                    | 3,2%             |                              |                  | 3.790                | 1,11          |       |             |      |             |          |       |      |
|                       | SMA 9,5mm               |               |                   | -                              | 6,80%                  |                    | 3,5%             |                              |                  | 3.351                | 1,17          |       |             |      |             |          |       |      |
|                       | SMA 4,75mm              |               |                   | -                              | 7,60%                  |                    | 3,9%             |                              |                  | 3.339                | 1,17          |       |             |      |             |          |       |      |

Tabela 2.3: Valores de MR e RT obtidos em pesquisas da UFC (continuação)

| Fonte           | Agregados    |               | Ligante Asfáltico |              |          | Projeto de Mistura |                  |                              |                  | Parâmetros Mecânicos |               |
|-----------------|--------------|---------------|-------------------|--------------|----------|--------------------|------------------|------------------------------|------------------|----------------------|---------------|
|                 | Faixa Gran.  | Fonte Mineral | Tipo              | Modificador  | Teor (%) | Aditivo            | Volume de Vazios | Produção da Mistura Afáltica | Moldagem dos CPs | MR 25°C (MPa)        | RT 25°C (MPa) |
| Pinheiro (2004) | Faixa C DNIT | Granito       | CAP-Borracha      | 20% Borracha | 6,60%    | Cal Hidratada      | 3,9%             | Laboratório                  | Giratório        | 5.472                | 1,70          |
|                 | CPA          |               |                   |              | 6,00%    |                    | 20,8%            |                              |                  | 1.723                | 0,42          |
|                 | SMA 0/11s    |               |                   |              | 7,20%    |                    | 3,7%             |                              |                  | 3.352                | 0,89          |

Tabela 2.4: Valores de MR e RT obtidos em pesquisas da UFRGS

| Fonte           | Agregados                  |               | Ligante Asfáltico |              |          | Projeto de Mistura |                  |                              |                    | Parâmetros Mecânicos |               |
|-----------------|----------------------------|---------------|-------------------|--------------|----------|--------------------|------------------|------------------------------|--------------------|----------------------|---------------|
|                 | Faixa Gran.                | Fonte Mineral | Tipo              | Modificador  | Teor (%) | Aditivo            | Volume de Vazios | Produção da Mistura Afáltica | Moldagem dos CPs   | MR 25°C (MPa)        | RT 25°C (MPa) |
| Azambuja (2004) | Faixa A - DAER (12,5mm)    | -             | CAP 50/60         | -            | 5,75%    | -                  | 4,0%             | Usina                        | Marshall 75 golpes | 4.361                | 0,94          |
| Bock (2012)     | Faixa "C" DNIT             | Basalto       | CAP 50/70         | -            | 4,60%    | -                  | 3,8%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 4.432                | 1,46          |
|                 | Faixa "C" DNIT             | Basalto       | CAP 50/70         | -            | 4,20%    | Cal Calcítica      | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 5.768                | 1,75          |
|                 | Faixa "C" DNIT             | Basalto       | CAP 50/70         | -            | 4,20%    | Cal Dolomítica     | 3,8%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 4.482                | 1,68          |
|                 | Faixa "C" DNIT             | Basalto       | CAP 60/85-E       | Elastomérico | 4,70%    | -                  | 4,7%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 3.755                | 1,63          |
|                 | Faixa "C" DNIT             | Basalto       | CAP 60/85-E       | Elastomérico | 4,50%    | Cal Calcítica      | 4,5%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 4.149                | 1,34          |
|                 | Faixa "C" DNIT             | Basalto       | CAP 60/85-E       | Elastomérico | 4,50%    | Dolomítica         | 4,5%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 3.333                | 1,40          |
| Cardoso (2002)  | Faixa B - Classe A DAER-RS | Basalto       | CAP 20            |              | 5,00%    |                    | 5,2%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 3.330                | 0,92          |
|                 | Faixa B - Classe A DAER-RS | Basalto       | BETUFLEX          | SBS (3%)     | 5,00%    |                    | 5,2%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 3.414                | 1,02          |
| Colpo (2014)    | Faixa "C" DNIT             | Basalto       | CAP 60/85         | Elastomérico | 5,50%    | -                  | 4,8%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 1.761                | 0,83          |
|                 | Faixa "C" DNIT             | Basalto       | Alto Módulo       | TLA-FLEX     | 5,10%    | -                  | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 5.182                | 1,59          |
| Da Silva (2012) | SMA Faixa "I" DER-SP       | -             | CAP 60/85         | Elastomérico | 5,60%    | CH-1               | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 3.353                | 1,13          |
|                 | SMA Faixa "I" DER-SP       | -             | CAP 60/85         | Elastomérico | 5,60%    | CH-1               | 4,0%             | Usina                        | Pista              | 4.588                | 1,13          |



Tabela 2.4: Valores de MR e RT obtidos em pesquisas da UFRGS (continuação 1)

| Fonte            | Agregados      |               | Ligante Asfáltico           |                                     |          | Projeto de Mistura |                  |                              |                    | Parâmetros Mecânicos |               |
|------------------|----------------|---------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------|--------------------|------------------|------------------------------|--------------------|----------------------|---------------|
|                  | Faixa Gran.    | Fonte Mineral | Tipo                        | Modificador                         | Teor (%) | Aditivo            | Volume de Vazios | Produção da Mistura Afáltica | Moldagem dos CPs   | MR 25°C (MPa)        | RT 25°C (MPa) |
| De Barros (2014) | Faixa "C" DNIT | -             | CAP 50/70                   | -                                   | 5,50%    | -                  | 4,2%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 3.407                | 0,61          |
|                  | Faixa "C" DNIT | -             | CAP 50/70 Morno             | Evotherm                            | 5,50%    | -                  | 4,2%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 3.477                | 0,82          |
|                  | Faixa "C" DNIT | -             | CAP 60/85-E                 | Elastomérico                        | 6,20%    | -                  | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 4.026                | 1,18          |
|                  | Faixa "C" DNIT | -             | CAP AB-8                    | Borracha de pneu moída              | 6,20%    | -                  | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 4.249                | 0,87          |
| De Castro (2011) | Faixa "C" DNIT | Basalto       | CAP 50/70                   |                                     | 4,60%    | -                  | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 4.432                | 1,46          |
|                  | Faixa "C" DNIT | Basalto       | CAP 50/70                   |                                     | 4,60%    | Cal Calcítica      | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 3.351                | 1,19          |
|                  | Faixa "C" DNIT | Basalto       | CAP 50/70                   |                                     | 4,60%    | Cal Dolomítica     | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 3.760                | 1,22          |
| Dias (2005)      | Faixa II SMOV  | Basalto       | CAP 50/60                   |                                     | 4,35%    | -                  | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 8.400                | 1,22          |
|                  | Faixa II SMOV  | Basalto       | CAP 50/60                   |                                     | 4,35%    | -                  | 4,0%             | Usina                        | Marshall 75 golpes | 4.836                | 1,37          |
|                  | Faixa II SMOV  | Basalto       | CAP 50/60                   |                                     | 4,35%    | -                  | 4,0%             | Usina                        | Pista              | 3.951                | 0,84          |
|                  | Faixa II SMOV  | Basalto       | CAP 50/60 + Borracha a seco | 3,0% Borracha com relação à mistura | 5,45%    | -                  | 4,0%             | Usina                        | Marshall 75 golpes | 4.700                | 1,16          |
|                  | Faixa II SMOV  | Basalto       | CAP 50/60 + Borracha a seco | 3,0% Borracha com relação à mistura | 5,45%    | -                  | 4,0%             | Usina                        | Pista              | 3.433                | 0,75          |
|                  | Faixa II SMOV  | Basalto       | CAP 50/60 + Borracha a seco | 3,0% Borracha com relação à mistura | 5,45%    | -                  | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 4.402                | 0,79          |

Tabela 2.4: Valores de MR e RT obtidos em pesquisas da UFRGS (continuação 2)

| Fonte          | Agregados           |               | Ligante Asfáltico      |                     |          | Projeto de Mistura |                  |                              |                    | Parâmetros Mecânicos |               |
|----------------|---------------------|---------------|------------------------|---------------------|----------|--------------------|------------------|------------------------------|--------------------|----------------------|---------------|
|                | Faixa Gran.         | Fonte Mineral | Tipo                   | Modificador         | Teor (%) | Aditivo            | Volume de Vazios | Produção da Mistura Afáltica | Moldagem dos CPs   | MR 25°C (MPa)        | RT 25°C (MPa) |
| Mariano (2013) | Faixa I SMOV        | Granito       | CAP 50/70              | -                   | 4,00%    | -                  | 3,5%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 6.732                | 1,39          |
|                | Faixa I SMOV        | Granito       | CAP 50/70              | -                   | 4,00%    | Cal Calcítica      | 3,5%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 12.157               | 1,44          |
|                | Faixa I SMOV        | Granito       | CAP 50/70              | -                   | 4,00%    | Cal Dolomítica     | 3,5%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 12.540               | 1,79          |
| Rivoire (2014) | Faixa "C" DNIT      | Basalto       | CAP 50/70              | -                   | 5,70%    | Cal Hidratada      | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 4.741                | 1,10          |
|                | Faixa "C" DNIT      | Basalto       | CAP 50/70              | Zeólita (0,3%)      | 5,70%    | -                  | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 3.901                | 1,13          |
|                | Faixa "C" DNIT      | Basalto       | CAP 50/70              | Zeólita (0,3%)      | 5,70%    | Cal Hidratada      | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 3.762                | 1,34          |
|                | Faixa "C" DNIT Fina | Basalto       | CAP 50/70              | -                   | 5,70%    | Cal Hidratada      | 4,0%             | Usina                        | Pista              | 2.625                | 0,90          |
| Rohde (2007)   | Faixa "C" DNIT      | Basalto       | CAP 50/70              | -                   | 5,00%    | -                  | 2,3%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 4.861                | 1,20          |
|                | Faixa "C" DNIT      | Basalto       | RASF                   | Resíduo de Asfalto  | 5,50%    | -                  | 2,5%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 23.805               | 4,29          |
|                | Faixa "C" DNIT      | Basalto       | CAP 20 + 7,5% Polímero | EVA                 | 5,50%    | -                  | 2,3%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 14.479               | 2,39          |
|                | Faixa "C" DNIT      | Basalto       | CAP 30/45 + 1,2% PPA   | Ácido Polifosfórico | 5,50%    | -                  | 1,7%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 18.217               | 3,53          |
|                | Faixa "C" DNIT      | Basalto       | RV                     | Resíduo á Vácuo     | 5,50%    | Cal Hidratado      | 2,7%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 18.840               | 2,94          |
|                | Faixa "C" DNIT      | Basalto       | PPA 50/70              | Ácido Polifosfórico | 5,00%    | Cal Hidratado      | 4,2%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 7.742                | 1,24          |
|                | Faixa "C" DNIT      | Basalto       | PPA 50/70              | Ácido Polifosfórico | 5,00%    | -                  | 7,0%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 8.003                | 1,28          |
|                | Faixa "C" DNIT      | Basalto       | CAPPLUS                | Asfaltita           | 5,50%    | Cal Hidratado      | 5,5%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 10.392               | 1,90          |

Tabela 2.4: Valores de MR e RT obtidos em pesquisas da UFRGS (continuação 3)

| Fonte            | Agregados                             |               | Ligante Asfáltico |                            |          | Projeto de Mistura            |                  |                              |                    | Parâmetros Mecânicos |               |
|------------------|---------------------------------------|---------------|-------------------|----------------------------|----------|-------------------------------|------------------|------------------------------|--------------------|----------------------|---------------|
|                  | Faixa Gran.                           | Fonte Mineral | Tipo              | Modificador                | Teor (%) | Aditivo                       | Volume de Vazios | Produção da Mistura Afáltica | Moldagem dos CPs   | MR 25°C (MPa)        | RT 25°C (MPa) |
| Specht (2004)    | Faixa Mix IVb do Instituto de Asfalto | Basalto       | CAP-20            | 12% Borracha de pneu moída | 4,80%    | -                             | 4%               | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 6.510                | 1,27          |
|                  | Faixa Mix IVb do Instituto de Asfalto | Basalto       | CAP-20            |                            | 5,80%    | -                             | 4%               |                              |                    | 4.480                | 1,42          |
| Steffenon (2003) | Faixa B DAER/RS                       | Riodacítica   | CAP-20            |                            | 6%       | Padrão                        | 4%               | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 5.823                | 1,09          |
|                  |                                       | Riodacítica   | CAP-20            |                            | 6,8      | Areia de Fundação Verde       | 3,8              | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 7303                 | 1,333         |
|                  |                                       | Riodacítica   | CAP-20            |                            | 7,2      | Areia de Fundação com machos  | 3,9              | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 6703                 | 1,19          |
|                  |                                       | Riodacítica   | CAP-20            |                            | 7,7      | Finos de exaustão da fundição | 4,4              | Laboratório                  | Marshall 75 golpes | 7403                 | 1,288         |

Tabela 2.5: Valores de MR e RT obtidos em pesquisas da UFRJ

| Fonte          | Agregados    |                 | Ligante Asfáltico |                  |          | Projeto de Mistura  |                  |                              |                     | Parâmetros Mecânicos |                |
|----------------|--------------|-----------------|-------------------|------------------|----------|---------------------|------------------|------------------------------|---------------------|----------------------|----------------|
|                | Faixa Gran.  | Fonte Mineral   | Tipo              | Modifi-<br>cador | Teor (%) | Aditivo             | Volume de Vazios | Produção da Mistura Afáltica | Molda-gem dos CPs   | MR 25°C (MPa)        | RT 25°C (MPa ) |
| Mourão (2003)  | 0/11s        | Granito         | CAP 50/60         | -                | 6,50%    | Calcário+1,5% CH1   | 2,5%             | Laboratório                  | Marshall 50 golpes  | 2.230                | 0,75           |
|                |              |                 |                   |                  | 6,50%    | 2% Cimento Portland | 3,4%             |                              |                     | 2.484                | 0,64           |
|                |              |                 |                   |                  | 6,50%    | Fíler Mineral       | 2,4%             |                              |                     | 2.193                | 0,79           |
|                |              |                 | CAP AMP           | 6,5% SBS         | 6,50%    | Calcário+1,5% CH1   | 3,4%             |                              |                     | 2.095                | 0,68           |
|                |              |                 |                   |                  | 6,50%    | 2% Cimento Portland | 4,0%             |                              |                     | 2.227                | 0,67           |
|                |              |                 |                   |                  | 6,50%    | Fíler Mineral       | 2,8%             |                              |                     | 2.034                | 0,90           |
|                |              |                 |                   |                  |          |                     |                  |                              |                     |                      |                |
| Marques (2004) | Faixa A DNIT | Granito/Gnaisse | CAP20             |                  | 4,50%    |                     | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall 75 golpes  | 4.045                | 1,12           |
|                |              |                 |                   |                  | 4,50%    |                     |                  |                              | Giratório 100 giros | 6.160                | 1,29           |
|                |              |                 | CAP40             |                  | 4,50%    |                     |                  |                              | Marshall 75 golpes  | 8.769                | 2,04           |
|                |              |                 |                   |                  | 4,50%    |                     |                  |                              | Giratório 100 giros | 8.335                | 1,76           |
|                |              |                 | CAP50/60          |                  | 4,50%    |                     |                  |                              | Marshall 75 golpes  | 4.506                | 1,06           |
|                |              |                 |                   |                  | 4,50%    |                     |                  |                              | Giratório 100 giros | 3.597                | 1,05           |
|                | Faixa B DNIT |                 | CAP20             |                  | 4,50%    |                     |                  |                              | Marshall 75 golpes  | 6.419                | 1,58           |
|                |              |                 |                   |                  | 4,50%    |                     |                  |                              | Giratório 100 giros | 8.853                | 1,69           |
|                |              |                 | CAP40             |                  | 4,50%    |                     |                  |                              | Marshall 75 golpes  | 9.571                | 2,05           |
|                |              |                 |                   |                  | 4,50%    |                     |                  |                              | Giratório 100 giros | 10.175               | 2,55           |
|                |              |                 | CAP50/60          |                  | 4,50%    |                     |                  |                              | Marshall 75 golpes  | 3.927                | 1,07           |
|                |              |                 |                   |                  | 4,50%    |                     |                  |                              | Giratório 100 giros | 4.792                | 1,39           |
|                | Faixa C DNIT |                 | CAP20             |                  | 5,00%    |                     |                  |                              | Marshall 75 golpes  | 7.507                | 2,24           |
|                |              |                 |                   |                  | 5,00%    |                     |                  |                              | Giratório 100 giros | 7.056                | 2,21           |
|                |              |                 | CAP40             |                  | 5,00%    |                     |                  |                              | Marshall 75 golpes  | 10.416               | 2,65           |
|                |              |                 |                   |                  | 5,00%    |                     |                  |                              | Giratório 100 giros | 10.873               | 2,96           |
|                |              |                 | CAP50/60          |                  | 5,00%    |                     |                  |                              | Marshall 75 golpes  | 4.984                | 1,40           |
|                |              |                 |                   |                  | 5,00%    |                     |                  |                              | Giratório 100 giros | 6.692                | 1,39           |
|                |              |                 |                   |                  |          |                     |                  |                              |                     |                      |                |
|                |              |                 |                   |                  |          |                     |                  |                              |                     |                      |                |

Tabela 2.5: Valores de MR e RT obtidos em pesquisas da UFRJ (continuação 1)

| Fonte              | Agregados    |                    | Ligante Asfáltico    |                |          | Projeto de Mistura      |                  |                              |                  | Parâmetros Mecânicos |               |
|--------------------|--------------|--------------------|----------------------|----------------|----------|-------------------------|------------------|------------------------------|------------------|----------------------|---------------|
|                    | Faixa Gran.  | Fonte Mineral      | Tipo                 | Modificador    | Teor (%) | Aditivo                 | Volume de Vazios | Produção da Mistura Afáltica | Moldagem dos CPs | MR 25°C (MPa)        | RT 25°C (MPa) |
| Freitas (2007)     | Faixa B DNIT | Escória de Aciaria | CAP Resíduo Vácuo    |                | 6,50%    | 3% Cal Hidratada CH-III | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall         | 10.344               | 1,98          |
|                    |              | Granito            |                      |                | 5,00%    |                         |                  |                              |                  | 7.603                | 1,81          |
|                    |              | Escória de Aciaria | CAP 30/45+4% Sasobit |                | 6,50%    |                         |                  |                              |                  | 11.289               | 2,46          |
|                    |              | Granito            |                      |                | 5,00%    |                         |                  |                              |                  | 8.654                | 1,92          |
|                    |              | Escória de Aciaria | CAP 30/45            |                | 6,50%    |                         |                  |                              |                  | 10.652               | 2,11          |
|                    |              | Granito            |                      |                | 5,00%    |                         |                  |                              |                  | 6.709                | 1,58          |
| Cavalcanti, (2010) | Faixa B DNIT | Granito            | CAP 50/70            | -              | 5,00%    |                         | 4,0%             | Laboratório                  | Giratório        | 6.897                | 1,38          |
|                    |              |                    | CAP 50/70            | 25% TLA        | 4,70%    |                         |                  |                              | Giratório        | 7.723                | 1,52          |
|                    |              |                    | CAP 30/45            | -              | 5,30%    |                         |                  |                              | Marshall         | 9.385                | 2,37          |
|                    |              |                    | CAP 30/45            | -              | 4,90%    |                         |                  |                              | Giratório        | 9.745                | 2,2           |
|                    |              |                    | CAP 30/45            | 2% WMA Rediset | 5,10%    |                         |                  |                              | Marshall         | 7.466                | 1,73          |
|                    |              |                    | CAP 30/45            | 2% WMA Rediset | 4,60%    |                         |                  |                              | Giratório        | 9.839                | 2,02          |
|                    |              |                    | CAP 30/45            | 0,6% PR Plast  | 4,80%    |                         |                  |                              | Giratório        | 11.497               | 2,14          |
|                    |              |                    |                      |                |          |                         |                  |                              |                  |                      |               |
| Hirsch (2009)      | Faixa B DNIT | Granito            | Convencional         | -              | 5,00%    |                         | 4,0%             | Laboratório                  | Giratório        | 3.112                | 1,64          |
|                    | Faixa C DNIT |                    |                      | -              | 5,50%    |                         |                  |                              |                  | 3.512                | 1,62          |
|                    | Faixa B DNIT |                    |                      | -              | 5,00%    |                         |                  |                              |                  | 4.179                | 2,04          |
|                    | Faixa C DNIT |                    |                      | -              | 5,50%    |                         |                  |                              |                  | 4.664                | 2,14          |
|                    | Faixa B DNIT |                    | Flex 65/90           | Polímero       | 5,00%    |                         |                  |                              |                  | 2.999                | 1,47          |
|                    | Faixa B DNIT |                    | CAP-Borracha         | Borracha       | 5,40%    |                         |                  |                              |                  | 2.452                | 1,49          |

Tabela 2.5: Valores de MR e RT obtidos em pesquisas da UFRJ (continuação 2)

| Fonte                 | Agregados               |                              | Ligante Asfáltico  |                  |          | Projeto de Mistura |                  |                              |                   | Parâmetros Mecânicos |               |
|-----------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------|------------------|----------|--------------------|------------------|------------------------------|-------------------|----------------------|---------------|
|                       | Faixa Gran.             | Fonte Mineral                | Tipo               | Modifi-<br>cador | Teor (%) | Aditivo            | Volume de Vazios | Produção da Mistura Afáltica | Molda-gem dos CPs | MR 25°C (MPa)        | RT 25°C (MPa) |
| Patriota (2004)       | Faixa B DNIT            |                              | CAP 50/60          |                  | 6,00%    |                    | 4,2%             | Laboratório                  | Marshall          | 3.205                | 1,07          |
|                       |                         |                              |                    | 1% Borracha Seco |          |                    | 6,0%             |                              |                   | 3.953                | 0,90          |
|                       |                         |                              |                    | 2% Borracha Seco |          |                    | 7,2%             |                              |                   | 2.302                | 0,80          |
|                       |                         |                              |                    | 3% Borracha Seco |          |                    | 9,6%             |                              |                   | 1.539                | 0,72          |
| Magalhães (2004)      | Faixa B DNIT / EME 0/14 | Granito                      | CAP 20             |                  | 5,50%    |                    | 3,4%             |                              | Marshall          | 6.600                | 1,58          |
|                       |                         |                              |                    |                  |          |                    | Giratório        |                              | 5.140             | 1,52                 |               |
|                       |                         |                              | AMP                | 7,5% EVA         |          |                    | 3,6%             |                              | Marshall          | 10.980               | 2,25          |
|                       |                         |                              |                    |                  |          |                    | Giratório        |                              | 7.680             | 1,95                 |               |
|                       |                         |                              | CAP Módulo Elevado | RASF             |          |                    | 4,0%             |                              | Marshall          | 16.340               | 3,50          |
|                       |                         |                              |                    |                  |          |                    | Giratório        |                              | 17.570            | 3,45                 |               |
| Castelo Branco (2004) | Faixa C DNIT            | Escória de Aciaria e Granito | CAP 50/60          | 40% Escória      | 6,2%     | DOP Óleo de Xisto  | 4,0%             | Laboratório                  | Marshall          | 2.276                | 0,77          |
|                       |                         | 60% Escória                  |                    | 7,0%             | 1.836    |                    |                  |                              |                   | 0,62                 |               |
|                       |                         | Granito                      |                    | 80% Escória      | 6,8%     |                    |                  |                              |                   | 2.188                | 0,76          |
|                       |                         |                              |                    |                  |          |                    |                  |                              |                   | 6,2%                 | 2.051         |

Vale também destacar a pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Concessões Rodoviárias (ABCR, 2008), para avaliar as características das misturas asfálticas com o CAP 50/70 e o CAP 30/45. Para isso, o ensaio de módulo de resiliência diametral foi um dos parâmetros selecionados na análise. Nesse estudo foi utilizada a faixa granulométrica Mix IV-b do Instituto de asfalto e avaliou-se, ainda, a influência da adição de 1,5% de cal hidratada nas misturas asfálticas. Os resultados dessa pesquisa são apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Valores de módulo de resiliência e resistência à tração obtidos no estudo da ABCR (2008)

| Ligante Asfáltico |          | Teor de Cal Hidratada (%) | Moldagem                         | Módulo de Resiliência (MPa) | Resistência à Tração (MPa) |
|-------------------|----------|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Tipo              | Teor (%) |                           |                                  |                             |                            |
| CAP 50/70         | 5,2      | -                         | Laboratório - Marshall 75 golpes | 7.260                       | 1,53                       |
|                   |          | 1,50                      |                                  | 10.263                      | 1,77                       |
| CAP 30/45         | 5        | -                         |                                  | 10.250                      | 1,77                       |
|                   |          | 1,50                      |                                  | 13.067                      | 2,25                       |

## 2.2. MÓDULO DINÂMICO

### 2.2.1. Histórico do ensaio

O conceito de módulo complexo não é novo, já no ano 1962, Papazian foi um dos primeiros a descrever os ensaios viscoelásticos realizados em misturas asfálticas. Esse autor aplicou tensões sinusoidais em corpos de prova cilíndricos, em determinadas frequências e conseguiu determinar a resposta de deformação sinusoidal, na mesma frequência. Os ensaios foram realizados com controle de temperatura variando a amplitude e frequência do carregamento. Papazian (1962) apud Clyne (2003) concluiu que os conceitos de viscoelasticidade poderiam ser aplicados no dimensionamento e desempenho de pavimentos com misturas asfálticas. Mais de cinquenta anos após estas experiências e conceitos ainda são utilizados para desenvolver os critérios de dosagem e desempenho dos materiais empregados na construção de pavimentos.

Os trabalhos que se continuaram na década seguinte avaliaram diversas formas de carregamentos: por compressão, por tração e por carregamentos simultâneos de compressão-tração. Vários estudos realizados apontaram diferenças obtidas no parâmetro  $|E^*|$ , de acordo com as condições de carregamento. Essas diferenças afetam especialmente o ângulo de fase e tendem a ser mais notórias em temperaturas elevadas. Witczak e Root (1974) indicam que os ensaios com carregamento simultâneo de tração-compressão podem ser mais representativos das condições de campo. Khanal e Mamlouk (1995) confirmam esta asserção. Esses autores realizaram ensaios de módulo complexo com cinco modos de carregamento e obtiveram resultados diferentes, especialmente para temperaturas elevadas. Utilizando análise bimodular, incluindo os módulos determinados tanto em compressão como em tração, os autores conseguiram prever o comportamento da mistura asfáltica em campo. Bonnaure et al. (1977) também determinaram o módulo complexo de misturas asfálticas

no ensaio à flexão de corpos de prova trapezoidais, fixos em uma extremidade e submetidos a um carregamento sinusoidal na outra extremidade.

No final da década de 1980 e início de 1990 a *International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures* (RILEM), no seu comitê *Technical Committee on Bitumen and Asphalt Testing* organizaram um programa laboratorial internacional. O objetivo do programa foi promover o desenvolvimento de metodologias de projeto de misturas e associar os métodos de mensuração para pavimentos asfálticos. Os ensaios de módulo complexo foram realizados por 15 laboratórios participantes em países da Europa. As medidas foram realizadas para várias temperaturas e frequências e cada laboratório utilizou diferentes geometrias de corpos de prova e ensaios com diferentes tipos de carregamento. Os resultados mostraram que ensaios de flexão e de tensão indireta apresentaram valores bem concordantes para certas condições. Os laboratórios reproduziram o valor do ângulo de fase com maior sucesso do que o valor do módulo  $|E^*|$ .

As investigações continuaram na década de 1990, estudos de Francken et al. (1996) e Stroup-Gardiner e Newcomb (1997) compararam os carregamentos axiais e diametrais em corpos de prova cilíndricos. Os resultados foram confusos e indicaram que o mesmo material pode apresentar módulos dinâmicos e ângulos de fase diferentes em função do arranjo do carregamento.

O estudo mais abrangente sobre o módulo dinâmico começou em meados da década de 1990 com os estudos anteriormente citados, sob coordenação da NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*). Nessas pesquisas foram propostas novas diretrizes para selecionar a geometria e as dimensões dos corpos de prova, a forma de compactação, o procedimento do ensaio, tipo de carregamento e modelagem empírica. Nesses projetos passou-se a utilizar a terminologia de módulo dinâmico complexo.

O projeto 1-37A do NCHRP desenvolveu o novo guia de dimensionamento, concluído em 2004, para novos pavimentos e para restauração. Nesse projeto, o módulo dinâmico ( $E^*$ ) foi selecionado como o parâmetro necessário para determinar as tensões e deformações em pavimentos com revestimentos asfálticos. A seleção foi baseada em um estudo que comparou o  $E^*$  com o módulo de resiliência (MR) obtido no Ensaio de Tração Indireta (IDT) (Dogan et al. 2003). O uso do  $E^*$  da mistura tem a vantagem de que também pode ser empregado em modelos para determinar as propriedades de resistência à deformação permanente e o trincamento por fadiga da mistura (Dongré et al., 2005).



### 2.2.2. Fundamentação teórica do ensaio

Para materiais vicoelásticos lineares, como é o caso das misturas asfálticas, a relação entre a tensão e a deformação sob carregamento contínuo sinusoidal é definido pelo módulo complexo ( $E^*$ ).

O módulo complexo tem um componente elástico ou de armazenamento e um componente viscoso ou de perda. O componente elástico é relacionado à capacidade do material conservar energia, enquanto que o componente viscoso é responsável pela perda de energia no sistema e (Kim et al, 2005). De forma geral, pode-se afirmar que os componentes do módulo complexo, o módulo elástico ou de armazenamento ( $E'$ ) e o módulo viscoso ou de perda ( $E''$ ), variam em função da temperatura e da taxa de aplicação do carregamento.

Em materiais puramente elásticos não existe perda de energia no sistema e, portanto, o módulo de armazenamento é equivalente ao módulo complexo. De uma forma simples, o módulo complexo pode ser definido pela Equação 2.13.

$$E^* = E' + iE'' \quad \text{Equação 2.13}$$

Onde:  $E^*$  = módulo complexo;

$E'$  = componente elástico ou de armazenamento;

$E''$  = componente viscoso ou de perda;

$i$  = número complexo definido por  $i^2 = -1$ .

O valor absoluto do módulo dinâmico complexo ( $E^*$ ) é referido comumente como o módulo dinâmico  $|E^*|$  (Yoder e Witczak, 1975), obtido pela Equação 2.14.

$$|E^*| = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2} \quad \text{Equação 2.14}$$

O módulo de armazenamento e o módulo de dissipação podem ser determinados pela determinação do atraso na resposta entre a aplicação da tensão e a medição da deformação. Este atraso, referido como ângulo de fase  $\phi$ , pode também ser determinado pela Equação 2.15.

$$\tan\phi = \frac{E''}{E'} \quad \text{Equação 2.15}$$

As Equações 2.14. e 2.15 também podem ser representadas de forma gráfica conforme ilustra a Figura 2.13.

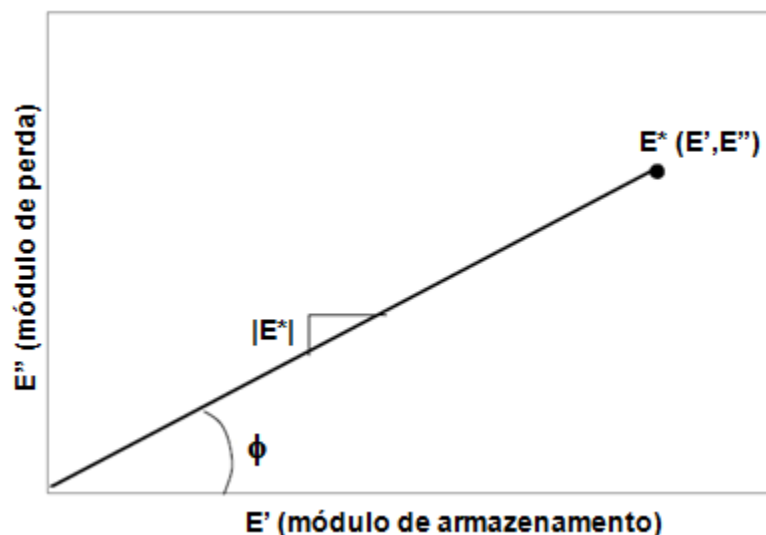


Figura 2.13: Relação gráfica entre o módulo complexo e os módulos de armazenamento e de perda

O módulo dinâmico e o ângulo de fase são determinados por meio da aplicação de carregamentos senoidais em corpos de prova cilíndricos. No estado de carregamento de compressão uniaxial, a tensão axial ( $\sigma$ ) e a deformação axial ( $\varepsilon$ ) são determinados pelas Equações 2.16 e 2.17, respectivamente.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{Equação 2.16}$$

Onde:  $\sigma$  = tensão axial;

$P$  = carregamento;

$A$  = área transversal do corpo de prova cilíndrico.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Equação 2.17}$$

Onde:  $\varepsilon$  = deformação axial;

$\Delta L$  = variação do comprimento;

$L$  = comprimento inicial.

Para o caso de carregamento senoidal unidirecional, a tensão pode ser representada pela Equação 2.18 e a deformação decorrente pela Equação 2.19.

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t) \quad \text{Equação 2.18}$$

Onde:  $\sigma$  = tensão axial;

$\sigma_0$  = amplitude da tensão;

$\omega$  = velocidade angular, relacionada à frequência  $f$  por  $\omega = 2\pi f$ .

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t - \phi) \quad \text{Equação 2.19}$$

Onde:  $\varepsilon$  = tensão axial;

$\varepsilon_0$  = amplitude da tensão;

$\phi$  = ângulo de fase relacionado ao tempo de atraso entre a tensão e a deformação, conforme apresenta a Figura 2.14.

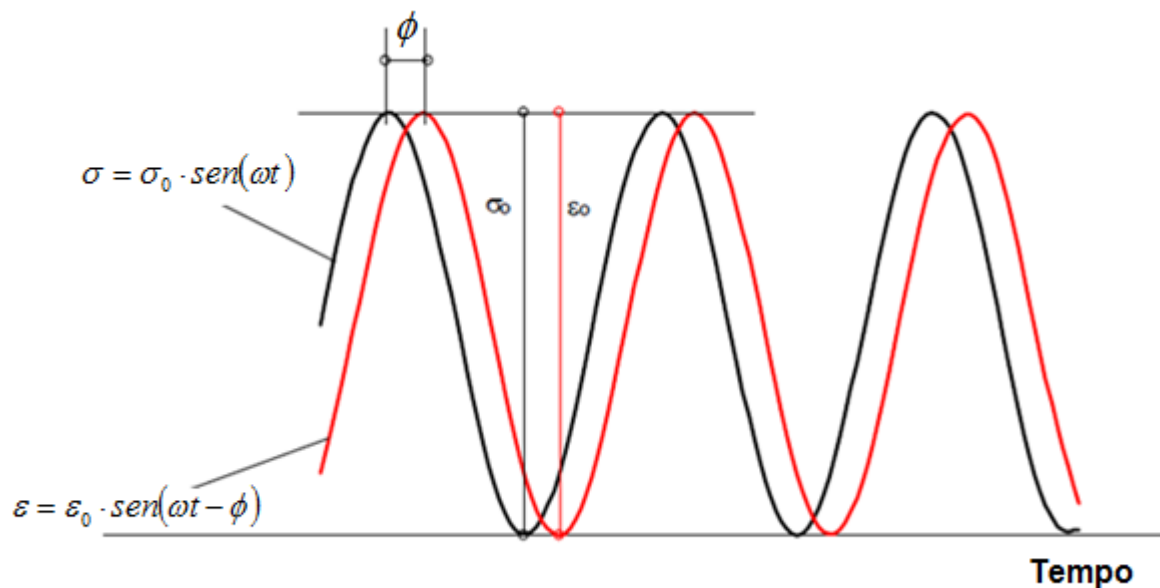


Figura 2.14: Curva de tensão e deformação durante o carregamento senoidal. Fonte: Garcia e Thompson (2007)

A relação entre as amplitudes da tensão-deformação definem o valor absoluto do módulo dinâmico. O componente de armazenamento que se encontra em fase é definido pela Equação 2.20 e o componente de perda que se encontra defasado é definido pela Equação 2.21.

$$E' = \frac{\sigma_0 \cos(\phi)}{\varepsilon_0} \quad \text{Equação 2.20}$$

$$E'' = \frac{\sigma_0 \sin(\phi)}{\varepsilon_0} \quad \text{Equação 2.21}$$

A parte real do módulo complexo é o módulo de armazenamento ou elástico e a parte imaginária se refere ao módulo de perda ou viscoso. O módulo dinâmico, portanto, é o valor absoluto do módulo complexo, apresentado na da Equação 2.22.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad \text{Equação 2.22}$$

Onde:  $|E^*|$  = módulo dinâmico;

$\sigma_0$  = amplitude da tensão;

$\varepsilon_0$  = amplitude da deformação.

### 2.2.3. Normativas para execução do ensaio

Na atualidade existem duas normativas americanas para executar o ensaio de módulo dinâmico em corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas, a AASHTO T 342-11 e a ASTM D 3497. A normativa da ASTM é um pouco mais antiga, publicada inicialmente em 1979 e revisada em 2003. Poucos estudos e pesquisas seguem essa especificação para execução do ensaio. Já a normativa da AASHTO é mais atual e sua última versão data de 2011. A maior parte das investigações pesquisadas se baseiam nessa especificação ou no protocolo predecessor AASHTO PP62-07. Na Tabela 2.7 são apresentados os principais parâmetros estabelecidos por essas normativas.

Tabela 2.7: Comparativo entre as normativas da ASTM e AASHTO para execução do ensaio de módulo dinâmico

| Parâmetro                                 | ASTM D3497   | AASHTO T 342-11  |
|---|--|--|
| Dimensões dos CPs                         | Relação de diâmetro altura de 2x1  | Diâmetro de 100 a 104mm  |
|   | Diâmetro mínimo de 101,6mm e quatro vezes o tamanho máximo nominal dos agregados | Altura de 147,5 a 152,5mm  |
| Compactação dos CPs                       | Giratório ou no compactador Califórnia   | Giratório, nas dimensões de 170mm de altura e 150mm de diâmetro        |
| Volume de Vazios                          | Não faz referência   | Empregar o mais representativo do campo                                |
| Extração de núcleos dos CPs               | Não faz referência   | Especifica a extração de corpos de prova maiores                       |
| Preparação das faces transversais dos CPs | Realizar regularização com morteiro a base de enxofre                            | O ângulo entre as faces e o eixo perpendicular não deve ser maior a 1° |
|   |  | Utilizar algum redutor de fricção nas faces dos CPs                    |
| Fixação dos LVTDs nos CPs                 | Com cimento epóxico  | Com cimento epóxico  |
| Temperaturas do Ensaio                    | 5°C<br>25°C<br>40°C  | -10,0°C<br>4,4°C<br>21,1°C<br>37,8°C<br>54,4°C                         |
|   | Começar pela temperatura mais baixa  | Começar pela temperatura mais baixa                                    |
| Frequências de Carregamento               | 1Hz<br>4Hz<br>16Hz   | 0,1Hz<br>0,5Hz<br>1,0Hz<br>5,0Hz<br>10Hz<br>25Hz                       |
|   | Começar pela frequência mais alta  | Começar pela frequência mais alta                                      |

A normativa AASHTO T 342-11 foi selecionada para seu emprego neste estudo por ser a norma mais recentemente publicada para execução de módulo dinâmico de misturas asfálticas em corpos de

prova cilíndricos. Recomenda-se que os CPs sejam condicionados durante um tempo mínimo na temperatura estabelecida antes do início do ensaio, de acordo com a Tabela 2.8.

Tabela 2.8: Tempo de condicionamento dos CPs na temperatura de ensaio de acordo à AASHTO T 342-11

| Temperatura de Ensaio (°C) | Tempo a partir de uma temperatura de 25°C (h) | Tempo a partir da temperatura anterior de ensaio (h) |
|----------------------------|---|--|
| -10                        | Uma noite                                     | Uma noite  |
| 4,4                        | Uma noite                                     | 4h ou uma noite                                      |
| 21,1                       | 1   | 3  |
| 37,8                       | 2   | 2  |
| 54,4                       | 3   | 1  |

A AASHTO T342-11 recomenda aplicar o carregamento senoidal de forma cíclica para obter de deformações axiais de 50 a 150 *microstrain*. Sabe-se que a magnitude desse carregamento é função da temperatura de execução do ensaio. Assim, na normativa recomendam-se os valores comumente empregados no ensaio, aqui apresentados na Tabela 2.9.

Tabela 2.9: Faixa de tensão em função da temperatura recomendada pela AASHTO T 342-11

| Temperatura de Ensaio (°C) | Faixa de Tensão (kPa) |
|----------------------------|-----------------------|
| -10                        | 1.400 a 2.800         |
| 4,4                        | 700 a 1.400           |
| 21,1                       | 350 a 700             |
| 37,8                       | 140 a 250             |
| 54,4                       | 35 a 70               |

O número de ciclos aplicado para cada frequência de carregamento também é estabelecido na AASHTO T342-11, conforme é apresentado na Tabela 2.10, sendo que para os cálculos se recomenda o emprego dos últimos 5 ciclos, com no mínimo 250 pontos de coleta de dados.

Tabela 2.10: Número de ciclos de carregamento em função da frequência, de acordo à AASHTO T 342-11

| Frequência (Hz) | Número de Ciclos |
|-----------------|------------------|
| 25              | 200              |
| 10              | 200              |
| 5               | 100              |
| 1               | 20               |
| 0,5             | 15               |
| 0,1             | 15               |

Ainda na normativa AASHTO T342-11 são estabelecidos alguns indicadores para avaliar a qualidade dos dados resultantes do ensaio, apresentados na Tabela 2.11.

Tabela 2.11: Critérios de qualidade dos dados obtidos no ensaio de módulo dinâmico, de acordo à AASHTO T 342-11

| Indicador                                     | Limite      |
|---|-------------|
| Erro padrão da tensão aplicada                | $\leq 10\%$ |
| Erro padrão médio das deformações             | $\leq 10\%$ |
| Coeficiente de uniformidade das deformações   | $\leq 35\%$ |
| Coeficiente de uniformidade do ângulo de fase | $\leq 3\%$  |

## 2.2.4. Construção de curvas mestre

O ensaio de módulo dinâmico é realizado em diversas temperaturas e frequências de carregamento. Para considerar a influência da variação desses parâmetros, o módulo dinâmico de uma mistura asfáltica pode ser obtido de uma curva mestre construída arbitrariamente em uma temperatura de referência selecionada, por exemplo, 21,1°C (Garcia e Thompson, 2007).

Para Christensen e Anderson (1992) uma curva mestre representa a resposta de uma mistura asfáltica a uma determinada temperatura de referência em uma faixa de frequências ou tempos. Permite realizar comparações de materiais viscoelásticos lineares que foram submetidos a ensaios com diferentes temperaturas e frequências de carregamentos.

A curva mestre pode ser construída utilizando o princípio de superposição de tempo-temperatura, que descreve o comportamento viscoelástico de misturas e ligantes asfálticos (Pellinen e Witczak, 2002). Esse princípio estabelece que o mesmo valor de módulo de um material pode ser obtido em baixa temperatura e elevado tempo de carregamento ou em elevada temperatura e curto tempo de

carregamento. Os materiais que exibem esse tipo de comportamento são chamados de termoreologicamente simples (*TRS*).

O ensaio de módulo dinâmico é considerado um ensaio não destrutivo, no entanto, a aplicação dos carregamentos axiais no modo de tensão controlada causa um incremento de deformação no decorrer do ensaio. Para minimizar esses efeitos, as especificações ASTM D3497 e AASHTO T 342-11 recomendam iniciar o ensaio na temperatura mais baixa e, para cada temperatura, começar com as frequências de carregamento mais elevadas.

Na Figura 2.15 é apresentado um exemplo dos resultados do ensaio de módulo dinâmico de uma mistura asfáltica densa de tamanho máximo nominal 12,5mm com ligante asfáltico convencional. Como é esperado, o módulo dinâmico se incrementa conforme a frequência aumenta e a temperatura diminui. A característica dessas curvas é que podem ser simplificadas na construção de uma única curva contínua realizando apenas deslocamentos (*shift*) horizontais. A Figura 2.16 ilustra esses deslocamentos das curvas de 4,4°C, 37,8°C e 54,4°C até a temperatura de referência de 21,1°C para formar a curva mestre.

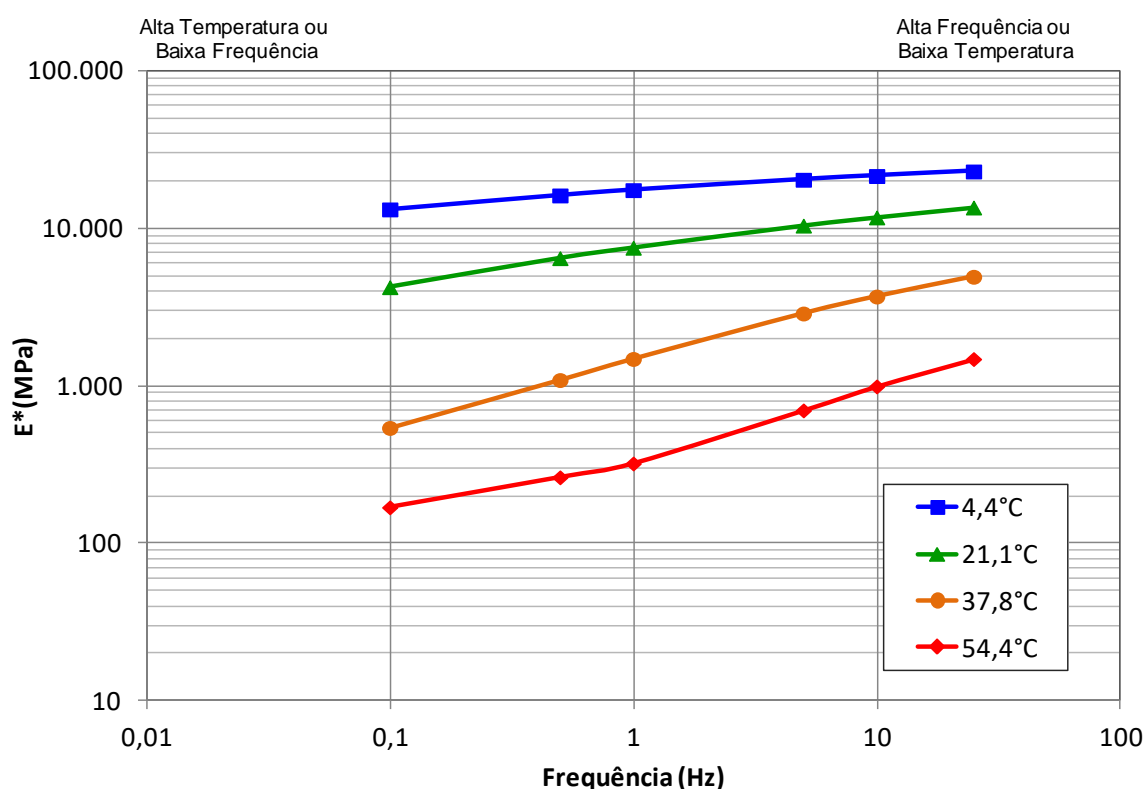


Figura 2.15: Resultados do ensaio de módulo dinâmico em diversas temperaturas em função da frequência de carregamento



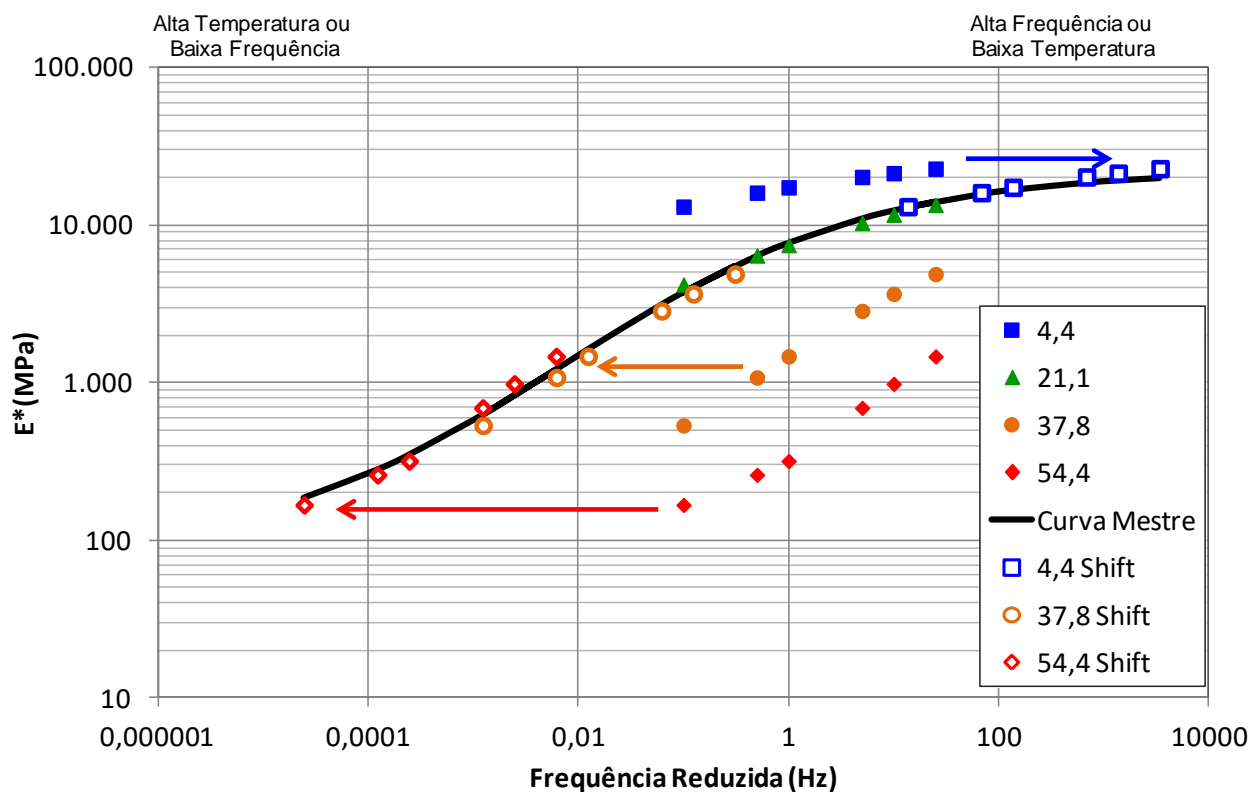


Figura 2.16: Construção da curva mestre após deslocamentos dos dados na temperatura de referência

O efeito da temperatura e da frequência de carregamento são representados pela frequência reduzida, após os deslocamentos horizontais. As relações entre a magnitude do deslocamento horizontal, a temperatura, a frequência de carregamento e a frequência reduzida são definidas pela Equação 2.23.

$$a_T = \frac{f_{T_0}}{f_T} \quad \text{Equação 2.23}$$

Onde:  $a_T$  = fator de deslocamento frequência temperatura para a temperatura  $T$ ;

$f_{T_0}$  = frequência reduzida na temperatura de referência ( $T_0$ );

$f_T$  = frequência na temperatura  $T$ .

Para construção das curvas mestres, a lei potencial generalizada é o modelo matemático mais aceitado para representar o comportamento de materiais betuminosos em temperaturas baixas e intermediárias. Para temperaturas elevadas as funções de ajuste polinomial são as mais adequadas. Contudo, um modelo simples polinomial não é apropriado para ajustar uma curva mestre completa

devido a que a oscilação entre as baixas e altas temperaturas produzem previsões irracionais do módulo, quando se extrapola além dos dados obtidos no laboratório (Pellinen e Witczak, 2002).

Pesquisas na Universidade de Maryland (Estados Unidos) mostraram que as curvas mestre do módulo dinâmico para misturas asfálticas podem ser representadas por uma função sigmoideal definida pela Equação 2.24. Nesse estudo propõe-se construir as curvas mestre com ajuste dos dados de módulo dinâmico em uma função sigmoideal, que pode ser realizado com a função solver em uma planilha de Excel. O deslocamento pode ser realizado resolvendo os fatores de deslocamento de forma simultânea com os coeficientes da função sigmoideal, empregando qualquer função de deslocamento para resolver a frequência reduzida ( $fr$ ), ou tempo ( $tr$ ), em função da temperatura (Pellinen e Witczak, 2002).

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(tr)}} \quad \text{Equação 2.24}$$

Onde:  $|E^*|$  = módulo dinâmico;

$tr$  = tempo de carregamento na temperatura de referência (tempo reduzido);

$\delta$  = valor mínimo do módulo;

$\delta + \alpha$  = valor máximo do módulo;

$\beta, \gamma$  = parâmetros que descrevem a forma da função sigmoideal.

Na equação, o parâmetro  $\gamma$  influencia a inclinação da função (taxa de variação entre o máximo e o mínimo) e  $\beta$  influencia na posição horizontal do ponto de rotação, conforme ilustra a Figura 2.17. Também  $\delta$  e  $\alpha$  dependem da graduação do agregado, conteúdo de ligante asfáltico e do volume de vazios. Os parâmetros  $\delta$  e  $\alpha$  também dependem das características do ligante asfáltico (NCHRP, 2004).

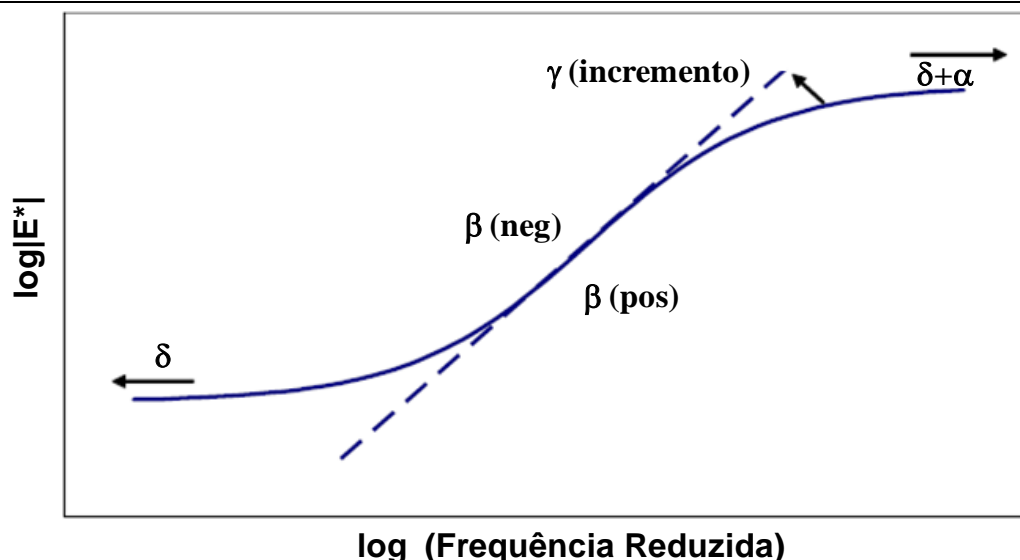


Figura 2.17: Função sigmoideal. Fonte: Pellinen e Witczak (2002)

A justificativa para utilizar a função sigmoideal no ajuste do módulo dinâmico obtido por carregamento axial é fundamentada nas observações físicas do comportamento da mistura asfáltica. Na região superior, a função sigmoideal se aproxima de forma assintótica à máxima rigidez da mistura, que depende dos limites de rigidez do ligante asfáltico em baixas temperaturas. Em temperaturas elevadas, o agregado influencia mais na resposta ao carregamento do que a fase viscosa do ligante asfáltico. O módulo começa a se aproximar ao valor limite de equilíbrio, que é dependente da granulometria dos agregados. Portanto, a função sigmoideal interpreta o comportamento físico das misturas asfálticas observadas em ensaios mecânicos de carregamento à compressão cíclico na faixa de temperaturas utilizadas (Pellinen e Witczak, 2002).

## 2.2.5. Modelos preditivos do módulo dinâmico

Na bibliografia internacional existem diversos modelos preditivos do módulo dinâmico para misturas asfálticas. A maioria desses modelos são empíricos ou semi-empíricos e são construídos em função das propriedades volumétricas das misturas asfálticas e das características do ligante asfáltico. A seguir são apresentados os modelos mais empregados nas publicações consultadas, o Modelo de Witczak e o Modelo de Hirsch.

### 2.2.5.1. Modelo de Witczak

Esse modelo é apresentado no Guia de Dimensionamento da AASHTO de 2004 (NCHRP, 2004) para os níveis hierárquicos de precisão (2) e (3) e é apresentado na Equação 2.25. É um dos modelos mais

abrangentes da atualidade e é capaz de estimar a rigidez da mistura asfáltica numa faixa de temperaturas, taxas de carregamento e condições de envelhecimento, das propriedades já disponíveis dos materiais e das propriedades volumétricas da mistura asfáltica.

$$\log|E^*| = 3,750063 + 0,02932\rho_{200} - 0,001767(\rho_{200})^2 - 0,002841\rho_4 - 0,058097V_a - 0,802208\left(\frac{V_{beef}}{V_{beef}+V_a}\right) + \frac{3,871977-0,0021\rho_4+0,003958\rho_{38}-0,000017(\rho_{38})^2+0,00547\rho_{34}}{1+e^{(-0,603313-0,313351\log(f)-0,393532\log(\eta))}} \quad \text{Equação 2.25}$$

Onde:  $|E^*|$  = módulo dinâmico (psi);

$\eta$  = viscosidade do ligante asfáltico ( $10^6$ poise);

$f$  = frequência de carregamento (Hz);

$V_a$  = volume de vazios (%);

$V_{beff}$  = conteúdo de ligante asfáltico efetivo (% em volume);

$\rho_{34}$  = porcentagem de material retido na peneira de 19mm;

$\rho_{38}$  = porcentagem de material retido na peneira de 9,5mm;

$\rho_4$  = porcentagem de material retido na peneira de 4,75mm;

$\rho_{200}$  = porcentagem de material retido na peneira de 0,075mm.

Esse modelo foi desenvolvido com um banco de dados de 2.750 módulos dinâmicos de 205 misturas asfálticas diferentes testadas durante 30 anos nos laboratórios do Instituto de Asfalto, da Universidade de Maryland e da FHWA (*Federal Highway Administration*) dos Estados Unidos. Nesses modelos podem ser estimados os módulos dinâmicos de misturas asfálticas com ligantes asfálticos convencionais ou modificados.

### 2.2.5.2. Modelo de Hirsch

O Modelo de Hirsch é um método racional, embora semi-empírico, para estimar o módulo de misturas asfálticas. Nesse método são combinados os elementos em série e em paralelo.

A mistura asfáltica tende a se comportar como um composto em série em temperaturas elevadas, mas em temperaturas baixas seu comportamento se aproxima mais a um composto em paralelo. Contudo, para esta formulação ser útil para modelar o módulo dinâmico, as proporções relativas das fases em paralelo e em série devem ser dependentes do tempo e da temperatura.

Os autores avaliaram diversas versões do modelo modificado Hirsch, e notaram que o mais efetivo foi o mais simples, apresentado nas Equações 2.26 e 2.27, no qual o módulo dinâmico  $|E^*|$  da mistura asfáltica é diretamente estimado do módulo ( $G^*$ ) do ligante asfáltico, dos vazios no agregado mineral (VAM), e dos vazios cheios de asfalto (VFA), (Christensen et al. 2003).

$$|E^*| = P_c \left[ 4.200.000 \left( 1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3|G^*|_{binder} \left( \frac{VFA \cdot VMA}{10.000} \right) \right] + (1 - P_c) \left[ \frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4.200.00} + \frac{VMA}{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}} \right]^{-1} \quad \text{Equação 2.26}$$

$$P_c = \frac{\left( 20 + \frac{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}}{VMA} \right)^{0,58}}{650 + \left( \frac{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}}{VMA} \right)^{0,58}} \quad \text{Equação 2.27}$$

Onde:  $|E^*|$  = módulo dinâmico (psi);

$|G^*|$  = módulo dinâmico do ligante asfáltico (psi);

VMA = vazios do agregado mineral (%);

VFA = vazios cheios de asfalto (%);

$P_c$  = fator de contato dos agregados.

Nas Equações 2.26 e 2.27, o módulo do ligante asfáltico  $|G^*|$  pode ser determinado experimentalmente utilizando o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) ou pode ser estimado por meio de modelos matemáticos. Deve-se ter o cuidado de considerar a mesma temperatura e tempo de carregamento selecionado para a mistura asfáltica e nas unidades correspondentes (Christensen et al. 2003).

### 2.3. ENSAIO UNIAXIAL DE CARGA REPETIDA (FLOW NUMBER TEST)

Desde a década de 1970 muitos pesquisadores realizaram diversas investigações para desenvolver um método que pudesse caracterizar o comportamento das misturas asfálticas para poder estimar, com um certo grau de confiabilidade, o desempenho em campo. O Projeto 9-19 da NCHRP, parte do programa de pesquisa SUPERPAVE (*Superior Performance Pavement*), recomendou ensaios de simples execução para avaliar o comportamento de misturas asfálticas relacionados a fadiga e deformação permanente, (Witczak et al., 2002).

O projeto 9-19 da NCHRP recomendou o emprego do parâmetro de fluência terciária, também conhecido como “*Flow Number*”, para avaliar o comportamento à deformação permanente das misturas asfálticas, dadas certas condições de carregamento e de clima.

O ensaio de *Flow Number* ou ensaio uniaxial de carga repetida, como é conhecido no Brasil, consiste em submeter um corpo de prova de mistura asfáltica, condicionado a uma temperatura específica, a um carregamento de compressão axial do tipo haversine de 0,1s de aplicação de carga seguido de 0,9s de descanso. A deformação permanente acumulada é registrada em função do número de ciclos e é numericamente diferenciada para calcular o *Flow Number*. O ensaio pode ser executado com ou sem confinamento e, caso seja aplicada pressão confinante, esta deve-se manter constante durante todo o ensaio. Na Figura 2.18 é apresentada uma ilustração que descreve a aplicação dos carregamentos durante o ensaio. Usualmente o número de ciclos aplicados no ensaio é limitado a 10.000 repetições, aproximadamente 3 horas de ensaio, ou até o corpo de prova do ensaio atingir 5% de deformação acumulada.

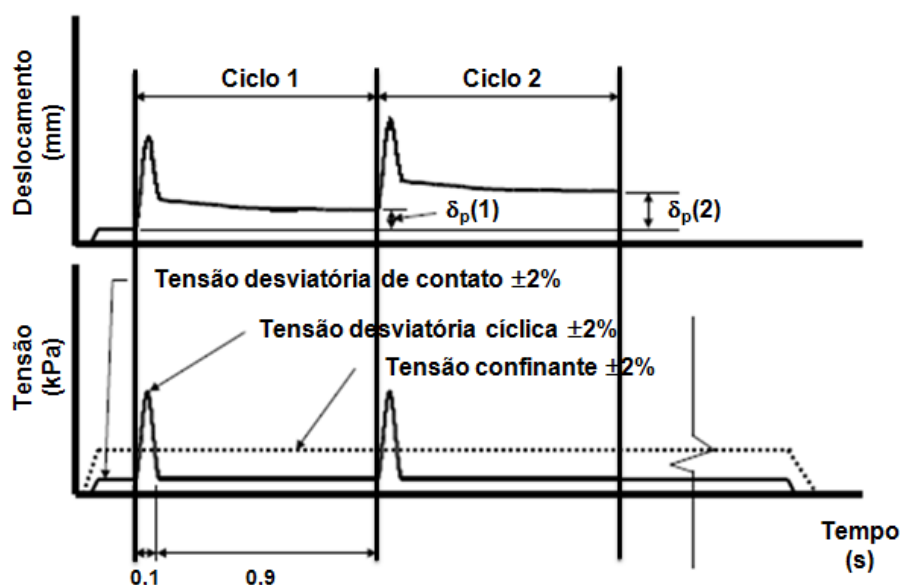


Figura 2.18: Representação esquemática do carregamento no ensaio de *Flow Number*. FONTE:

Bonaquist 2012

A deformação permanente ou plástica acumulada pode ser definida em uma região primária, uma secundária e uma terciária, conforme ilustra a Figura 2.19. Na região primária, a deformação permanente aumenta rapidamente, mas com taxa decrescente. Na região secundária, a taxa de deformação permanente se mantém em um valor constante até que começa a se incrementar na região terciária de fluência. O ponto no qual a região terciária se inicia é chamado de *Flow Number* (*FN*). Expressado de outra forma, o *FN* é o número do ciclo em que a taxa de deformação plástica é mínima e a partir do qual o CP atinge a ruptura.

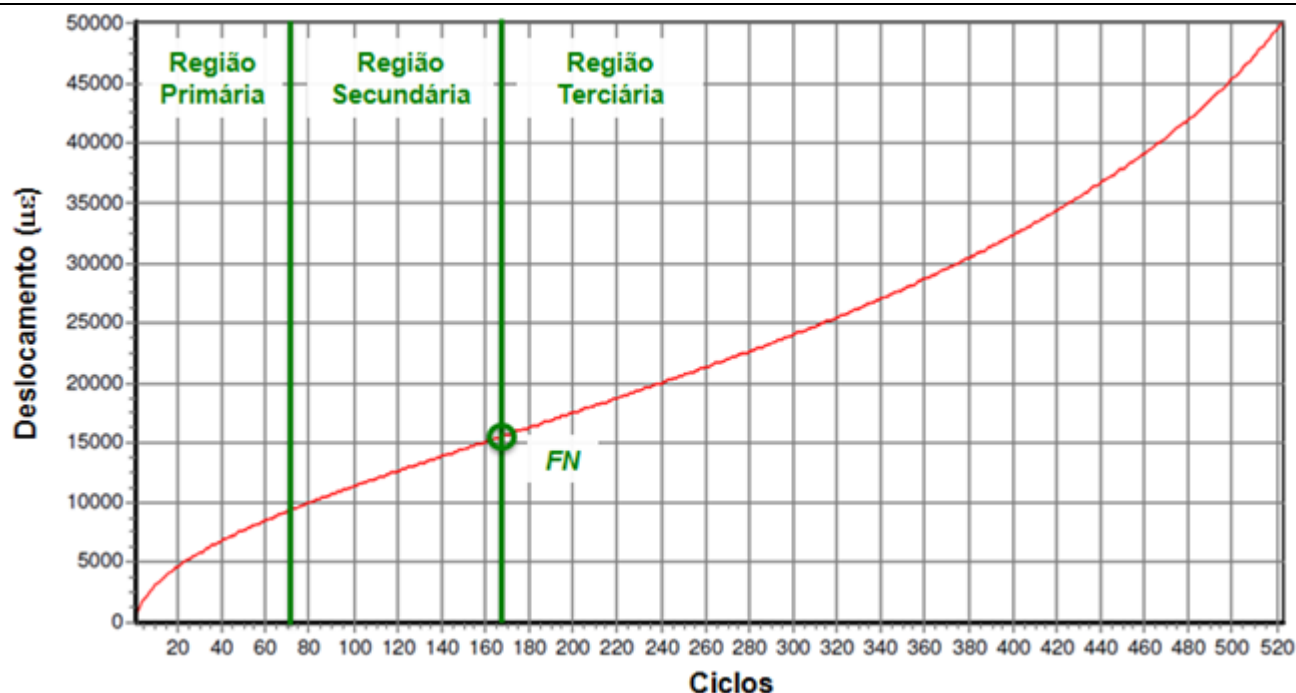


Figura 2.19: Regiões durante o ensaio uniaxial de carga repetida e obtenção do FN

O ensaio de *Flow Number* é influenciado por uma série de fatores, os quais devem ser selecionados para representar da forma mais similar possível as condições de campo. Segundo Hajj et al. (2010) esses fatores são:

- Estado triaxial das tensões (tensão axial desviatória e tensão confinante);
- Temperatura do ensaio (obtida da temperatura efetiva do pavimento estudado);
- Forma do pulso de carregamento,
- Tempo de carregamento do pulso;
- Tempo de descanso do pulso.

Bastos et al. (2015) realizaram um levantamento dos critérios utilizados por diversos pesquisadores para a execução do ensaio de *Flow Number*. Na Tabela 2.12 são apresentados esses critérios para este ensaio.

Tabela 2.12: Critérios de FN para diferentes níveis de tráfego. FONTE: Bastos et al. (2015)

| Pesquisas /<br>Níveis de Tráfego<br>(número N) | Vv<br>(%) | Temp.<br>(°C) | Tensão<br>(kPa) | Leve                | Médio                                    | Pesado                                   | Extremamente<br>Pesado |
|--|-----------|---------------|-----------------|---------------------|--|--|------------------------|
|  |           |               |                 | < 3x10 <sup>6</sup> | [3x10 <sup>6</sup> ; 1x10 <sup>7</sup> ] | [1x10 <sup>7</sup> ; 3x10 <sup>7</sup> ] | > 3x10 <sup>7</sup>    |
| Nascimento (2008)                              | 7,0±0,5   | 60,0          | 204             | -                   | 300                                      | 750                                      | -                      |
| <i>Advanced Asphalt Technologies</i> (2011)    | 4,7; 8,2  | 31,3; 54,3    | 600             | -                   | 53                                       | 190                                      | 740                    |
| Bonaquist (2012)                               | 6,0; 7,3  | 49,6          | 600             | 15                  | 50                                       | 135                                      | 415                    |

### 3. SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS (ETAPA B)

#### 3.1. Agregados pétreos

Para composição das diversas misturas asfálticas deste estudo foram coletados três agregados minerais, de acordo com a DNER PRO 120-97. As principais características desses materiais são descritos na continuação.

##### 3.1.1. Agregados graníticos do Estado de São Paulo

Os agregados graníticos do Estado de São Paulo foram coletados na Pedreira Jambeiro do Grupo Serveng, nas frações comerciais Brita 1", Pedrisco e Pó de Pedra. As características de granulometria desses materiais foram determinadas seguindo as instrutivas da AASHTO T-27 e AASHTO T-11 e os resultados são apresentadas na Tabela 3.1 e na Figura 3.1.

Tabela 3.1: Granulometria das frações dos agregados graníticos do Estado de São Paulo

| Diâmetro dos Grãos<br>(mm) | BRITA 1"<br>(%) | PEDRISCO<br>(%) | PÓ DE PEDRA<br>(%) |
|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| 32,0                       | 100,0           | 100,0           | 100,0              |
| 25,4                       | 100,0           | 100,0           | 100,0              |
| 19,1                       | 49,5            | 100,0           | 100,0              |
| 9,50                       | 17,9            | 98,8            | 100,0              |
| 4,75                       | 2,7             | 17,7            | 95,6               |
| 1,20                       | 2,0             | 6,5             | 67,4               |
| 0,60                       | 1,7             | 3,6             | 35,1               |
| 0,30                       | 1,3             | 2,8             | 21,4               |
| 0,150                      | 0,9             | 1,8             | 11,0               |



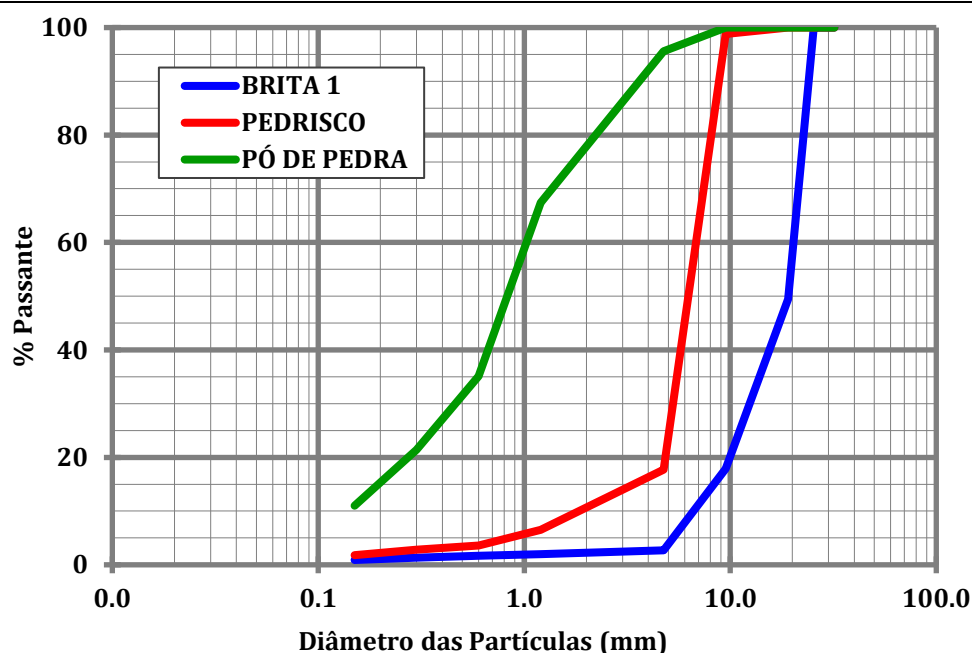


Figura 3.1: Granulometria das frações dos agregados graníticos do Estado de São Paulo

O ensaio de abrasão “Los Angeles” foi executado na fração Brita 1” seguindo as recomendações da Norma ABNT NBR-6465. Os resultados obtidos nesse ensaio mostram que a abrasão desse agregado é de 35%, atendendo às especificações brasileiras que limitam esse valor entre 40% e 55% para seu emprego em revestimentos asfálticos.

O ensaio de índice de forma (ABNT-NBR 7809) também foi utilizado para avaliar as frações de Brita 1” e Pedrisco destes agregados. Na Tabela 3.2 é apresentado um resumo dos resultados deste ensaio.

Tabela 3.2: Índice de forma dos agregados graníticos do Estado de São Paulo (ABNT-NBR 7809)

| Fração Granulométrica             | Brita 1" | Pedrisco | Recomendação |
|-----------------------------------|----------|----------|--------------|
| Índice de Forma                   | 1 : 2,3  | 1 : 3,1  | Máximo 1 : 4 |
| Grãos com relação c/e maior que 5 | 0%       | 3%       | Máximo 10%   |

O ensaio de durabilidade foi executado de acordo com as recomendações da AASHTO T-104-99 para os agregados graúdos e miúdos, utilizando a solução de sulfato de sódio. Na Tabela 3.3 são apresentados os resultados da execução desse ensaio.

Tabela 3.3: Resultados do ensaio de durabilidade (AASHTO T-104-99)

| Fração Granulométrica    | Agregado Grosso | Agregado Fino | Recomendação |
|--------------------------|-----------------|---------------|--------------|
| % Perda após 5 ciclos(*) | 1,9             | 1,4           | < 12% (**)   |

(\*) 1 ciclo = 16 a 18h imerso em solução de sulfato de sódio a 21°C - 4 a 6h em estufa a 110°C

(\*\*) ASTM D 692

A densidade real, a densidade aparente e a absorção das frações dos agregados foram determinadas seguindo as recomendações da AASHTO T-85. Os resultados são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Densidade e absorção (AASHTO T-104-99)

| Fração Granulométrica | Brita 1" | Pedrisco | Pó de Pedra |
|-----------------------|----------|----------|-------------|
| Densidade Real        | 2,660    | 2,676    | 2,695       |
| Densidade Aparente    | 2,625    | 2,627    | 2,659       |
| Absorção (%)          | 0,5      | 0,7      | 0,5         |

Finalmente foi realizado o ensaio de equivalente areia na fração pó de pedra dos agregados, de acordo com a DNER 054/97. O equivalente de areia obtido foi de 58,1%, atendendo as recomendações para seu emprego em misturas asfálticas, que limitam esse valor em 55%.

### 3.1.2. Agregados basálticos do Estado de São Paulo

Os agregados basálticos do Estado de São Paulo foram coletados na Pedreira Sanson, nas frações comerciais Brita 1", Pedrisco e Pó de Pedra. As características de granulometria desses materiais foram determinadas seguindo as instrutivas da AASHTO T-27 e AASHTO T-11 e os resultados são apresentados na Tabela 3.5. e na Figura 3.2.

Tabela 3.5: Granulometria das frações dos agregados basálticos do Estado de São Paulo

| Diâmetro dos Grãos (mm) | BRITA 1" (%) | PEDRISCO (%) | PÓ DE PEDRA (%) |
|-------------------------|--------------|--------------|-----------------|
| 32,0                    | 100,0        | 100,0        | 100,0           |
| 25,4                    | 100,0        | 100,0        | 100,0           |
| 19,1                    | 63,5         | 100,0        | 100,0           |
| 9,50                    | 28,3         | 99,1         | 100,0           |
| 4,75                    | 3,5          | 10,9         | 98,7            |
| 1,20                    | 1,4          | 0,9          | 70,8            |
| 0,60                    | 0,8          | 0,4          | 34,8            |
| 0,30                    | 0,6          | 0,3          | 21,6            |
| 0,150                   | 0,4          | 0,2          | 12,2            |

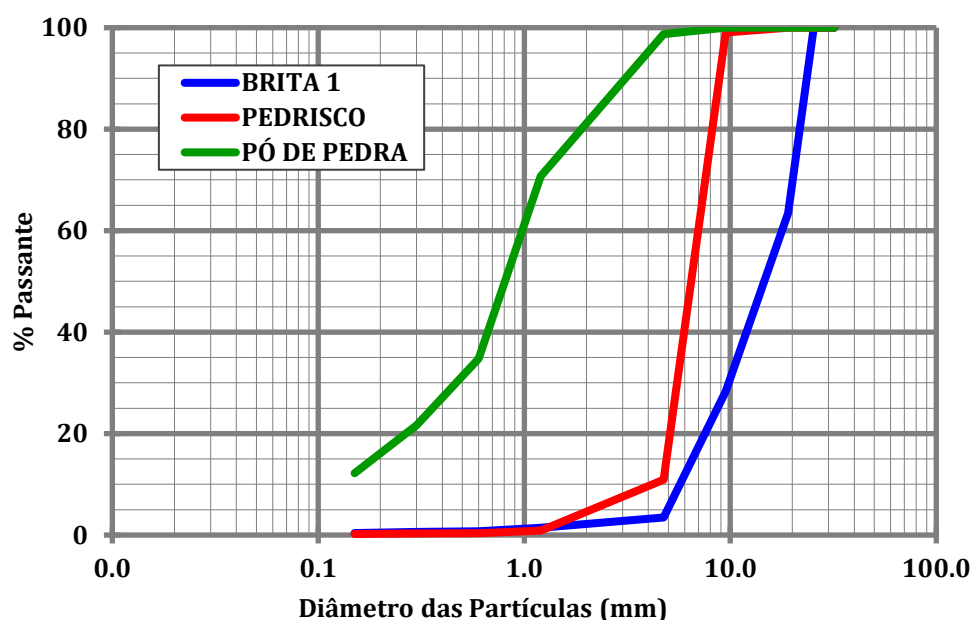


Figura 3.2: Granulometria das frações dos agregados basálticos do Estado de São Paulo

O ensaio de abrasão “Los Angeles” foi executado na fração Brita 1” seguindo as recomendações da Norma ABNT NBR-6465. Os resultados obtidos nesse ensaio mostram que a abrasão desse agregado é de 15%, atendendo às especificações brasileiras que limitam esse valor entre 40% e 55% para seu emprego em revestimentos asfálticos.

O ensaio de índice de forma (ABNT-NBR 7809) também foi utilizado para avaliar as frações Brita 1” e Pedrisco destes agregados. Na Tabela 3.6 é apresentado um resumo dos resultados deste ensaio.

Tabela 3.6: Índice de forma dos agregados graníticos do Estado de São Paulo (ABNT-NBR 7809)

| Fração Granulométrica             | Brita 1" | Pedrisco | Recomendação |
|-----------------------------------|----------|----------|--------------|
| Índice de Forma                   | 1 : 3,0  | 1 : 3,8  | Máximo 1 : 4 |
| Grãos com relação c/e maior que 5 | 2%       | 7%       | Máximo 10%   |

O ensaio de durabilidade foi executado de acordo com as recomendações da AASHTO T-104-99 para os agregados graúdos e miúdos, utilizando a solução de sulfato de sódio. Na Tabela 3.7 são apresentados os resultados da execução desse ensaio.

Tabela 3.7: Resultados do ensaio de durabilidade (AASHTO T-104-99)

| Fração Granulométrica    | Agregado Grosso | Agregado Fino | Recomendação |
|--------------------------|-----------------|---------------|--------------|
| % Perda após 5 ciclos(*) | 0,4             | 0,9           | < 12% (**)   |

(\*) 1 ciclo = 16 a 18h imerso em solução de sulfato de sódio a 21°C - 4 a 6h em estufa a 110°C

(\*\*) ASTM D 692

A densidade real, a densidade aparente e a absorção das frações dos agregados foram determinadas seguindo as recomendações da AASHTO T-85. Os resultados são apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Densidade e absorção (AASHTO T-104-99)

| Fração Granulométrica | Brita 1" | Pedrisco | Pó de Pedra |
|-----------------------|----------|----------|-------------|
| Densidade Real        | 3,022    | 3,019    | 3,016       |
| Densidade Aparente    | 2,861    | 2,858    | 2,874       |
| Absorção (%)          | 1,9      | 1,9      | 1,6         |

Finalmente foi realizado o ensaio de equivalente areia na fração pó de pedra dos agregados, de acordo com a DNER 054/97. O equivalente de areia obtido foi de 58,1%, atendendo as recomendações para seu emprego em misturas asfálticas, que limitam esse valor em 55%.

### 3.1.2. Agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

Os agregados graníticos também foram coletados no Estado de Rio de Janeiro na Pedreira Pombal e Enfol, nas frações comerciais Brita 1", Pedrisco e Pó de Pedra. As características de granulometria desses materiais foram determinadas de acordo com a AASHTO T-27 e AASHTO T-11 e os resultados são apresentadas na Tabela 3.9. e na Figura 3.3.

Tabela 3.9: Granulometria das frações dos agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| Diâmetro dos Grãos (mm) | BRITA 1" POMBAL (%) | PEDRISCO POMBAL (%) | PÓ DE PEDRA POMBAL (%) | PÓ DE PEDRA ENFOL (%) |
|-------------------------|---------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|
| 32.0                    | 100                 | 100                 | 100                    | 100                   |
| 25.4                    | 100                 | 100                 | 100                    | 100                   |
| 19.1                    | 13                  | 94                  | 100                    | 100                   |
| 9.50                    | 4                   | 71                  | 100                    | 100                   |
| 4.75                    | 1                   | 7                   | 94                     | 96                    |
| 1.20                    | 1                   | 3                   | 73                     | 78                    |
| 0.60                    | 1                   | 2                   | 50                     | 36                    |
| 0.30                    | 1                   | 2                   | 33                     | 16                    |
| 0.150                   | 0                   | 1                   | 13                     | 8                     |

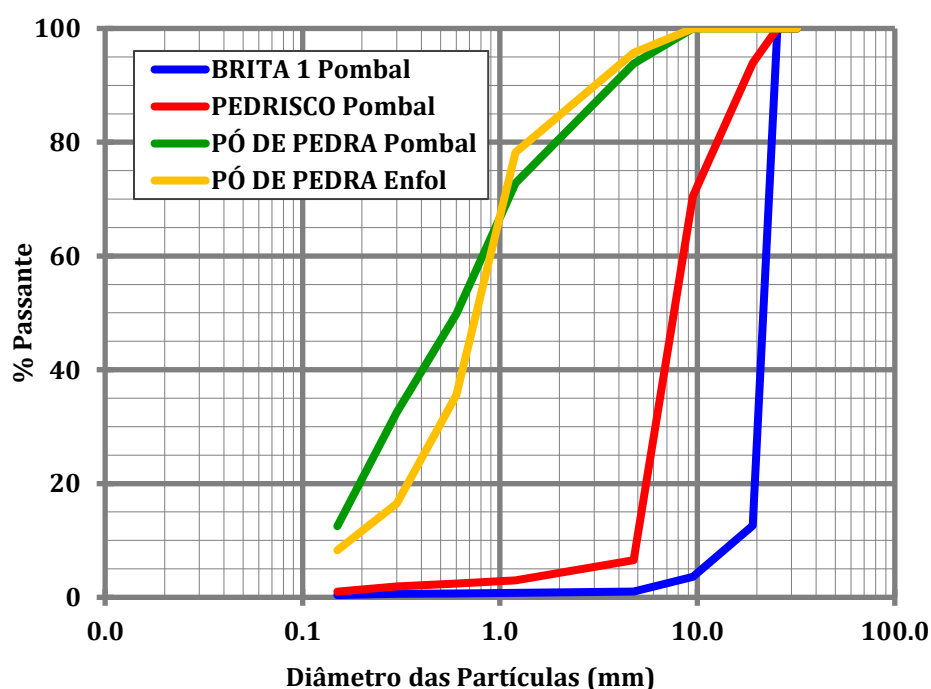


Figura 3.3: Granulometria das frações dos agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

O ensaio de abrasão “Los Angeles” foi executado na fração Brita 1” seguindo as recomendações da Norma ABNT NBR-6465. Os resultados obtidos nesse ensaio mostram que a abrasão desse agregado é de 46%, atendendo às especificações brasileiras que limitam esse valor entre 40% e 55% para seu emprego em revestimentos asfálticos.

O ensaio de índice de forma (ABNT-NBR 7809) também foi utilizado para avaliar as frações Brita 1” e Pedrisco destes agregados. Na Tabela 3.10 é apresentado um resumo dos resultados deste ensaio.

Tabela 3.10: Índice de forma dos agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro (ABNT-NBR 7809)

| Fração Granulométrica             | Brita 1"<br>Pombal | Pedrisco<br>Pombal | Recomendação |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------|
| Índice de Forma                   | 1 : 2,5            | 1 : 2,3            | Máximo 1 : 4 |
| Grãos com relação c/e maior que 5 | 0%                 | 0%                 | Máximo 10%   |

O ensaio de durabilidade foi executado de acordo com as recomendações da AASHTO T-104-99 para os agregados graúdos e miúdos, utilizando a solução de sulfato de sódio. Na Tabela 3.11 são apresentados os resultados da execução desse ensaio.

Tabela 3.11: Resultados do ensaio de durabilidade (AASHTO T-104-99)

| Fração Granulométrica    | Agregado Grosso<br>Pombal | Agregado Fino<br>Pombal | Recomendação |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------|
| % Perda após 5 ciclos(*) | 3,2                       | 1,9                     | < 12% (**)   |

(\*) 1 ciclo = 16 a 18h imerso em solução de sulfato de sódio a 21°C - 4 a 6h em estufa a 110°C

(\*\*) ASTM D 692

A densidade real, densidade real e absorção das frações dos agregados foram determinadas seguindo as recomendações da AASHTO T-85. Os resultados são apresentados na Tabela 3.12.

Tabela 3.12: Densidade e absorção (AASHTO T-104-99)

| Fração Granulométrica | Brita 1"<br>Pombal | Pedrisco<br>Pombal | Pó de Pedra<br>Pombal | Pó de Pedra<br>Enfol |
|-----------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|
| Densidade Real        | 2,807              | 2,809              | 2,838                 | 2,700                |
| Densidade Aparente    | 2,765              | 2,750              | 2,823                 | 2,679                |
| Absorção (%)          | 0,5                | 0,8                | 0,2                   | 0,3                  |

Finalmente foi realizado o ensaio de equivalente areia na fração pó de pedra dos agregados, de acordo com a DNER 054/97. O equivalente de areia obtido foi de 55,2% para a pedreira Pombal e 59,8 para a pedreira Enfol, atendendo as recomendações para seu emprego em misturas asfálticas, que limitam esse valor em 55%.

### 3.2. Ligantes Asfálticos

Para elaboração deste estudo foram selecionados 12 ligantes asfálticos disponíveis no mercado nacional, identificados conforme a Tabela 3.13.

Até elaboração deste relatório foi concluída a caracterização dos doze ligantes asfálticos selecionados, conforme o cronograma estabelecido para a pesquisa. Os resultados dos ensaios de caracterização são apresentados nas Tabelas 3.14 a 3.25.

Tabela 3.13: Ligantes asfálticos programados para serem estudados nesta pesquisa

| Número | Ligante Asfáltico                                       | Nomenclatura utilizada |
|--------|---|------------------------|
| 1      | CAP 50/70   | CAP 50/70              |
| 2      | CAP 30/45   | CAP 30/45              |
| 3      | Asfalto Modificado por Polímero 60/85                   | AMP1                   |
| 4      | Asfalto Modificado por Polímero 60/85                   | AMP2                   |
| 5      | Asfalto Modificado por Polímero 60/85                   | AMP3                   |
| 6      | Asfalto Modificado por Polímero 60/85                   | AMP4                   |
| 7      | Asfalto Modificado por Borracha moída de pneus tipo AB8 | AB1                    |
| 8      | Asfalto Modificado por Borracha moída de pneus tipo AB8 | AB2                    |
| 9      | Asfalto Modificado por Borracha moída de pneus tipo AB8 | AB3                    |
| 10     | Ligante Asfáltico de Alto Módulo                        | AM1                    |
| 11     | Ligante Asfáltico de Alto Módulo                        | AM2                    |
| 12     | Ligante Asfáltico de Alto Módulo                        | AM3                    |



Tabela 3.14: Caracterização do CAP 50/70

| Características                                    | Unidades          | Resultados | Especificação (*) | Métodos de     |
|--|-------------------|------------|-------------------|----------------|
|  |                   |            | CAP 50/70         | Ensaio         |
| Densidade  | g/dm <sup>3</sup> | 1,013      | -                 | DNER ME-193    |
| Viscosidade Brookfield a 135°C, 20 rpm, spindle 21 | cP                | 360        | mínimo 274        | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 150°C, 50rpm, spindle 21  | cP                | 180        | mínimo 112        | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 177°C, 100rpm, spindle 21 | cP                | 67         | 57 - 285          | ABNT NBR 15184 |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) ( <i>Pen</i> )         | 0,1mm             | 53         | 50 - 70           | ABNT NBR 6576  |
| Ponto de Amolecimento ( <i>Pa</i> )                | °C                | 52         | mínimo 46         | ABNT NBR 6560  |
| Índice de Susceptibilidade Térmica ( <i>I</i> )    | -                 | -0,6       | (-1,5) a (+0,7)   | ANP-R19        |
| Espuma a 177°C                                     | -                 | negativo   | negativo          | ANP-R19        |

(\*) ANP (2005)

Tabela 3.15: Caracterização do CAP 30/45

| Características                                    | Unidades          | Resultados | Especificação (*) | Métodos de     |
|--|-------------------|------------|-------------------|----------------|
|  |                   |            | CAP 30/45         | Ensaio         |
| Densidade  | g/dm <sup>3</sup> | 1,007      | -                 | DNER ME-193    |
| Viscosidade Brookfield a 135°C, 20 rpm, spindle 21 | cP                | 470        | mínimo 374        | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 150°C, 20rpm, spindle 21  | cP                | 228        | mínimo 203        | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 177°C, 100rpm, spindle 21 | cP                | 81         | 76 - 285          | ABNT NBR 15184 |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) ( <i>Pen</i> )         | 0,1mm             | 32         | 30 - 45           | ABNT NBR 6576  |
| Ponto de Amolecimento ( <i>Pa</i> )                | °C                | 52         | mínimo 52         | ABNT NBR 6560  |
| Índice de Susceptibilidade Térmica ( <i>I</i> )    | -                 | -1,5       | (-1,5) a (+0,7)   | ANP-R19        |
| Espuma a 177°C                                     | -                 | negativo   | negativo          | ANP-R19        |

(\*) ANP (2005)

Tabela 3.16: Caracterização do asfalto modificado por polímero AMP1

| Características                                    | Unidades          | Resultados | Especificação (*) | Métodos de     |
|--|-------------------|------------|-------------------|----------------|
|  |                   |            | AMP 60/85         | Ensaio         |
| Densidade  | g/dm <sup>3</sup> | 1,012      | -                 | DNER ME-193    |
| Viscosidade Brookfield a 135°C, 20 rpm, spindle 21 | cP                | 1290       | máximo 3000       | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 150°C, 50rpm, spindle 21  | cP                | 632        | máximo 2000       | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 177°C, 100rpm, spindle 21 | cP                | 231        | máximo 1000       | ABNT NBR 15184 |
| Recuperação Elástica Torciômetro 25°C, 30min       | %                 | 76         | mínimo 60         | NLT 329/91     |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) (Pen)                  | 0,1mm             | 53         | 40 - 70           | ABNT NBR 6576  |
| Ponto de Amolecimento (Pa)                         | °C                | 64         | mínimo 60         | ABNT NBR 6560  |
| Espuma a 177°C                                     | -                 | negativo   | negativo          | ANP-R19        |

(\*) ANP (2007)

Tabela 3.17: Caracterização do asfalto modificado por polímero AMP2

| Características                                    | Unidades          | Resultados | Especificação (*) | Métodos de     |
|--|-------------------|------------|-------------------|----------------|
|  |                   |            | AMP 60/85         | Ensaio         |
| Densidade  | g/dm <sup>3</sup> | 1,006      | -                 | DNER ME-193    |
| Viscosidade Brookfield a 135°C, 20 rpm, spindle 21 | cP                | 1952       | máximo 3000       | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 150°C, 50rpm, spindle 21  | cP                | 797        | máximo 2000       | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 177°C, 100rpm, spindle 21 | cP                | 226        | máximo 1000       | ABNT NBR 15184 |
| Recuperação Elástica Torciômetro 25°C, 30min       | %                 | 66         | mínimo 60         | NLT 329/91     |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) (Pen)                  | 0,1mm             | 50         | 40 - 70           | ABNT NBR 6576  |
| Ponto de Amolecimento (Pa)                         | °C                | 67         | mínimo 60         | ABNT NBR 6560  |
| Espuma a 177°C                                     | -                 | negativo   | negativo          | ANP-R19        |

(\*) ANP (2007)

Tabela 3.18: Caracterização do asfalto modificado por polímero AMP3

| Características                                    | Unidades          | Resultados | Especificação (*) | Métodos de     |
|--|-------------------|------------|-------------------|----------------|
|  |                   |            | AMP 60/85         | Ensaio         |
| Densidade  | g/dm <sup>3</sup> | 1,057      | -                 | DNER ME-193    |
| Viscosidade Brookfield a 135°C, 20 rpm, spindle 21 | cP                | 1560       | máximo 3000       | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 150°C, 50rpm, spindle 21  | cP                | 766        | máximo 2000       | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 177°C, 100rpm, spindle 21 | cP                | 294        | máximo 1000       | ABNT NBR 15184 |
| Recuperação Elástica Torciômetro 25°C, 30min       | %                 | 67         | mínimo 60         | NLT 329/91     |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) (Pen)                  | 0,1mm             | 40         | 40 - 70           | ABNT NBR 6576  |
| Ponto de Amolecimento (Pa)                         | °C                | 65         | mínimo 60         | ABNT NBR 6560  |
| Espuma a 177°C                                     | -                 | negativo   | negativo          | ANP-R19        |

(\*) ANP (2007)

Tabela 3.19: Caracterização do asfalto modificado por polímero AMP4

| Características                                    | Unidades          | Resultados | Especificação (*) | Métodos de     |
|--|-------------------|------------|-------------------|----------------|
|  |                   |            | AMP 60/85         | Ensaio         |
| Densidade  | g/dm <sup>3</sup> | 1,004      | -                 | DNER ME-193    |
| Viscosidade Brookfield a 135°C, 20 rpm, spindle 21 | cP                | 1240       | máximo 3000       | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 150°C, 50rpm, spindle 21  | cP                | 652        | máximo 2000       | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 177°C, 100rpm, spindle 21 | cP                | 218        | máximo 1000       | ABNT NBR 15184 |
| Recuperação Elástica Torciômetro 25°C, 30min       | %                 | 74         | mínimo 60         | NLT 329/91     |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) (Pen)                  | 0,1mm             | 57         | 40 - 70           | ABNT NBR 6576  |
| Ponto de Amolecimento (Pa)                         | °C                | 66         | mínimo 60         | ABNT NBR 6560  |
| Espuma a 177°C                                     | -                 | negativo   | negativo          | ANP-R19        |

(\*) ANP (2007)

Tabela 3.20: Caracterização do asfalto modificado por borracha de pneus moída AB1

| Características                                   | Unidades          | Resultados | Especificação (*) | Métodos de     |
|---|-------------------|------------|-------------------|----------------|
|   |                   |            | Borracha AB(8)    | Ensaio         |
| Densidade Relativa, 25°C                          | g/dm <sup>3</sup> | 1,026      | 1,00 - 1,05       | DNER ME-193    |
| Viscosidade Brookfield a 160°C, 20 rpm, spindle 3 | cP                | 2140       | -                 | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 175°C, 20rpm, spindle 3  | cP                | 1360       | 800 - 2000        | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 185°C, 20rpm, spindle 3  | cP                | 840        | -                 | ABNT NBR 15184 |
| Recuperação Elástica Torciômetro 25°C, 30min      | %                 | 62         | mínimo 60         | NLT 329/91     |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) (Pen)                 | 0,1mm             | 44         | 30 - 70           | ABNT NBR 6576  |
| Ponto de Amolecimento (Pa)                        | °C                | 57         | mínimo 50         | NBR 6560       |

(\*) ANP (2008)

Tabela 3.21: Caracterização do asfalto modificado por borracha de pneus moída AB2

| Características                                   | Unidades          | Resultados | Especificação (*) | Métodos de     |
|---|-------------------|------------|-------------------|----------------|
|   |                   |            | Borracha AB(8)    | Ensaio         |
| Densidade Relativa, 25°C                          | g/dm <sup>3</sup> | 1,031      | 1,00 - 1,05       | DNER ME-193    |
| Viscosidade Brookfield a 160°C, 20 rpm, spindle 3 | cP                | 1970       | -                 | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 175°C, 20rpm, spindle 3  | cP                | 1190       | 800 - 2000        | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 185°C, 20rpm, spindle 3  | cP                | 670        | -                 | ABNT NBR 15184 |
| Recuperação Elástica Torciômetro 25°C, 30min      | %                 | 70         | mínimo 60         | NLT 329/91     |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) (Pen)                 | 0,1mm             | 42         | 30 - 70           | ABNT NBR 6576  |
| Ponto de Amolecimento (Pa)                        | °C                | 59         | mínimo 50         | NBR 6560       |

(\*) ANP (2008)

Tabela 3.22: Caracterização do asfalto modificado por borracha de pneus moída AB3

| Características                                   | Unidades          | Resultados | Especificação (*) | Métodos de     |
|---|-------------------|------------|-------------------|----------------|
|   |                   |            | Borracha AB(8)    | Ensaio         |
| Densidade Relativa, 25°C                          | g/dm <sup>3</sup> | 1,03       | 1,00 - 1,05       | DNER ME-193    |
| Viscosidade Brookfield a 160°C, 20 rpm, spindle 3 | cP                | 2100       | -                 | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 175°C, 20rpm, spindle 3  | cP                | 1320       | 800 - 2000        | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 185°C, 20rpm, spindle 3  | cP                | 800        | -                 | ABNT NBR 15184 |
| Recuperação Elástica Torciômetro 25°C, 30min      | %                 | 69         | mínimo 60         | NLT 329/91     |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) (Pen)                 | 0,1mm             | 58         | 30 - 70           | ABNT NBR 6576  |
| Ponto de Amolecimento (Pa)                        | °C                | 59         | mínimo 50         | NBR 6560       |

(\*) ANP (2008)

Tabela 3.23: Caracterização do ligante asfáltico de alto módulo AM1

| Características                                    | Unidades          | Resultados | Especificação (*) | Métodos de     |
|--|-------------------|------------|-------------------|----------------|
|  |                   |            | EME 15-25         | Ensaio         |
| Densidade Relativa, 25°C                           | g/dm <sup>3</sup> | 1,018      | -                 | DNER ME-193    |
| Viscosidade Brookfield a 135°C, 20 rpm, spindle 21 | cP                | 1962       | 900               | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 150°C, 50rpm, spindle 21  | cP                | 831        | -                 | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 177°C, 100rpm, spindle 21 | cP                | 238        | -                 | ABNT NBR 15184 |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) (Pen)                  | 0,1mm             | 20         | 15 - 25           | ABNT NBR 6576  |
| Ponto de Amolecimento (Pa)                         | °C                | 67         | 60 - 70           | NBR 6560       |
| Índice de Susceptibilidade Térmica (I)             | -                 | 0,3        | -                 | ANP-R19        |
| Espuma a 177°C                                     | -                 | negativo   | -                 | ANP-R19        |

(\*) EN 13924

Tabela 3.24: Caracterização do ligante asfáltico de alto módulo AM2

| Características                                    | Unidades          | Resultados | Especificação (*) | Métodos de     |
|--|-------------------|------------|-------------------|----------------|
|  |                   |            | EME 15-25         | Ensaio         |
| Densidade Relativa, 25°C                           | g/dm <sup>3</sup> | 1,019      | -                 | DNER ME-193    |
| Viscosidade Brookfield a 135°C, 20 rpm, spindle 21 | cP                | 1200       | 900               | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 150°C, 50rpm, spindle 21  | cP                | 520        | -                 | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 177°C, 100rpm, spindle 21 | cP                | 124        | -                 | ABNT NBR 15184 |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) (Pen)                  | 0,1mm             | 21         | 15 - 25           | ABNT NBR 6576  |
| Ponto de Amolecimento (Pa)                         | °C                | 63         | 60 - 70           | NBR 6560       |
| Índice de Susceptibilidade Térmica (I)             | -                 | -0,3       | -                 | ANP-R19        |
| Espuma a 177°C                                     | -                 | negativo   | -                 | ANP-R19        |

(\*) EN 13924

Tabela 3.25: Caracterização do ligante asfáltico de alto módulo AM3

| Características                                    | Unidades          | Resultados | Especificação (*) | Métodos de     |
|--|-------------------|------------|-------------------|----------------|
|  |                   |            | EME 15-25         | Ensaio         |
| Densidade Relativa, 25°C                           | g/dm <sup>3</sup> | 1,088      | -                 | DNER ME-193    |
| Viscosidade Brookfield a 135°C, 20 rpm, spindle 21 | cP                | 2215       | 900               | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 150°C, 50rpm, spindle 21  | cP                | 1020       | -                 | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 177°C, 100rpm, spindle 21 | cP                | 367        | -                 | ABNT NBR 15184 |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) (Pen)                  | 0,1mm             | 24         | 15 - 25           | ABNT NBR 6576  |
| Ponto de Amolecimento (Pa)                         | °C                | 65         | 60 - 70           | NBR 6560       |
| Índice de Susceptibilidade Térmica (I)             | -                 | -0,6       | -                 | ANP-R19        |
| Espuma a 177°C                                     | -                 | negativo   | -                 | ANP-R19        |

(\*) EN 13924

#### **4. DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS (ETAPA C)**

Nesta etapa foram elaborados os projetos de dosagem das misturas asfálticas, para os três tipos de agregados, as quatro granulometrias e os doze ligantes asfálticos selecionados, totalizando 144 dosagens. Nas Tabelas 4.1 a 4.6 são apresentadas as misturas asfálticas com a sua respectiva identificação.

Tabela 4.1: Misturas asfálticas de granulometria Faixa III-DERSA e EGL 19,0mm, com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Agregados | Local de coleta dos Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico |
|-------------------|-----------|-------------------------------|----------------------|-------------------|
| 1                 | Granito   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | CAP 30/45         |
| 2                 | Granito   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | CAP 50/70         |
| 3                 | Granito   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AMP1              |
| 4                 | Granito   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AMP2              |
| 5                 | Granito   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AMP3              |
| 6                 | Granito   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AMP4              |
| 7                 | Granito   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AB1               |
| 8                 | Granito   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AB2               |
| 9                 | Granito   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AB3               |
| 10                | Granito   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AM1               |
| 11                | Granito   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AM2               |
| 12                | Granito   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AM3               |
| 13                | Granito   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | CAP 30/45         |
| 14                | Granito   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | CAP 50/70         |
| 15                | Granito   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AMP1              |
| 16                | Granito   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AMP2              |
| 17                | Granito   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AMP3              |
| 18                | Granito   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AMP4              |
| 19                | Granito   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AB1               |
| 20                | Granito   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AB2               |
| 21                | Granito   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AB3               |
| 22                | Granito   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AM1               |
| 23                | Granito   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AM2               |
| 24                | Granito   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AM3               |



Tabela 4.2: Misturas asfálticas de granulometria EGL 9,5mm e GAP, com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| <b>Mistura Asfáltica</b> | <b>Agregados</b> | <b>Local de coleta dos Agregados</b> | <b>Faixa Granulométrica</b> | <b>Ligante Asfáltico</b> |
|--------------------------|------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 25                       | Granito          | E. de São Paulo                      | EGL 9,5mm                   | CAP 30/45                |
| 26                       | Granito          | E. de São Paulo                      | EGL 9,5mm                   | CAP 50/70                |
| 27                       | Granito          | E. de São Paulo                      | EGL 9,5mm                   | AMP1                     |
| 28                       | Granito          | E. de São Paulo                      | EGL 9,5mm                   | AMP2                     |
| 29                       | Granito          | E. de São Paulo                      | EGL 9,5mm                   | AMP3                     |
| 30                       | Granito          | E. de São Paulo                      | EGL 9,5mm                   | AMP4                     |
| 31                       | Granito          | E. de São Paulo                      | EGL 9,5mm                   | AB1                      |
| 32                       | Granito          | E. de São Paulo                      | EGL 9,5mm                   | AB2                      |
| 33                       | Granito          | E. de São Paulo                      | EGL 9,5mm                   | AB3                      |
| 34                       | Granito          | E. de São Paulo                      | EGL 9,5mm                   | AM1                      |
| 35                       | Granito          | E. de São Paulo                      | EGL 9,5mm                   | AM2                      |
| 36                       | Granito          | E. de São Paulo                      | EGL 9,5mm                   | AM3                      |
| 37                       | Granito          | E. de São Paulo                      | GAP                         | CAP 30/45                |
| 38                       | Granito          | E. de São Paulo                      | GAP                         | CAP 50/70                |
| 39                       | Granito          | E. de São Paulo                      | GAP                         | AMP1                     |
| 40                       | Granito          | E. de São Paulo                      | GAP                         | AMP2                     |
| 41                       | Granito          | E. de São Paulo                      | GAP                         | AMP3                     |
| 42                       | Granito          | E. de São Paulo                      | GAP                         | AMP4                     |
| 43                       | Granito          | E. de São Paulo                      | GAP                         | AB1                      |
| 44                       | Granito          | E. de São Paulo                      | GAP                         | AB2                      |
| 45                       | Granito          | E. de São Paulo                      | GAP                         | AB3                      |
| 46                       | Granito          | E. de São Paulo                      | GAP                         | AM1                      |
| 47                       | Granito          | E. de São Paulo                      | GAP                         | AM2                      |
| 48                       | Granito          | E. de São Paulo                      | GAP                         | AM3                      |

Tabela 4.3: Misturas asfálticas de granulometria Faixa III-DERSA e EGL 19,0mm, com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| Mistura Asfáltica | Agregados | Local de coleta dos Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico |
|-------------------|-----------|-------------------------------|----------------------|-------------------|
| 49                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | III-DERSA            | CAP 30/45         |
| 50                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | III-DERSA            | CAP 50/70         |
| 51                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | III-DERSA            | AMP1              |
| 52                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | III-DERSA            | AMP2              |
| 53                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | III-DERSA            | AMP3              |
| 54                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | III-DERSA            | AMP4              |
| 55                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | III-DERSA            | AB1               |
| 56                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | III-DERSA            | AB2               |
| 57                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | III-DERSA            | AB3               |
| 58                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | III-DERSA            | AM1               |
| 59                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | III-DERSA            | AM2               |
| 60                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | III-DERSA            | AM3               |
| 61                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | EGL 19,0mm           | CAP 30/45         |
| 62                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | EGL 19,0mm           | CAP 50/70         |
| 63                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | EGL 19,0mm           | AMP1              |
| 64                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | EGL 19,0mm           | AMP2              |
| 65                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | EGL 19,0mm           | AMP3              |
| 66                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | EGL 19,0mm           | AMP4              |
| 67                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | EGL 19,0mm           | AB1               |
| 68                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | EGL 19,0mm           | AB2               |
| 69                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | EGL 19,0mm           | AB3               |
| 70                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | EGL 19,0mm           | AM1               |
| 71                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | EGL 19,0mm           | AM2               |
| 72                | Granito   | E. do Rio de Janeiro          | EGL 19,0mm           | AM3               |

Tabela 4.4: Misturas asfálticas de granulometria EGL 9,5mm e GAP, com agregados graníticos do Estado de São Paulo do Rio de Janeiro

| <b>Mistura Asfáltica</b> | <b>Agregados</b> | <b>Local de coleta dos Agregados</b> | <b>Faixa Granulométrica</b> | <b>Ligante Asfáltico</b> |
|--------------------------|------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 73                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | EGL 9,5mm                   | CAP 30/45                |
| 74                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | EGL 9,5mm                   | CAP 50/70                |
| 75                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | EGL 9,5mm                   | AMP1                     |
| 76                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | EGL 9,5mm                   | AMP2                     |
| 77                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | EGL 9,5mm                   | AMP3                     |
| 78                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | EGL 9,5mm                   | AMP4                     |
| 79                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | EGL 9,5mm                   | AB1                      |
| 80                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | EGL 9,5mm                   | AB2                      |
| 81                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | EGL 9,5mm                   | AB3                      |
| 82                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | EGL 9,5mm                   | AM1                      |
| 83                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | EGL 9,5mm                   | AM2                      |
| 84                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | EGL 9,5mm                   | AM3                      |
| 85                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | GAP                         | CAP 30/45                |
| 86                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | GAP                         | CAP 50/70                |
| 87                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | GAP                         | AMP1                     |
| 88                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | GAP                         | AMP2                     |
| 89                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | GAP                         | AMP3                     |
| 90                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | GAP                         | AMP4                     |
| 91                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | GAP                         | AB1                      |
| 92                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | GAP                         | AB2                      |
| 93                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | GAP                         | AB3                      |
| 94                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | GAP                         | AM1                      |
| 95                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | GAP                         | AM2                      |
| 96                       | Granito          | E. do Rio de Janeiro                 | GAP                         | AM3                      |

Tabela 4.5: Misturas asfálticas de granulometria Faixa III-DERSA e EGL 19,0mm, com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Agregados | Local de coleta dos Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico |
|-------------------|-----------|-------------------------------|----------------------|-------------------|
| 97                | Basalto   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | CAP 30/45         |
| 98                | Basalto   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | CAP 50/70         |
| 99                | Basalto   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AMP1              |
| 100               | Basalto   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AMP2              |
| 101               | Basalto   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AMP3              |
| 102               | Basalto   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AMP4              |
| 103               | Basalto   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AB1               |
| 104               | Basalto   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AB2               |
| 105               | Basalto   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AB3               |
| 106               | Basalto   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AM1               |
| 107               | Basalto   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AM2               |
| 108               | Basalto   | E. de São Paulo               | III-DERSA            | AM3               |
| 109               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | CAP 30/45         |
| 110               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | CAP 50/70         |
| 111               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AMP1              |
| 112               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AMP2              |
| 113               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AMP3              |
| 114               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AMP4              |
| 115               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AB1               |
| 116               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AB2               |
| 117               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AB3               |
| 118               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AM1               |
| 119               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AM2               |
| 120               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 19,0mm           | AM3               |

Tabela 4.6: Misturas asfálticas de granulometria EGL 9,5mm e GAP, com agregados graníticos do basálticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Agregados | Local de coleta dos Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico |
|-------------------|-----------|-------------------------------|----------------------|-------------------|
| 121               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 9,5mm            | CAP 30/45         |
| 122               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 9,5mm            | CAP 50/70         |
| 123               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 9,5mm            | AMP1              |
| 124               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 9,5mm            | AMP2              |
| 125               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 9,5mm            | AMP3              |
| 126               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 9,5mm            | AMP4              |
| 127               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 9,5mm            | AB1               |
| 128               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 9,5mm            | AB2               |
| 129               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 9,5mm            | AB3               |
| 130               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 9,5mm            | AM1               |
| 131               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 9,5mm            | AM2               |
| 132               | Basalto   | E. de São Paulo               | EGL 9,5mm            | AM3               |
| 133               | Basalto   | E. de São Paulo               | GAP                  | CAP 30/45         |
| 134               | Basalto   | E. de São Paulo               | GAP                  | CAP 50/70         |
| 135               | Basalto   | E. de São Paulo               | GAP                  | AMP1              |
| 136               | Basalto   | E. de São Paulo               | GAP                  | AMP2              |
| 137               | Basalto   | E. de São Paulo               | GAP                  | AMP3              |
| 138               | Basalto   | E. de São Paulo               | GAP                  | AMP4              |
| 139               | Basalto   | E. de São Paulo               | GAP                  | AB1               |
| 140               | Basalto   | E. de São Paulo               | GAP                  | AB2               |
| 141               | Basalto   | E. de São Paulo               | GAP                  | AB3               |
| 142               | Basalto   | E. de São Paulo               | GAP                  | AM1               |
| 143               | Basalto   | E. de São Paulo               | GAP                  | AM2               |
| 144               | Basalto   | E. de São Paulo               | GAP                  | AM3               |

A composição granulométrica das misturas asfálticas com as granulometrias EGL 9,5mm, Faixa III-DERSA, EGL 19mm e *Gap Graded*, são apresentadas a seguir nas Tabelas 4.7 a 4.10. e nas Figuras 4.1 a 4.4.

Tabela 4.7: Composição granulométrica das misturasna Faixa EGL 9,5mm

| Peneiras |       | Granito /<br>SP | Basalto /<br>SP | Granito /<br>RJ | FAIXA EGL 9,5mm |        |
|----------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|
| #        | mm    |                 |                 |                 | Mínimo          | Máximo |
| 1"       | 25,0  | 100,0           | 100,0           | 100,0           | 100             | 100    |
| 3/4"     | 19,0  | 100,0           | 100,0           | 100,0           | 100             | 100    |
| 1/2"     | 12,5  | 100,0           | 100,0           | 100,0           | 100             | 100    |
| 3/8"     | 9,5   | 99,3            | 98,5            | 86,3            | 90              | 100    |
| Nº 4     | 4,75  | 52,0            | 66,6            | 53,7            | 40              | 65     |
| Nº 10    | 2,00  | 33,8            | 36,6            | 40,5            | 25              | 45     |
| Nº 40    | 0,42  | 18,4            | 16,7            | 23,3            | 13              | 24     |
| Nº 80    | 0,18  | 12,1            | 10,9            | 13,2            | 8               | 17     |
| Nº 200   | 0,075 | 7,0             | 6,8             | 7,1             | 4               | 10     |

Tabela 4.8: Composição granulométrica das misturas na Faixa III-DERSA

| Peneiras |       | Granito /<br>SP | Basalto /<br>SP | Granito /<br>RJ | FAIXA III-DERSA |        |
|----------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|
| #        | mm    |                 |                 |                 | Mínimo          | Máximo |
| 1"       | 25,0  | 100,0           | 100,0           | 100,0           | 100             | 100    |
| 3/4"     | 19,0  | 100,0           | 100,0           | 100,0           | 100             | 100    |
| 1/2"     | 12,5  | 88,4            | 91,6            | 91,5            | 80              | 100    |
| 3/8"     | 9,5   | 80,8            | 83,3            | 78,0            | 70              | 90     |
| Nº 4     | 4,75  | 54,8            | 54,0            | 53,3            | 50              | 70     |
| Nº 10    | 2,00  | 37,6            | 37,1            | 39,8            | 33              | 48     |
| Nº 40    | 0,42  | 20,5            | 18,9            | 22,7            | 15              | 25     |
| Nº 80    | 0,18  | 13,3            | 12,4            | 12,8            | 8               | 17     |
| Nº 200   | 0,075 | 7,6             | 7,5             | 6,8             | 4               | 10     |

Tabela 4.9: Composição granulométrica das misturas na Faixa EGL 19mm

| Peneiras |       | Granito /<br>SP | Basalto /<br>SP | Granito /<br>RJ | FAIXA EGL 19mm |        |
|----------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|--------|
| #        | mm    |                 |                 |                 | Mínimo         | Máximo |
| 1"       | 25,0  | 100,0           | 100,0           | 100,0           | 100            | 100    |
| 3/4"     | 19,0  | 100,0           | 100,0           | 100,0           | 90             | 100    |
| 1/2"     | 12,5  | 82,3            | 90,5            | 87,6            | 70             | 90     |
| 3/8"     | 9,5   | 70,9            | 75,6            | 69,5            | 60             | 80     |
| Nº 4     | 4,75  | 37,5            | 48,9            | 37,2            | 30             | 50     |
| Nº 10    | 2,00  | 24,9            | 30,1            | 27,1            | 20             | 35     |
| Nº 40    | 0,42  | 14,0            | 14,2            | 16,1            | 10             | 20     |
| Nº 80    | 0,18  | 9,4             | 9,4             | 9,6             | 5              | 15     |
| Nº 200   | 0,075 | 5,6             | 6,2             | 5,3             | 2              | 10     |

Tabela 4.10: Composição granulométrica das misturas na Faixa Gap Graded

| Peneiras |       | Granito /<br>SP | Basalto /<br>SP | Granito /<br>RJ | FAIXA Gap Graded |        |
|----------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|--------|
| #        | mm    |                 |                 |                 | Mínimo           | Máximo |
| 1/2"     | 12.7  | 100.0           | 100.0           | 100.0           | 100              | 100    |
| 3/8"     | 9.5   | 100.0           | 98.7            | 80.4            | 80               | 100    |
| Nº 4     | 4.76  | 34.0            | 40.9            | 37.5            | 25               | 40     |
| Nº 8     | 2.60  | 24.5            | 29.3            | 26.8            | 19               | 32     |
| Nº 16    | 1.18  | 19.8            | 19.2            | 21.7            | 16               | 22     |
| Nº 30    | 0.60  | 16.6            | 14.4            | 17.5            | 10               | 18     |
| Nº 50    | 0.30  | 12.5            | 10.3            | 12.7            | 8                | 13     |
| Nº 100   | 0.15  | 9.1             | 7.4             | 8.4             | 6                | 10     |
| Nº 200   | 0.074 | 6.2             | 5.3             | 5.3             | 4                | 7      |

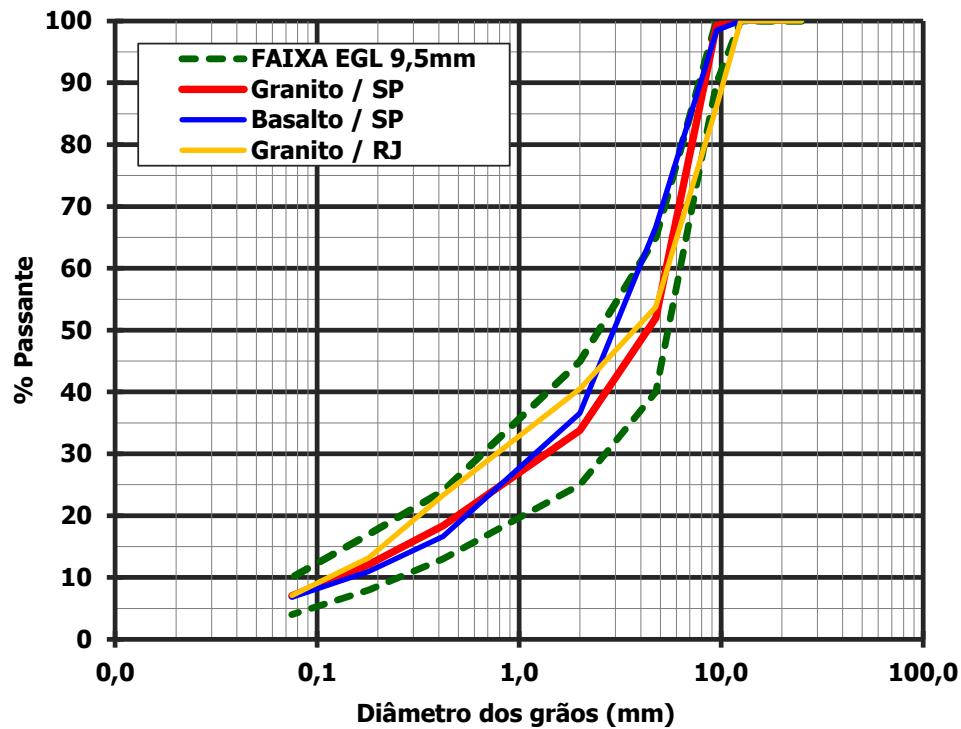


Figura 4.1: Faixa Granulométrica da mistura asfáltica EGL 9,5mm e misturas obtidas

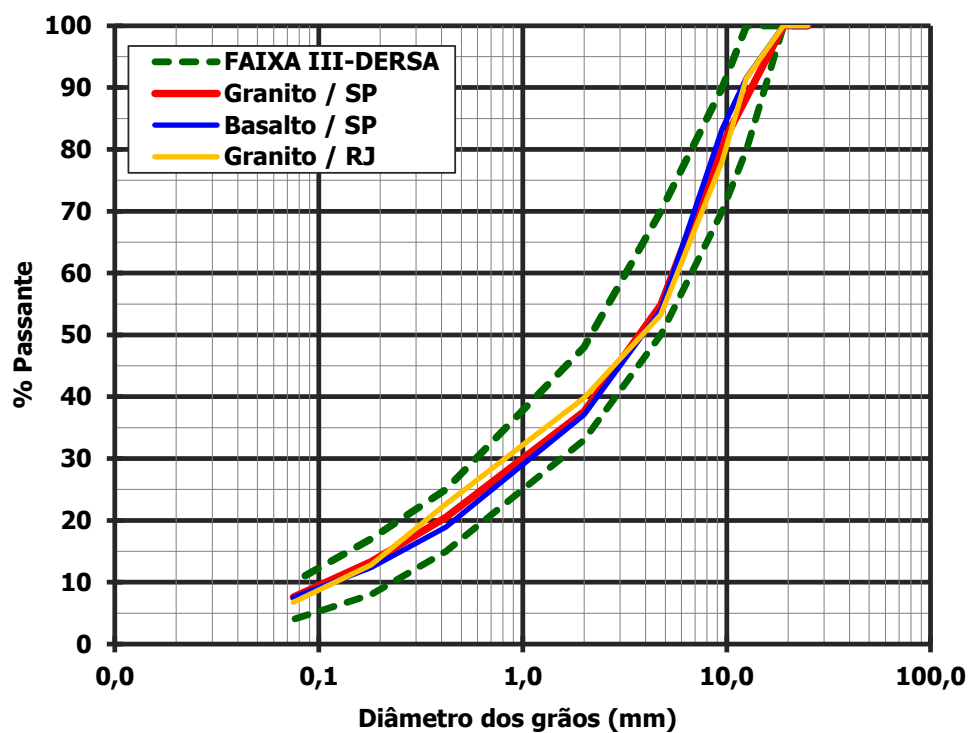


Figura 4.2: Faixa Granulométrica da mistura asfáltica Faixa III-DERSA e misturas obtidas



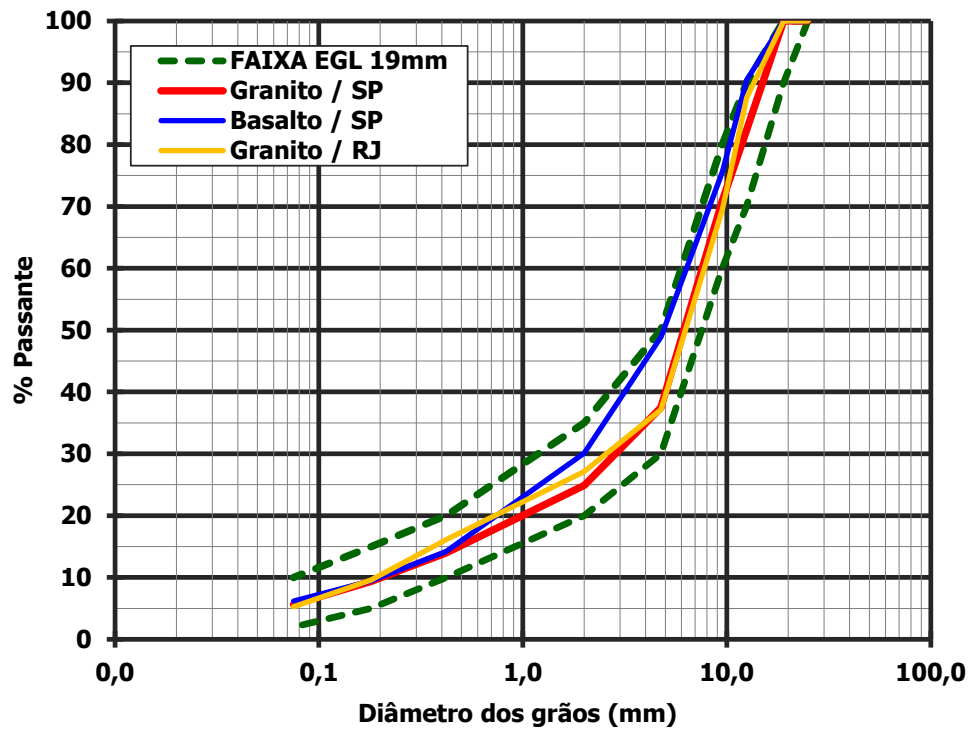


Figura 4.3: Faixa Granulométrica da mistura asfáltica EGL 19mm e misturas obtidas

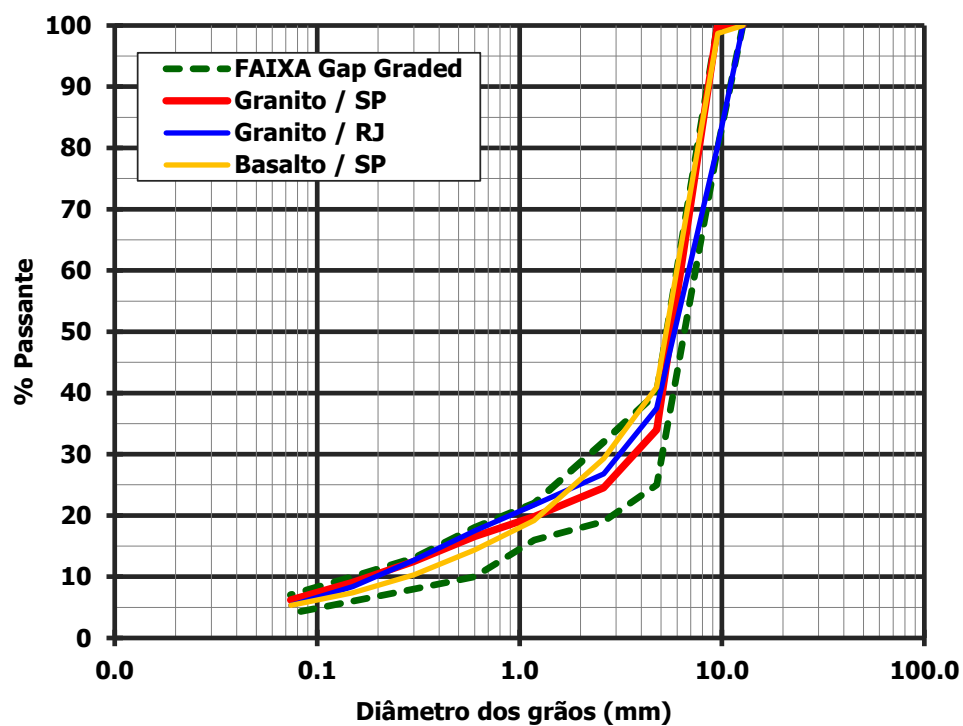


Figura 4.4: Faixa Granulométrica da mistura asfáltica Gap Graded e misturas obtidas

Na Figura 4.5 é apresentado um comparativo das curvas granulométricas das misturas asfálticas compostas para este estudo com agregados graníticos do Estado de São Paulo, na Figura 4.6 com agregados basálticos e na Figura 4.7 com agregados graníticos do Estado de Rio de Janeiro.

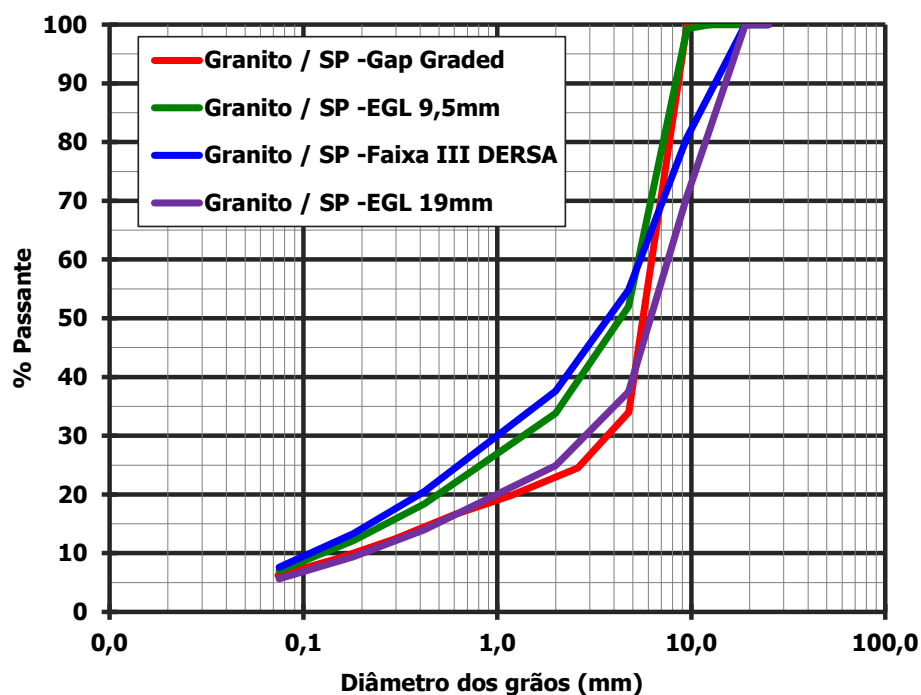


Figura 4.5: Curvas granulométricas das misturas asfálticas estudadas com agregados graníticos do Estado de São Paulo

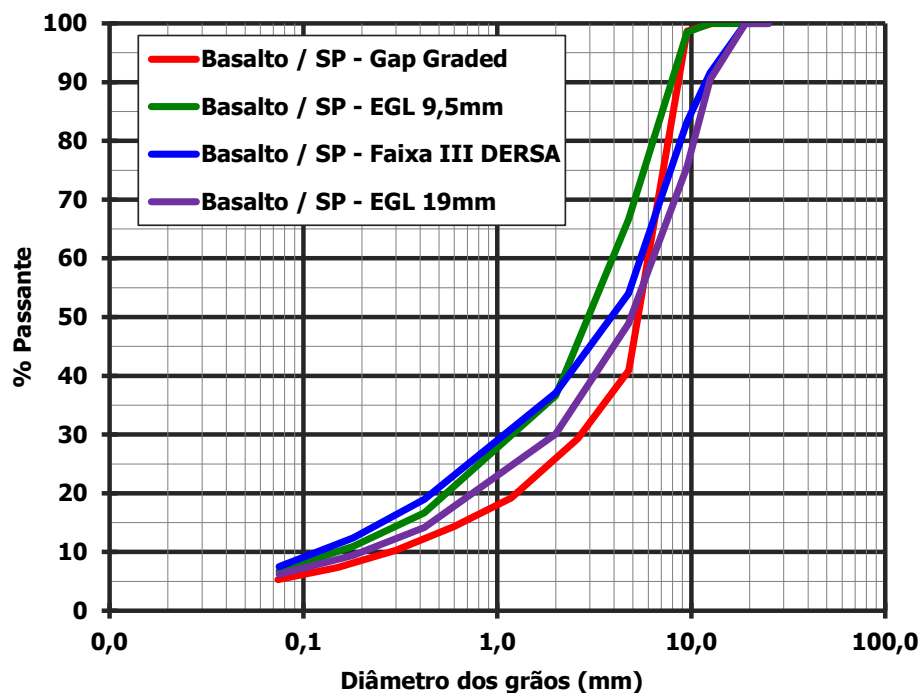


Figura 4.6: Curvas granulométricas das misturas asfálticas estudadas com agregados basálticos do Estado de São Paulo

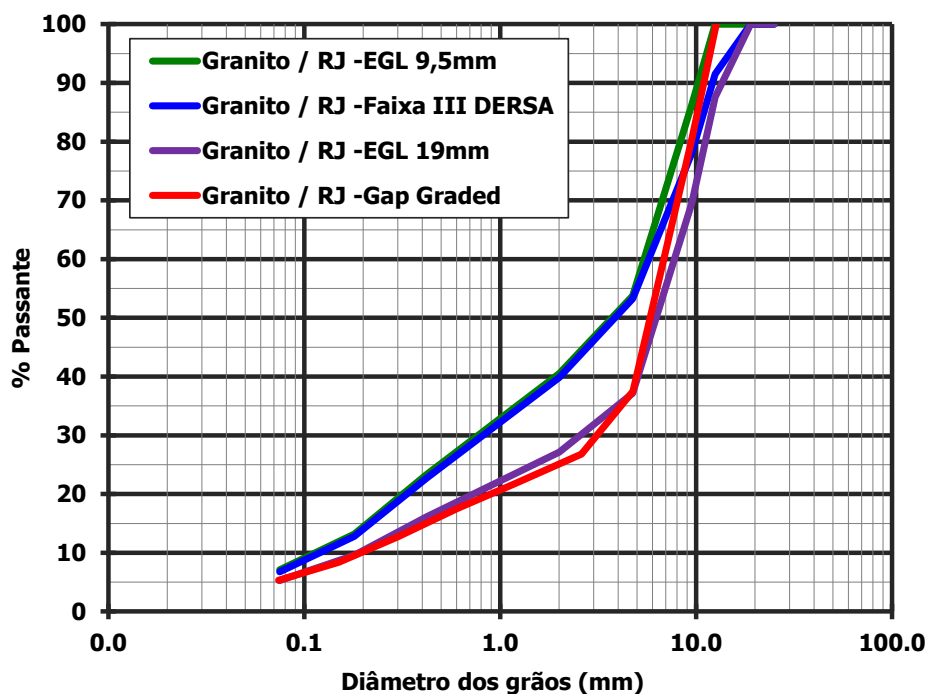


Figura 4.7: Curvas granulométricas das misturas asfálticas estudadas com agregados graníticos do Estado de Rio de Janeiro

Nas Tabelas 4.11 a 4.22 são apresentadas as principais propriedades volumétricas e características de dosagem das 144 misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa.

Tabela 4.11. Resultados da dosagem das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| ID MISTURA  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ligante Asfáltico   | 30/45 | 50/70 | AMP1  | AMP2  | AMP3  | AMP4  | AB1   | AB2   | AB3   | AM1   | AM2   | AM3   |
| Teor de Ligante Asfáltico em peso (%)                                   | 4.6   | 4.6   | 4.6   | 4.7   | 4.8   | 4.7   | 5.5   | 5.3   | 5.1   | 4.7   | 4.7   | 4.5   |
| Absorção de asfalto pelo agregado (%)                                   | 0.4   | 0.4   | 0.4   | 0.3   | 0.3   | 0.3   | 0.4   | 0.3   | 0.4   | 0.4   | 0.2   | 0.4   |
| Massa específica aparente dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.613 | 2.620 | 2.620 | 2.620 | 2.619 | 2.620 | 2.620 | 2.619 | 2.620 | 2.620 | 2.620 | 2.620 |
| Massa específica efetiva dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> )  | 2.643 | 2.644 | 2.644 | 2.643 | 2.639 | 2.642 | 2.647 | 2.640 | 2.643 | 2.646 | 2.635 | 2.644 |
| Massa específica aparente da mistura compactada (g/cm <sup>3</sup> )    | 2.371 | 2.366 | 2.365 | 2.360 | 2.352 | 2.362 | 2.340 | 2.339 | 2.352 | 2.363 | 2.358 | 2.375 |
| Massa específica máxima da mistura (g/cm <sup>3</sup> )                 | 2.460 | 2.462 | 2.461 | 2.455 | 2.450 | 2.457 | 2.436 | 2.437 | 2.446 | 2.459 | 2.452 | 2.466 |
| Volume de vazios de projeto (%)   | 3.6   | 3.9   | 3.9   | 3.9   | 4.0   | 3.9   | 3.9   | 4.0   | 3.9   | 3.9   | 3.9   | 3.7   |
| Vazios de agregado mineral (%)  | 13.4  | 13.8  | 13.9  | 14.1  | 14.5  | 14.1  | 15.6  | 15.4  | 14.8  | 14.0  | 14.2  | 13.4  |
| Vazios cheios de asfalto (%)  | 72.9  | 71.9  | 71.7  | 72.7  | 72.5  | 72.3  | 74.8  | 74.0  | 73.8  | 72.2  | 72.9  | 72.4  |
| Resistência à tração (MPa)  | 2.5   | 2.0   | 2.4   | 2.6   | 1.9   | 2.5   | 1.6   | 1.8   | 1.8   | 2.9   | 2.8   | 3.0   |
| Relação Fíler/Asfalto   | 1.8   | 1.8   | 1.8   | 1.7   | 1.7   | 1.7   | 1.5   | 1.5   | 1.6   | 1.8   | 1.7   | 1.8   |
| Teor de Ligante Asfáltico em volume (%)                                 | 11.2  | 11.2  | 11.2  | 11.5  | 11.6  | 11.4  | 13.1  | 12.6  | 12.1  | 11.5  | 11.3  | 10.9  |

Tabela 4.12. Resultados da dosagem das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| ID MISTURA  | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ligante Asfáltico   | 30/45 | 50/70 | AMP1  | AMP2  | AMP3  | AMP4  | AB1   | AB2   | AB3   | AM1   | AM2   | AM3   |
| Teor de Ligante Asfáltico em peso (%)                                   | 4.4   | 4.5   | 4.3   | 4.5   | 4.6   | 4.5   | 5.0   | 5.4   | 5.2   | 4.4   | 4.5   | 4.8   |
| Absorção de asfalto pelo agregado (%)                                   | 0.3   | 0.3   | 0.3   | 0.3   | 0.3   | 0.4   | 0.3   | 0.3   | 0.4   | 0.3   | 0.3   | 0.3   |
| Massa específica aparente dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.619 | 2.619 | 2.619 | 2.619 | 2.619 | 2.619 | 2.619 | 2.619 | 2.619 | 2.619 | 2.619 | 2.619 |
| Massa específica efetiva dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> )  | 2.642 | 2.641 | 2.641 | 2.637 | 2.641 | 2.643 | 2.636 | 2.640 | 2.644 | 2.641 | 2.642 | 2.639 |
| Massa específica aparente da mistura compactada (g/cm <sup>3</sup> )    | 2.370 | 2.370 | 2.382 | 2.363 | 2.353 | 2.370 | 2.347 | 2.332 | 2.343 | 2.370 | 2.371 | 2.373 |
| Massa específica máxima da mistura (g/cm <sup>3</sup> )                 | 2.467 | 2.463 | 2.470 | 2.458 | 2.458 | 2.466 | 2.444 | 2.434 | 2.444 | 2.466 | 2.465 | 2.470 |
| Volume de vazios de projeto (%)   | 3.9   | 3.7   | 3.6   | 3.9   | 4.3   | 3.9   | 4.0   | 4.2   | 4.1   | 3.9   | 3.8   | 3.9   |
| Vazios de agregado mineral (%)  | 13.5  | 13.6  | 13.0  | 13.8  | 14.3  | 13.6  | 14.9  | 15.8  | 15.2  | 13.5  | 13.6  | 13.7  |
| Vazios cheios de asfalto (%)  | 70.9  | 72.4  | 72.4  | 72.0  | 70.0  | 71.4  | 73.3  | 73.6  | 72.8  | 71.2  | 71.7  | 71.5  |
| Resistência à tração (MPa)  | 2.0   | 1.7   | 1.9   | 2.1   | 1.7   | 2.1   | 1.5   | 1.5   | 1.7   | 2.3   | 2.0   | 2.5   |
| Relação Fíler/Asfalto   | 1.4   | 1.3   | 1.4   | 1.3   | 1.3   | 1.4   | 1.2   | 1.1   | 1.2   | 1.4   | 1.3   | 1.2   |
| Teor de Ligante Asfáltico em volume (%)                                 | 10.7  | 10.9  | 10.5  | 11.0  | 11.2  | 10.9  | 11.9  | 12.8  | 12.4  | 10.8  | 10.9  | 10.9  |

Tabela 4.13. Resultados da dosagem das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| ID MISTURA  | 25    | 26    | 27    | 28    | 29    | 30    | 31    | 32    | 33    | 34    | 35    | 36    |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ligante Asfáltico   | 30/45 | 50/70 | AMP1  | AMP2  | AMP3  | AMP4  | AB1   | AB2   | AB3   | AM1   | AM2   | AM3   |
| Teor de Ligante Asfáltico em peso (%)                                   | 4.6   | 4.6   | 4.8   | 4.9   | 4.9   | 5.0   | 5.3   | 5.5   | 5.6   | 5.0   | 4.7   | 5.2   |
| Absorção de asfalto pelo agregado (%)                                   | 0.4   | 0.4   | 0.6   | 0.5   | 0.4   | 0.3   | 0.5   | 0.3   | 0.4   | 0.3   | 0.5   | 0.4   |
| Massa específica aparente dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.611 | 2.611 | 2.611 | 2.611 | 2.618 | 2.611 | 2.611 | 2.618 | 2.611 | 2.611 | 2.611 | 2.611 |
| Massa específica efetiva dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> )  | 2.639 | 2.639 | 2.639 | 2.643 | 2.642 | 2.641 | 2.639 | 2.641 | 2.647 | 2.639 | 2.642 | 2.637 |
| Massa específica aparente da mistura compactada (g/cm <sup>3</sup> )    | 2.361 | 2.361 | 2.366 | 2.348 | 2.350 | 2.348 | 2.344 | 2.335 | 2.332 | 2.345 | 2.356 | 2.360 |
| Massa específica máxima da mistura (g/cm <sup>3</sup> )                 | 2.457 | 2.457 | 2.458 | 2.448 | 2.449 | 2.445 | 2.440 | 2.431 | 2.432 | 2.442 | 2.458 | 2.455 |
| Volume de vazios de projeto (%)   | 3.9   | 3.9   | 3.7   | 4.1   | 4.0   | 4.0   | 4.0   | 4.0   | 4.1   | 4.0   | 4.1   | 3.9   |
| Vazios de agregado mineral (%)  | 13.7  | 13.7  | 13.7  | 14.5  | 14.7  | 14.8  | 15.0  | 15.7  | 15.9  | 14.9  | 14.0  | 14.3  |
| Vazios cheios de asfalto (%)  | 71.6  | 71.7  | 72.8  | 71.6  | 72.5  | 73.1  | 73.6  | 74.8  | 74.1  | 73.5  | 70.5  | 72.9  |
| Resistência à tração (MPa)  | 2.3   | 1.7   | 2.2   | 2.1   | 1.8   | 2.4   | 1.8   | 1.8   | 1.5   | 2.4   | 2.6   | 2.8   |
| Relação Fíler/Asfalto   | 1.7   | 1.7   | 1.6   | 1.6   | 1.5   | 1.5   | 1.5   | 1.4   | 1.4   | 1.5   | 1.6   | 1.5   |
| Teor de Ligante Asfáltico em volume (%)                                 | 11.2  | 11.2  | 11.7  | 11.9  | 11.9  | 12.0  | 12.6  | 13.0  | 13.3  | 12.1  | 11.4  | 11.7  |

Tabela 4.14. Resultados da dosagem das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| ID MISTURA  | 37    | 38    | 39    | 40    | 41    | 42    | 43    | 44    | 45    | 46    | 47    | 48    |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ligante Asfáltico   | 30/45 | 50/70 | AMP1  | AMP2  | AMP3  | AMP4  | AB1   | AB2   | AB3   | AM1   | AM2   | AM3   |
| Teor de Ligante Asfáltico em peso (%)                                   | 4.9   | 5.1   | 5.2   | 5.2   | 5.4   | 5.4   | 5.9   | 5.9   | 5.5   | 5.1   | 5.1   | 5.3   |
| Absorção de asfalto pelo agregado (%)                                   | 0.4   | 0.4   | 0.6   | 0.4   | 0.4   | 0.5   | 0.5   | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.7   | 0.5   |
| Massa específica aparente dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.608 | 2.608 | 2.608 | 2.608 | 2.619 | 2.608 | 2.608 | 2.619 | 2.608 | 2.080 | 2.608 | 2.608 |
| Massa específica efetiva dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> )  | 2.634 | 2.635 | 2.647 | 2.637 | 2.643 | 2.651 | 2.641 | 2.642 | 2.648 | 2.650 | 2.653 | 2.642 |
| Massa específica aparente da mistura compactada (g/cm <sup>3</sup> )    | 2.321 | 2.317 | 2.316 | 2.312 | 2.312 | 2.315 | 2.300 | 2.300 | 2.313 | 2.324 | 2.330 | 2.332 |
| Massa específica máxima da mistura (g/cm <sup>3</sup> )                 | 2.442 | 2.436 | 2.442 | 2.432 | 2.431 | 2.439 | 2.416 | 2.417 | 2.437 | 2.447 | 2.453 | 2.456 |
| Volume de vazios de projeto (%)   | 5.0   | 4.9   | 5.1   | 4.9   | 4.9   | 5.1   | 4.8   | 4.9   | 5.1   | 5.0   | 5.0   | 5.0   |
| Vazios de agregado mineral (%)  | 15.3  | 15.7  | 15.8  | 16.0  | 16.5  | 16.4  | 17.0  | 17.4  | 16.5  | 15.8  | 15.2  | 15.3  |
| Vazios cheios de asfalto (%)  | 67.7  | 68.8  | 67.4  | 69.1  | 70.4  | 68.8  | 71.7  | 71.9  | 69.3  | 68.3  | 67.1  | 67.0  |
| Resistência à tração (MPa)  | 2.0   | 1.8   | 2.0   | 1.3   | 1.3   | 1.8   | 1.2   | 1.4   | 1.5   | 2.2   | 2.1   | 2.3   |
| Relação Fíler/Asfalto   | 1.4   | 1.3   | 1.3   | 1.3   | 1.2   | 1.3   | 1.1   | 1.1   | 1.2   | 1.3   | 1.4   | 1.3   |
| Teor de Ligante Asfáltico em volume (%)                                 | 11.8  | 12.3  | 12.5  | 12.6  | 13.0  | 13.0  | 13.9  | 13.9  | 13.1  | 12.4  | 12.3  | 12.0  |

Tabela 4.15. Resultados da dosagem das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| ID MISTURA  | 49    | 50    | 51    | 52    | 53    | 54    | 55    | 56    | 57    | 58    | 59    | 60    |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ligante Asfáltico   | 30/45 | 50/70 | AMP1  | AMP2  | AMP3  | AMP4  | AB1   | AB2   | AB3   | AM1   | AM2   | AM3   |
| Teor de Ligante Asfáltico em peso (%)                                   | 4.9   | 4.7   | 4.7   | 4.7   | 4.7   | 4.6   | 5.0   | 5.2   | 5.2   | 4.8   | 4.7   | 5.3   |
| Absorção de asfalto pelo agregado (%)                                   | 0.5   | 0.4   | 0.3   | 0.2   | 0.3   | 0.3   | 0.3   | 0.2   | 0.3   | 0.2   | 0.2   | 0.3   |
| Massa específica aparente dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.747 | 2.747 | 2.747 | 2.747 | 2.747 | 2.747 | 2.747 | 2.747 | 2.747 | 2.747 | 2.747 | 2.747 |
| Massa específica efetiva dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> )  | 2.783 | 2.780 | 2.767 | 2.765 | 2.766 | 2.767 | 2.766 | 2.765 | 2.766 | 2.765 | 2.765 | 2.766 |
| Massa específica aparente da mistura compactada (g/cm <sup>3</sup> )    | 2.450 | 2.465 | 2.453 | 2.453 | 2.449 | 2.453 | 2.439 | 2.437 | 2.434 | 2.451 | 2.457 | 2.451 |
| Massa específica máxima da mistura (g/cm <sup>3</sup> )                 | 2.563 | 2.569 | 2.558 | 2.555 | 2.557 | 2.564 | 2.549 | 2.541 | 2.542 | 2.553 | 2.559 | 2.557 |
| Volume de vazios de projeto (%)   | 4.4   | 4.1   | 4.1   | 4.0   | 4.2   | 4.3   | 4.3   | 4.1   | 4.3   | 4.0   | 4.0   | 4.1   |
| Vazios de agregado mineral (%)  | 15.2  | 14.5  | 14.9  | 14.9  | 15.0  | 14.8  | 15.7  | 15.9  | 16.0  | 15.0  | 14.8  | 15.5  |
| Vazios cheios de asfalto (%)  | 70.9  | 71.9  | 72.3  | 73.2  | 72.1  | 70.8  | 72.3  | 74.4  | 73.4  | 73.5  | 73.0  | 73.3  |
| Resistência à tração (MPa)  | 2.3   | 1.8   | 1.8   | 1.8   | 1.8   | 2.3   | 1.4   | 1.9   | 1.7   | 2.3   | 2.6   | 2.7   |
| Relação Filer/Asfalto   | 1.5   | 1.6   | 1.5   | 1.5   | 1.5   | 1.6   | 1.4   | 1.4   | 1.4   | 1.5   | 1.5   | 1.4   |
| Teor de Ligante Asfáltico em volume (%)                                 | 12.4  | 11.9  | 11.9  | 11.9  | 11.9  | 11.6  | 12.4  | 12.9  | 12.9  | 12.1  | 11.8  | 12.5  |



Tabela 4.16. Resultados da dosagem das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| ID MISTURA  | 61    | 62    | 63    | 64    | 65    | 66    | 67    | 68    | 69    | 70    | 71    | 72    |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ligante Asfáltico   | 30/45 | 50/70 | AMP1  | AMP2  | AMP3  | AMP4  | AB1   | AB2   | AB3   | AM1   | AM2   | AM3   |
| Teor de Ligante Asfáltico em peso (%)                                   | 4.4   | 4.4   | 4.3   | 4.2   | 4.3   | 4.3   | 4.9   | 4.9   | 4.8   | 4.3   | 4.3   | 4.7   |
| Absorção de asfalto pelo agregado (%)                                   | 0.3   | 0.4   | 0.3   | 0.3   | 0.3   | 0.3   | 0.3   | 0.3   | 0.3   | 0.3   | 0.4   | 2.8   |
| Massa específica aparente dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.754 | 2.754 | 2.754 | 2.754 | 2.754 | 2.754 | 2.754 | 2.754 | 2.754 | 2.754 | 2.754 | 2.773 |
| Massa específica efetiva dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> )  | 2.776 | 2.786 | 2.774 | 2.775 | 2.776 | 2.775 | 2.779 | 2.778 | 2.776 | 2.774 | 2.781 | 2.477 |
| Massa específica aparente da mistura compactada (g/cm <sup>3</sup> )    | 2.470 | 2.476 | 2.479 | 2.481 | 2.476 | 2.477 | 2.458 | 2.456 | 2.462 | 2.475 | 2.485 | 2.585 |
| Massa específica máxima da mistura (g/cm <sup>3</sup> )                 | 2.578 | 2.586 | 2.581 | 2.584 | 2.581 | 2.582 | 2.564 | 2.563 | 2.566 | 2.581 | 2.588 | 4.200 |
| Volume de vazios de projeto (%)   | 4.2   | 4.3   | 4.0   | 4.0   | 4.1   | 4.1   | 4.2   | 4.2   | 4.0   | 4.1   | 4.0   | 4.2   |
| Vazios de agregado mineral (%)  | 14.3  | 14.1  | 13.9  | 13.7  | 14.0  | 13.9  | 15.1  | 15.2  | 14.9  | 14.0  | 13.7  | 14.3  |
| Vazios cheios de asfalto (%)  | 70.7  | 69.8  | 71.5  | 70.9  | 70.8  | 70.8  | 72.6  | 72.5  | 72.9  | 70.6  | 70.8  | 70.8  |
| Resistência à tração (MPa)  | 2.2   | 1.9   | 2.0   | 2.1   | 1.8   | 2.0   | 1.6   | 1.8   | 1.7   | 2.3   | 2.4   | 2.4   |
| Relação Filer/Asfalto   | 1.3   | 1.3   | 1.3   | 1.3   | 1.3   | 1.3   | 1.2   | 1.2   | 1.2   | 1.3   | 1.3   | 1.2   |
| Teor de Ligante Asfáltico em volume (%)                                 | 11.2  | 11.3  | 11.0  | 10.8  | 11.0  | 10.9  | 12.2  | 12.2  | 12.0  | 11.0  | 10.9  | 11.2  |

Tabela 4.17. Resultados da dosagem das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| ID MISTURA  | 73    | 74    | 75    | 76    | 77    | 78    | 79    | 80    | 81    | 82    | 83    | 84    |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ligante Asfáltico   | 30/45 | 50/70 | AMP1  | AMP2  | AMP3  | AMP4  | AB1   | AB2   | AB3   | AM1   | AM2   | AM3   |
| Teor de Ligante Asfáltico em peso (%)                                   | 4.9   | 5.0   | 5.0   | 5.0   | 5.0   | 5.0   | 5.4   | 5.7   | 5.5   | 5.0   | 4.9   | 5.3   |
| Absorção de asfalto pelo agregado (%)                                   | 0.3   | 0.6   | 0.5   | 0.5   | 0.5   | 0.6   | 0.3   | 0.6   | 0.5   | 0.4   | 0.3   | 0.2   |
| Massa específica aparente dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.745 | 2.745 | 2.745 | 2.745 | 2.745 | 2.745 | 2.745 | 2.745 | 2.745 | 2.745 | 2.745 | 2.745 |
| Massa específica efetiva dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> )  | 2.768 | 2.790 | 2.785 | 2.785 | 2.783 | 2.790 | 2.768 | 2.793 | 2.780 | 2.777 | 2.769 | 2.758 |
| Massa específica aparente da mistura compactada (g/cm <sup>3</sup> )    | 2.454 | 2.456 | 2.455 | 2.456 | 2.456 | 2.461 | 2.430 | 2.434 | 2.432 | 2.452 | 2.447 | 2.445 |
| Massa específica máxima da mistura (g/cm <sup>3</sup> )                 | 2.551 | 2.562 | 2.561 | 2.559 | 2.558 | 2.566 | 2.536 | 2.543 | 2.542 | 2.554 | 2.554 | 2.550 |
| Volume de vazios de projeto (%)   | 3.8   | 4.0   | 4.1   | 4.0   | 4.0   | 4.1   | 4.2   | 4.3   | 4.3   | 4.0   | 4.2   | 4.1   |
| Vazios de agregado mineral (%)  | 15.0  | 15.0  | 15.0  | 15.0  | 15.0  | 14.8  | 16.3  | 16.4  | 16.3  | 15.1  | 15.2  | 15.6  |
| Vazios cheios de asfalto (%)  | 74.6  | 72.4  | 72.5  | 73.2  | 73.5  | 72.4  | 74.3  | 73.8  | 73.5  | 73.6  | 72.6  | 73.7  |
| Resistência à tração (MPa)  | 3.0   | 2.0   | 2.1   | 2.3   | 2.4   | 2.3   | 1.6   | 1.9   | 1.7   | 2.5   | 2.8   | 2.9   |
| Relação Filer/Asfalto   | 1.5   | 1.6   | 1.6   | 1.6   | 1.6   | 1.6   | 1.4   | 1.4   | 1.4   | 1.6   | 1.6   | 1.4   |
| Teor de Ligante Asfáltico em volume (%)                                 | 12.4  | 12.7  | 12.6  | 12.7  | 12.7  | 12.6  | 13.3  | 14.1  | 13.6  | 12.6  | 12.3  | 12.4  |

Tabela 4.18. Resultados da dosagem das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| ID MISTURA  | 85    | 86    | 87    | 88    | 89    | 90    | 91    | 92    | 93    | 94    | 95    | 96    |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ligante Asfáltico   | 30/45 | 50/70 | AMP1  | AMP2  | AMP3  | AMP4  | AB1   | AB2   | AB3   | AM1   | AM2   | AM3   |
| Teor de Ligante Asfáltico em peso (%)                                   | 4.0   | 4.0   | 4.0   | 4.0   | 4.0   | 4.0   | 4.7   | 4.6   | 4.7   | 4.1   | 4.0   | 4.0   |
| Absorção de asfalto pelo agregado (%)                                   | 0.3   | 0.4   | 0.6   | 0.4   | 0.4   | 0.4   | 0.4   | 0.4   | 0.5   | 0.3   | 0.3   | 0.4   |
| Massa específica aparente dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.747 | 2.747 | 2.747 | 2.747 | 2.747 | 2.747 | 2.747 | 2.747 | 2.747 | 2.747 | 2.747 | 2.747 |
| Massa específica efetiva dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> )  | 2.771 | 2.777 | 2.790 | 2.776 | 2.781 | 2.777 | 2.775 | 2.775 | 2.782 | 2.768 | 2.771 | 2.778 |
| Massa específica aparente da mistura compactada (g/cm <sup>3</sup> )    | 2.471 | 2.481 | 2.498 | 2.476 | 2.481 | 2.482 | 2.451 | 2.454 | 2.453 | 2.470 | 2.472 | 2.475 |
| Massa específica máxima da mistura (g/cm <sup>3</sup> )                 | 2.591 | 2.596 | 2.607 | 2.594 | 2.598 | 2.597 | 2.569 | 2.573 | 2.575 | 2.585 | 2.592 | 2.593 |
| Volume de vazios de projeto (%)   | 4.6   | 4.4   | 4.2   | 4.6   | 4.5   | 4.4   | 4.6   | 4.6   | 4.7   | 4.4   | 4.6   | 4.5   |
| Vazios de agregado mineral (%)  | 13.7  | 13.3  | 12.7  | 13.5  | 13.3  | 13.2  | 15.0  | 14.8  | 14.9  | 13.8  | 13.6  | 14.0  |
| Vazios cheios de asfalto (%)  | 66.0  | 66.7  | 66.9  | 66.1  | 66.3  | 66.6  | 69.2  | 68.6  | 68.1  | 67.8  | 66.0  | 67.7  |
| Resistência à tração (MPa)  | 2.0   | 1.8   | 1.6   | 1.7   | 1.9   | 1.9   | 1.4   | 1.6   | 1.3   | 2.0   | 2.2   | 2.5   |
| Relação Filer/Asfalto   | 1.4   | 1.5   | 1.5   | 1.5   | 1.5   | 1.5   | 1.2   | 1.3   | 1.3   | 1.4   | 1.4   | 1.3   |
| Teor de Ligante Asfáltico em volume (%)                                 | 10.3  | 10.3  | 10.3  | 10.3  | 10.3  | 10.2  | 11.8  | 11.5  | 11.8  | 10.5  | 10.2  | 11.0  |

Tabela 4.19. Resultados da dosagem das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| ID MISTURA  | 97    | 98    | 99    | 100   | 101   | 102   | 103   | 104   | 105   | 106   | 107   | 108   |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ligante Asfáltico   | 30/45 | 50/70 | AMP1  | AMP2  | AMP3  | AMP4  | AB1   | AB2   | AB3   | AM1   | AM2   | AM3   |
| Teor de Ligante Asfáltico em peso (%)                                   | 4.8   | 5.0   | 5.0   | 4.9   | 5.1   | 4.7   | 5.6   | 5.4   | 5.4   | 4.8   | 4.7   | 5.2   |
| Absorção de asfalto pelo agregado (%)                                   | 0.3   | 0.4   | 0.3   | 0.3   | 0.6   | 0.3   | 0.4   | 0.4   | 0.4   | 0.5   | 0.4   | 0.4   |
| Massa específica aparente dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.859 | 2.859 | 2.859 | 2.859 | 2.859 | 2.859 | 2.859 | 2.859 | 2.859 | 2.859 | 2.859 | 2.859 |
| Massa específica efetiva dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> )  | 2.886 | 2.894 | 2.885 | 2.882 | 2.908 | 2.884 | 2.894 | 2.894 | 2.932 | 2.898 | 2.893 | 2.890 |
| Massa específica aparente da mistura compactada (g/cm <sup>3</sup> )    | 2.569 | 2.566 | 2.550 | 2.559 | 2.551 | 2.578 | 2.533 | 2.527 | 2.552 | 2.558 | 2.578 | 2.575 |
| Massa específica máxima da mistura (g/cm <sup>3</sup> )                 | 2.681 | 2.676 | 2.669 | 2.675 | 2.654 | 2.684 | 2.637 | 2.635 | 2.657 | 2.661 | 2.680 | 2.686 |
| Volume de vazios de projeto (%)   | 4.2   | 4.1   | 4.5   | 4.3   | 3.9   | 3.9   | 3.9   | 4.1   | 4.0   | 3.9   | 3.8   | 4.1   |
| Vazios de agregado mineral (%)  | 16.4  | 16.5  | 17.1  | 16.7  | 15.3  | 16.2  | 18.1  | 16.4  | 17.7  | 14.8  | 15.9  | 16.4  |
| Vazios cheios de asfalto (%)  | 74.3  | 75.1  | 73.9  | 73.9  | 74.7  | 75.8  | 78.3  | 74.9  | 77.6  | 74.0  | 76.0  | 74.9  |
| Resistência à tração (MPa)  | 2.0   | 1.8   | 1.9   | 1.7   | 1.9   | 2.1   | 1.6   | 1.7   | 1.6   | 2.2   | 2.1   | 2.7   |
| Relação Filer/Asfalto   | 1.6   | 1.5   | 1.5   | 1.5   | 1.7   | 1.6   | 1.3   | 1.6   | 1.4   | 1.8   | 1.6   | 1.4   |
| Teor de Ligante Asfáltico em volume (%)                                 | 13.0  | 13.2  | 13.2  | 13.0  | 13.4  | 12.4  | 14.4  | 13.9  | 14.0  | 12.6  | 12.4  | 12.8  |

Tabela 4.20. Resultados da dosagem das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| ID MISTURA  | 109   | 110   | 111   | 112   | 113   | 114   | 115   | 116   | 117   | 118   | 119   | 120   |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ligante Asfáltico   | 30/45 | 50/70 | AMP1  | AMP2  | AMP3  | AMP4  | AB1   | AB2   | AB3   | AM1   | AM2   | AM3   |
| Teor de Ligante Asfáltico em peso (%)                                   | 5.1   | 5.2   | 5.3   | 5.4   | 5.1   | 4.8   | 6.3   | 5.6   | 5.8   | 4.9   | 5.8   | 6.0   |
| Absorção de asfalto pelo agregado (%)                                   | 0.4   | 0.3   | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.3   | 0.3   | 0.5   | 0.3   | 0.4   | 0.4   | 0.4   |
| Massa específica aparente dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.861 | 2.861 | 2.861 | 2.861 | 2.861 | 2.861 | 2.861 | 2.861 | 2.861 | 2.861 | 2.861 | 2.861 |
| Massa específica efetiva dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> )  | 2.898 | 2.891 | 2.891 | 2.898 | 2.899 | 2.891 | 2.891 | 2.900 | 2.890 | 2.894 | 2.898 | 2.894 |
| Massa específica aparente da mistura compactada (g/cm <sup>3</sup> )    | 2.557 | 2.537 | 2.542 | 2.535 | 2.544 | 2.572 | 2.518 | 2.517 | 2.541 | 2.544 | 2.533 | 2.545 |
| Massa específica máxima da mistura (g/cm <sup>3</sup> )                 | 2.661 | 2.656 | 2.656 | 2.642 | 2.647 | 2.675 | 2.627 | 2.631 | 2.640 | 2.653 | 2.640 | 2.657 |
| Volume de vazios de projeto (%)   | 3.9   | 4.5   | 4.3   | 4.1   | 3.9   | 3.9   | 4.2   | 4.3   | 3.7   | 4.1   | 4.1   | 4.2   |
| Vazios de agregado mineral (%)  | 16.8  | 17.5  | 17.5  | 17.8  | 15.6  | 16.5  | 19.1  | 17.0  | 18.3  | 15.5  | 18.2  | 18.0  |
| Vazios cheios de asfalto (%)  | 76.8  | 74.4  | 75.4  | 77.2  | 75.1  | 76.5  | 78.3  | 74.4  | 79.6  | 73.5  | 77.6  | 76.6  |
| Resistência à tração (MPa)  | 1.9   | 1.5   | 1.9   | 1.9   | 1.5   | 1.9   | 1.5   | 1.5   | 1.4   | 1.8   | 2.2   | 2.7   |
| Relação Filer/Asfalto   | 1.3   | 1.3   | 1.3   | 1.3   | 1.3   | 1.3   | 1.1   | 1.2   | 1.1   | 1.3   | 1.2   | 1.2   |
| Teor de Ligante Asfáltico em volume (%)                                 | 13.4  | 13.6  | 13.9  | 14.2  | 13.4  | 12.6  | 16.1  | 14.4  | 14.9  | 12.8  | 15.0  | 14.7  |

Tabela 4.21. Resultados da dosagem das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| ID MISTURA  | 121   | 122   | 123   | 124   | 125   | 126   | 127   | 128   | 129   | 130   | 131   | 132   |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ligante Asfáltico   | 30/45 | 50/70 | AMP1  | AMP2  | AMP3  | AMP4  | AB1   | AB2   | AB3   | AM1   | AM2   | AM3   |
| Teor de Ligante Asfáltico em peso (%)                                   | 5.1   | 5.2   | 5.3   | 5.4   | 5.9   | 5.8   | 6.3   | 6.3   | 6.2   | 6.1   | 5.8   | 6.0   |
| Absorção de asfalto pelo agregado (%)                                   | 0.4   | 0.3   | 0.4   | 0.3   | 0.4   | 0.4   | 0.4   | 0.7   | 0.4   | 0.6   | 0.3   | 0.4   |
| Massa específica aparente dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.854 | 2.854 | 2.854 | 2.854 | 2.854 | 2.854 | 2.854 | 2.854 | 2.854 | 2.854 | 2.854 | 2.854 |
| Massa específica efetiva dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> )  | 2.900 | 2.902 | 2.896 | 2.891 | 2.887 | 2.886 | 2.890 | 2.908 | 2.893 | 2.905 | 2.886 | 2.893 |
| Massa específica aparente da mistura compactada (g/cm <sup>3</sup> )    | 2.557 | 2.537 | 2.542 | 2.535 | 2.489 | 2.529 | 2.518 | 2.491 | 2.510 | 2.502 | 2.533 | 2.545 |
| Massa específica máxima da mistura (g/cm <sup>3</sup> )                 | 2.661 | 2.656 | 2.656 | 2.642 | 2.602 | 2.631 | 2.627 | 2.607 | 2.617 | 2.608 | 2.640 | 2.657 |
| Volume de vazios de projeto (%)   | 3.9   | 4.5   | 4.3   | 4.1   | 4.3   | 3.9   | 4.2   | 4.5   | 4.1   | 4.0   | 4.1   | 4.2   |
| Vazios de agregado mineral (%)  | 16.8  | 17.5  | 17.5  | 17.8  | 17.9  | 18.3  | 19.1  | 18.2  | 19.3  | 17.7  | 18.2  | 18.0  |
| Vazios cheios de asfalto (%)  | 76.8  | 74.4  | 75.4  | 77.2  | 75.8  | 78.7  | 78.3  | 75.5  | 78.8  | 77.1  | 77.6  | 76.6  |
| Resistência à tração (MPa)  | 1.9   | 1.5   | 1.9   | 1.9   | 1.4   | 1.9   | 1.5   | 1.5   | 1.5   | 1.8   | 2.2   | 2.7   |
| Relação Filer/Asfalto   | 1.3   | 1.3   | 1.3   | 1.3   | 1.2   | 1.2   | 1.1   | 1.1   | 1.1   | 1.2   | 1.2   | 1.2   |
| Teor de Ligante Asfáltico em volume (%)                                 | 13.4  | 13.6  | 13.9  | 14.2  | 15.2  | 15.0  | 16.1  | 16.0  | 15.8  | 15.7  | 15.0  | 14.7  |

Tabela 4.22. Resultados da dosagem das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| ID MISTURA  | 133   | 134   | 135   | 136   | 137   | 138   | 139   | 140   | 141   | 142   | 143   | 144   |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ligante Asfáltico   | 30/45 | 50/70 | AMP1  | AMP2  | AMP3  | AMP4  | AB1   | AB2   | AB3   | AM1   | AM2   | AM3   |
| Teor de Ligante Asfáltico em peso (%)                                   | 5.7   | 5.8   | 5.6   | 6.2   | 6.1   | 5.7   | 6.5   | 6.5   | 6.1   | 6.4   | 6.1   | 6.3   |
| Absorção de asfalto pelo agregado (%)                                   | 0.3   | 0.4   | 0.3   | 0.5   | 0.7   | 0.4   | 0.3   | 0.6   | 0.5   | 0.7   | 0.4   | 0.4   |
| Massa específica aparente dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.854 | 2.854 | 2.854 | 2.854 | 2.854 | 2.854 | 2.854 | 2.854 | 2.854 | 2.854 | 2.854 | 2.584 |
| Massa específica efetiva dos agregados combinados (g/cm <sup>3</sup> )  | 2.886 | 2.894 | 2.888 | 2.901 | 2.909 | 2.890 | 2.881 | 2.902 | 2.900 | 2.911 | 2.883 | 2.884 |
| Massa específica aparente da mistura compactada (g/cm <sup>3</sup> )    | 2.484 | 2.469 | 2.508 | 2.462 | 2.474 | 2.503 | 2.465 | 2.463 | 2.491 | 2.472 | 2.483 | 2.487 |
| Massa específica máxima da mistura (g/cm <sup>3</sup> )                 | 2.631 | 2.610 | 2.643 | 2.607 | 2.609 | 2.636 | 2.602 | 2.594 | 2.618 | 2.599 | 2.618 | 2.636 |
| Volume de vazios de projeto (%)   | 5.6   | 5.4   | 5.1   | 5.6   | 5.2   | 5.0   | 5.3   | 5.1   | 4.8   | 4.9   | 5.2   | 5.7   |
| Vazios de agregado mineral (%)  | 19.5  | 20.1  | 18.7  | 20.7  | 18.6  | 18.9  | 20.9  | 19.3  | 19.7  | 18.9  | 19.9  | 20.0  |
| Vazios cheios de asfalto (%)  | 71.5  | 73.1  | 72.7  | 73.1  | 72.2  | 73.5  | 74.7  | 73.8  | 75.4  | 74.0  | 74.0  | 71.6  |
| Resistência à tração (MPa)  | 1.4   | 1.4   | 1.6   | 1.2   | 1.3   | 1.8   | 1.1   | 1.3   | 1.3   | 1.5   | 1.8   | 2.3   |
| Relação Filer/Asfalto   | 0.9   | 0.9   | 1.0   | 0.9   | 0.9   | 0.9   | 0.8   | 0.9   | 0.9   | 0.9   | 0.9   | 0.8   |
| Teor de Ligante Asfáltico em volume (%)                                 | 14.9  | 15.0  | 14.6  | 16.0  | 15.8  | 14.8  | 16.5  | 16.4  | 15.5  | 16.4  | 15.7  | 15.3  |

Nas Figuras 4.8 a 4.11 são apresentados de forma resumida os valores de teor de ligante asfáltico de projeto, selecionados para a moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos de módulo de resiliência, módulo dinâmico e *flow number*. Salienta-se que para as misturas asfálticas com granulometria Faixa III-DERSA, EGL19mm e EGL 9,5mm foi utilizado o volume de vazios de 4,0% para selecionar o teor de ligante de projeto, enquanto que para a mistura asfáltica *Gap Graded* foi selecionado o volume de vazios de 5,0%.

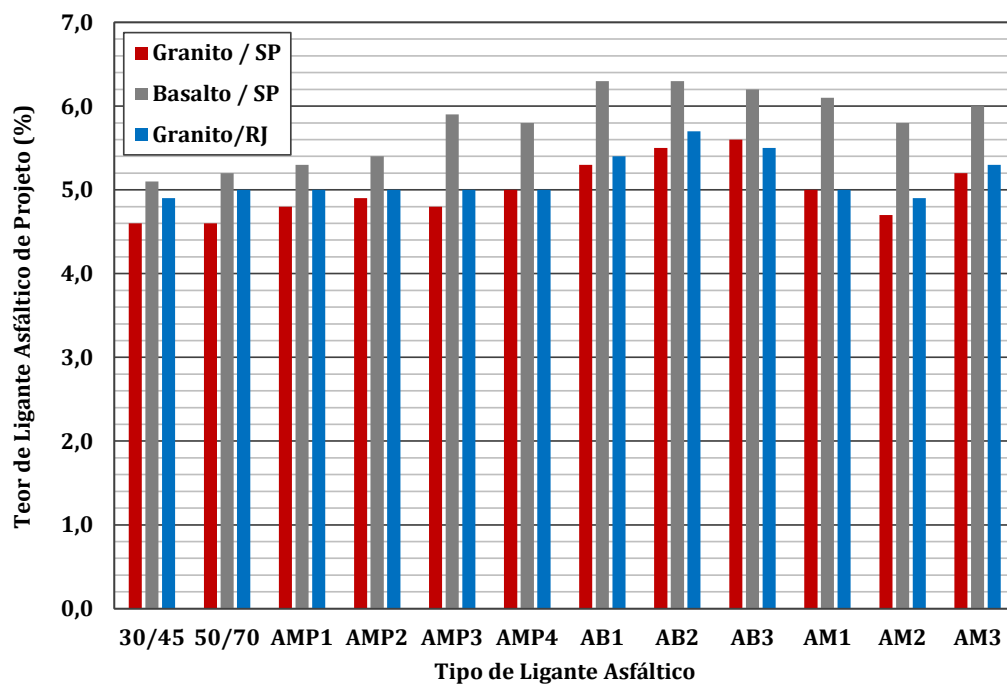


Figura 4.8: Teor de ligante asfáltico de projeto das misturas asfálticas Faixa III-DERSA

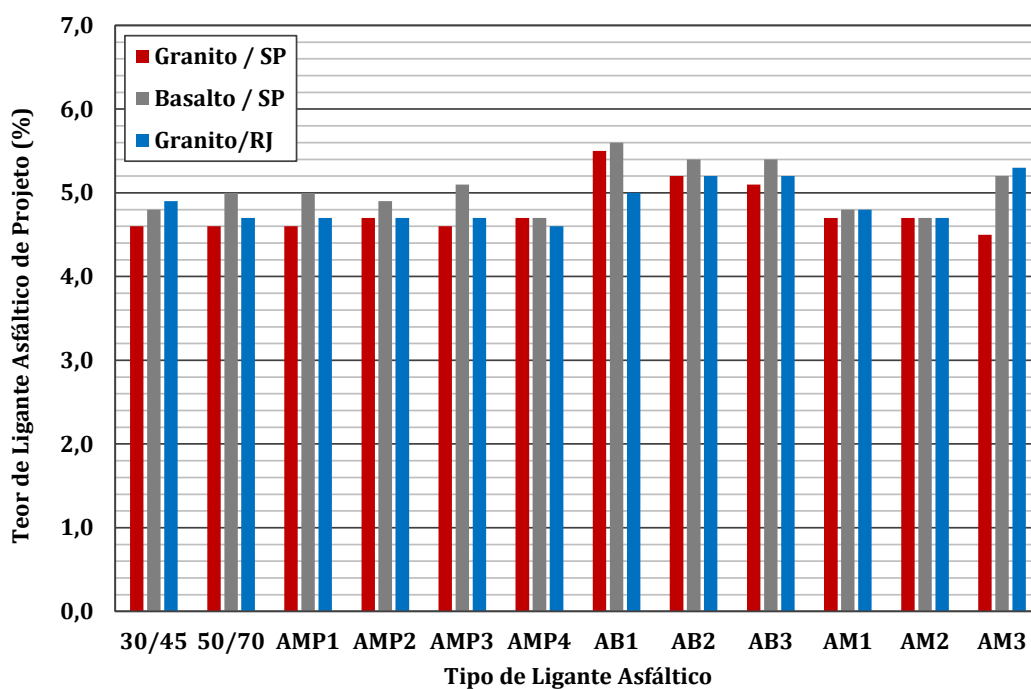


Figura 4.9: Teor de ligante asfáltico de projeto das misturas asfálticas EGL19,0mm



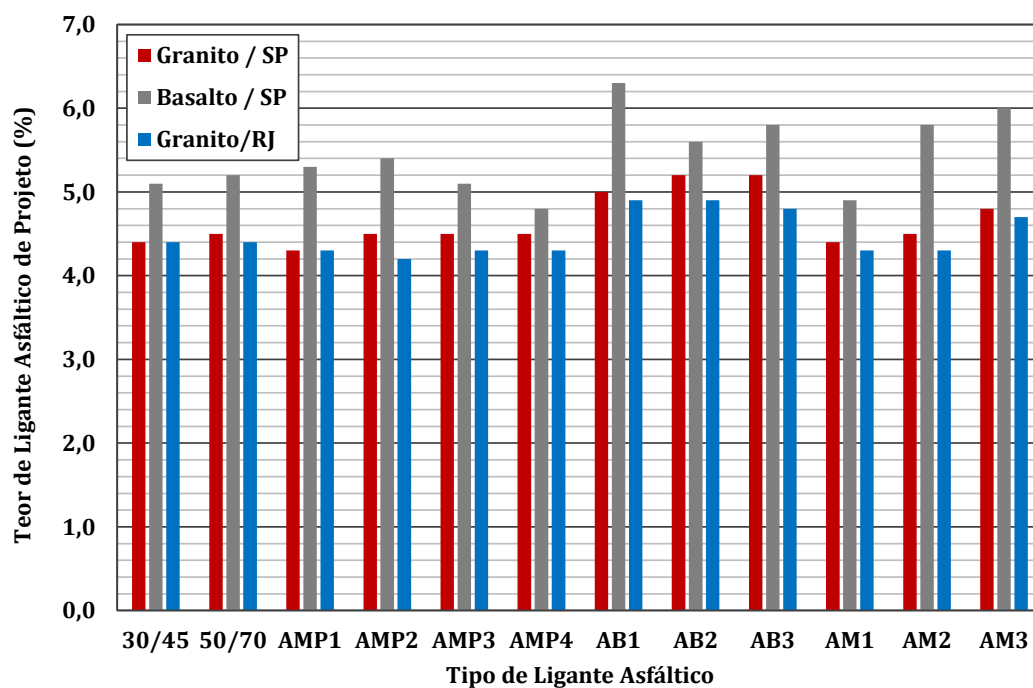


Figura 4.10: Teor de ligante asfáltico de projeto das misturas asfálticas EGL9,5mm

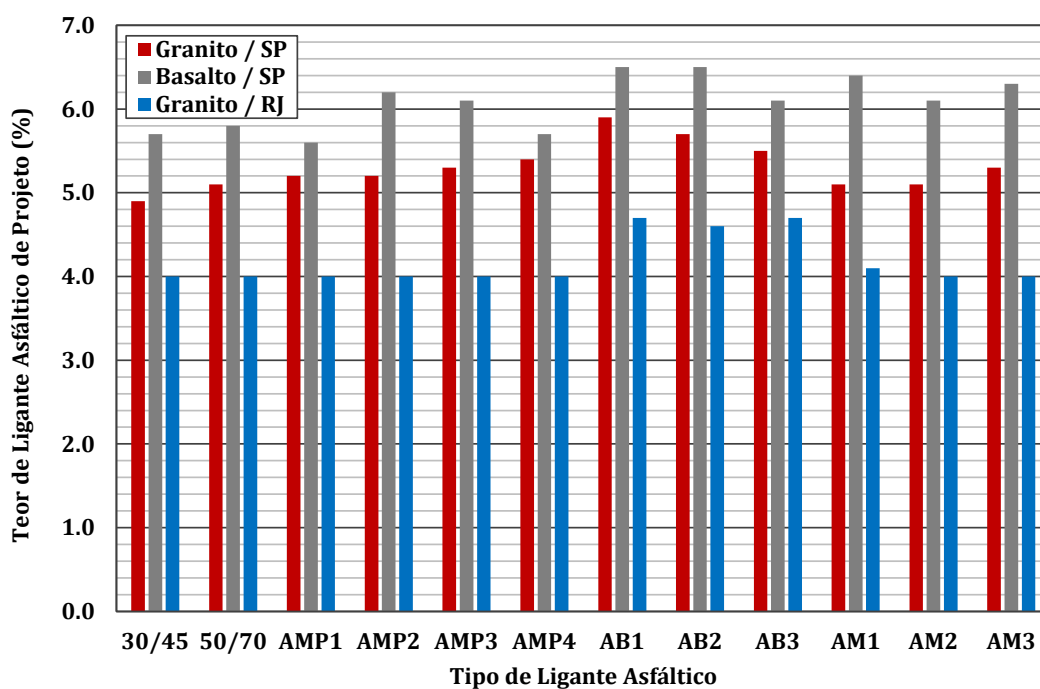


Figura 4.11: Teor de ligante asfáltico de projeto das misturas asfálticas Gap Graded

## **5. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS (ETAPA D) E ANÁLISE DOS RESULTADOS (ETAPA E)**

Nesta seção do relatório apresentam-se os resultados dos ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração, módulo dinâmico e *flow number* das misturas asfálticas estudadas e é realizada uma análise desses parâmetros mecânicos.

### **5.1. RESULTADOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO**

Este ensaio foi executado na temperatura convencionalmente utilizada no Brasil de 25°C e, de forma complementar, o ensaio foi realizado também nas temperaturas de 21,1°C e 37,8°C, que são as temperaturas intermediárias utilizadas no ensaio de módulo dinâmico. Após execução do ensaio de módulo de resiliência também foi executado o ensaio de resistência à tração (RT) na temperatura de 25°C.

A seguir são apresentados os resultados desses ensaios realizados nas misturas asfálticas, agrupados de acordo com a faixa granulométrica.

#### **5.1.1. Faixa Granulométrica Faixa III DERSA**

Nas Tabelas 5.1 a 5.3 são apresentados os resultados do ensaio de MR para as misturas asfálticas com agregados graníticos de São Paulo e do Rio de Janeiro e com agregados basálticos de São Paulo, respectivamente. Os resultados de resistência à tração para essas misturas asfálticas são apresentados nas Tabelas 5.4 a 5.6. Vale salientar que esses resultados apresentados, tanto no parâmetro MR como no RT, são a média de ensaios executados em três corpos de prova compactados no teor de projeto para o volume de vazios de projeto.

Tabela 5.1: Resultados do ensaio de MR nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | MR @ 21,1°C (MPa) |               | MR @ 25,0°C (MPa) |               | MR @ 37,8°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 1                 | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | CAP 30/45         | 10,304            | 898           | 7,679             | 251           | 2,038             | 290           |
| 2                 | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | CAP 50/70         | 8,072             | 385           | 7,128             | 336           | 1,766             | 114           |
| 3                 | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AMP1              | 7,928             | 870           | 6,041             | 280           | 2,074             | 231           |
| 4                 | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AMP2              | 10,077            | 162           | 6,419             | 627           | 2,017             | 260           |
| 5                 | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AMP3              | 9,232             | 925           | 6,506             | 199           | 3,368             | 259           |
| 6                 | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AMP4              | 7,532             | 715           | 5,996             | 501           | 2,693             | 215           |
| 7                 | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AB1               | 7,830             | 890           | 5,834             | 956           | 2,298             | 351           |
| 8                 | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AB2               | 6,324             | 278           | 4,929             | 371           | 2,405             | 98            |
| 9                 | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AB3               | 4,990             | 873           | 3,759             | 483           | 1,416             | 126           |
| 10                | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AM1               | 9,232             | 925           | 6,532             | 204           | 3,368             | 259           |
| 11                | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AM2               | 11,762            | 1,369         | 8,962             | 1,380         | 3,445             | 183           |
| 12                | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AM3               | 13,404            | 125           | 12,714            | 363           | 7,314             | 941           |

Tabela 5.2: Resultados do ensaio de RT nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | MR @ 21,1°C (MPa) |               | MR @ 25,0°C (MPa) |               | MR @ 37,8°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 49                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | CAP 30/45         | 8,675             | 551           | 7,004             | 753           | 2,969             | 162           |
| 50                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | CAP 50/70         | 5,458             | 202           | 3,886             | 272           | 2,256             | 310           |
| 51                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AMP1              | 5,342             | 238           | 4,022             | 408           | 1,615             | 258           |
| 52                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AMP2              | 6,537             | 128           | 5,854             | 161           | 2,124             | 364           |
| 53                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AMP3              | 7,055             | 381           | 5,496             | 418           | 2,145             | 95            |
| 54                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AMP4              | 7,558             | 130           | 5,544             | 286           | 3,478             | 274           |
| 55                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AB1               | 5,170             | 602           | 4,902             | 301           | 2,626             | 33            |
| 56                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AB2               | 5,378             | 730           | 3,870             | 854           | 1,688             | 365           |
| 57                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AB3               | 7,610             | 276           | 5,827             | 350           | 3,000             | 327           |
| 58                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AM1               | 9,763             | 251           | 7,117             | 513           | 4,716             | 444           |
| 59                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AM2               | 7,775             | 117           | 6,547             | 342           | 3,390             | 144           |
| 60                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AM3               | 8,105             | 708           | 7,049             | 329           | 3,097             | 419           |

Tabela 5.3: Resultados do ensaio de RT nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | MR @ 21,1°C (MPa) |               | MR @ 25,0°C (MPa) |               | MR @ 37,8°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 97                | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | CAP 30/45         | 10,035            | 841           | 7,316             | 472           | 2,095             | 109           |
| 98                | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | CAP 50/70         | 9,024             | 439           | 6,308             | 240           | 1,781             | 83            |
| 99                | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AMP1              | 7,280             | 677           | 5,836             | 636           | 1,488             | 69            |
| 100               | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AMP2              | 9,163             | 454           | 6,350             | 116           | 1,896             | 146           |
| 101               | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AMP3              | 9,996             | 446           | 8,554             | 285           | 2,634             | 172           |
| 102               | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AMP4              | 7,201             | 192           | 5,541             | 428           | 2,259             | 89            |
| 103               | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AB1               | 8,209             | 577           | 6,068             | 486           | 3,239             | 40            |
| 104               | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AB2               | 8,300             | 346           | 6,213             | 307           | 3,155             | 74            |
| 105               | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AB3               | 8,390             | 115           | 6,359             | 128           | 3,071             | 109           |
| 106               | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AM1               | 10,399            | 614           | 7,948             | 422           | 4,051             | 112           |
| 107               | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AM2               | 11,961            | 165           | 9,512             | 1,473         | 3,409             | 33            |
| 108               | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AM3               | 11,185            | 497           | 9,272             | 500           | 4,245             | 428           |

Tabela 5.4: Resultados do ensaio de RT nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | RT @ 25,0°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 1                 | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | CAP 30/45         | 2,40              | 0,08          |
| 2                 | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | CAP 50/70         | 1,82              | 0,01          |
| 3                 | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AMP1              | 2,22              | 0,14          |
| 4                 | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AMP2              | 2,18              | 0,09          |
| 5                 | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AMP3              | 1,83              | 0,04          |
| 6                 | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AMP4              | 2,17              | 0,25          |
| 7                 | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AB1               | 1,96              | 0,10          |
| 8                 | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AB2               | 1,93              | 0,05          |
| 9                 | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AB3               | 1,87              | 0,09          |
| 10                | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AM1               | 2,59              | 0,09          |
| 11                | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AM2               | 2,55              | 0,12          |
| 12                | Granito / SP       | Faixa III-DERSA      | AM3               | 2,66              | 0,25          |

Tabela 5.5: Resultados do ensaio de RT nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | RT @ 25,0°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 49                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | CAP 30/45         | 1,91              | 0,08          |
| 50                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | CAP 50/70         | 1,19              | 0,06          |
| 51                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AMP1              | 1,74              | 0,06          |
| 52                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AMP2              | 1,63              | 0,04          |
| 53                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AMP3              | 1,62              | 0,09          |
| 54                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AMP4              | 1,71              | 0,07          |
| 55                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AB1               | 1,63              | 0,11          |
| 56                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AB2               | 1,43              | 0,08          |
| 57                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AB3               | 1,82              | 0,15          |
| 58                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AM1               | 2,10              | 0,08          |
| 59                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AM2               | 2,03              | 0,25          |
| 60                | Granito / RJ       | Faixa III-DERSA      | AM3               | 2,20              | 0,04          |

Tabela 5.6: Resultados do ensaio de RT nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | RT @ 25,0°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 97                | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | CAP 30/45         | 1,97              | 0,03          |
| 98                | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | CAP 50/70         | 1,50              | 0,07          |
| 99                | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AMP1              | 2,05              | 0,17          |
| 100               | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AMP2              | 2,19              | 0,11          |
| 101               | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AMP3              | 2,39              | 0,14          |
| 102               | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AMP4              | 2,44              | 0,14          |
| 103               | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AB1               | 1,80              | 0,04          |
| 104               | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AB2               | 1,80              | 0,05          |
| 105               | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AB3               | 1,81              | 0,05          |
| 106               | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AM1               | 1,96              | 0,27          |
| 107               | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AM2               | 2,56              | 0,07          |
| 108               | Basalto / SP       | Faixa III-DERSA      | AM3               | 2,86              | 0,06          |

Na Figura 5.1 são apresentados os resultados de MR das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos em função da temperatura. A construção dessa figura foi realizada da seguinte maneira:

- Os resultados de MR obtidos nas temperaturas de 21,1°, 25,0° e 37,8°C, foram utilizados para obter uma regressão linear para possibilitar o traçado de forma contínua da variação do módulo de resiliência entre 20,0° e 40,0°C,
- Para as misturas asfálticas com ligantes convencionais (CAP 30/45 e CAP 50/70), apresentam-se os valores médios de MR na Figura 5.1, em função da regressão linear obtida.
- No caso das misturas asfálticas com ligantes asfálticos modificados, agruparam-se da seguinte maneira:
  - em vermelho: ligantes asfálticos modificados por polímero: AMP1, AMP2, AMP3 e AMP4;
  - em verde: ligantes asfálticos modificados por pneu de borracha moída: AB1, AB2 e AB3;
  - em azul: ligantes asfálticos de alto módulo: AM1, AM2 e AM3.
- Nota-se na Figura 5.1 que os valores de MR das misturas asfálticas com ligantes asfálticos modificados são apresentados no formato de faixas, as quais foram construídas com os menores e maiores valores obtidos nos ensaios.

Nas misturas asfálticas com agregados basálticos do Estado de São Paulo e com agregados graníticos do Estado de Rio de Janeiro foi utilizado o mesmo procedimento descrito para a Figura 5.1, e os resultados são apresentados na Figura 5.2 e na Figura 5.3, respectivamente.

Com relação aos resultados de resistência à tração, nas Figuras 5.4 a 5.6 são apresentados esses valores para as misturas asfálticas estudadas na Faixa III DERSA.

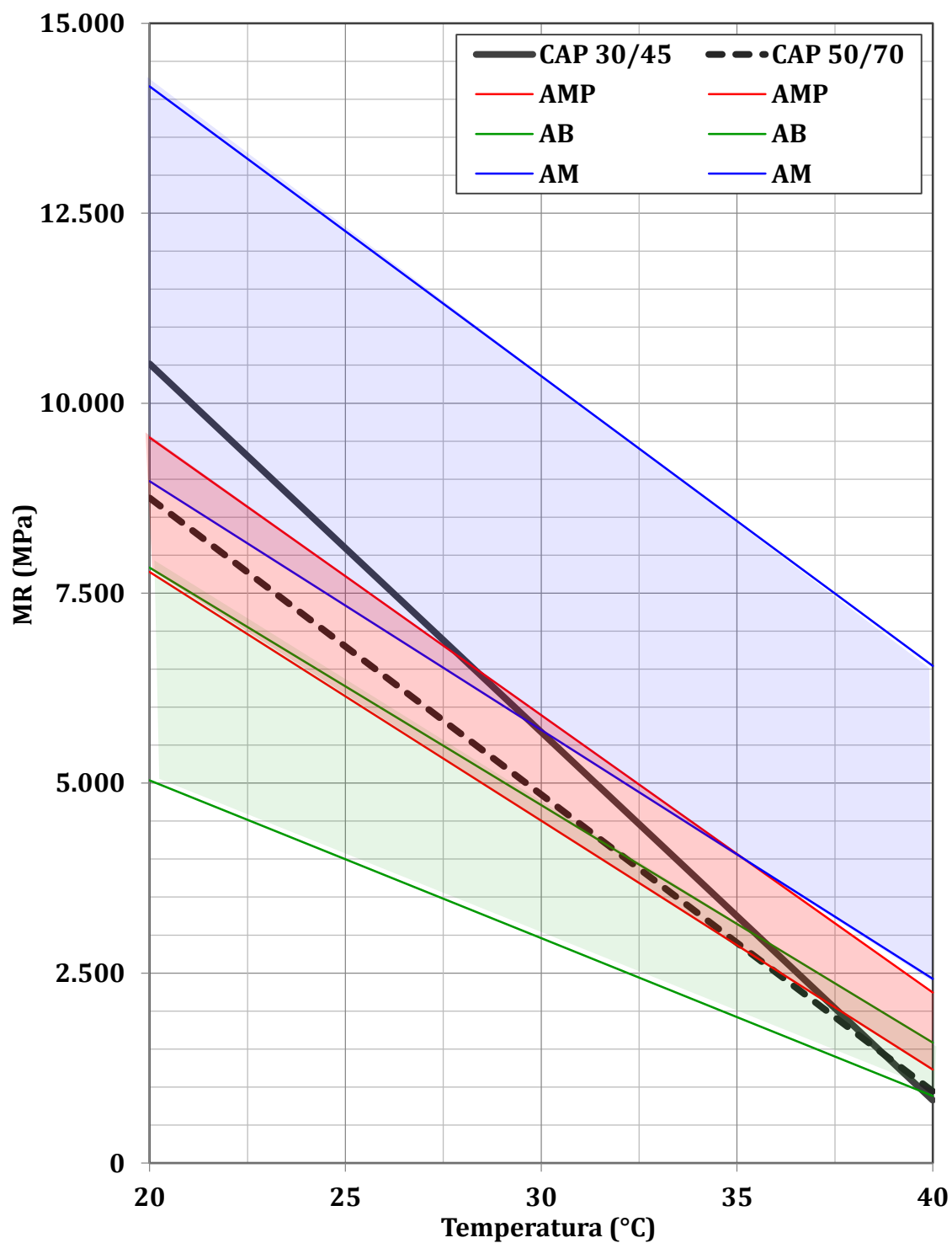


Figura 5.1. Resultados de MR nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo, em função da temperatura de ensaio

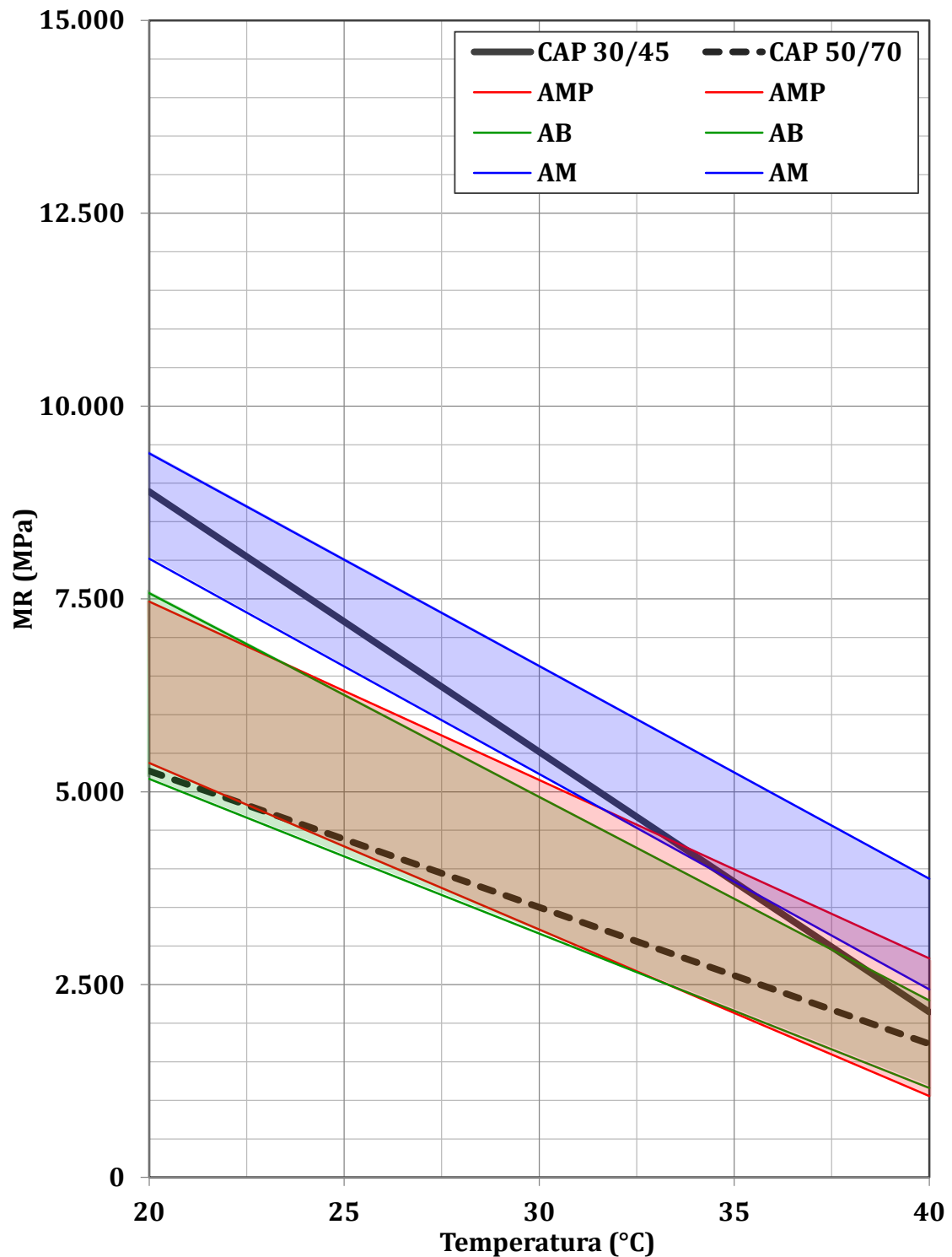


Figura 5.2. Resultados de MR nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro, em função da temperatura de ensaio



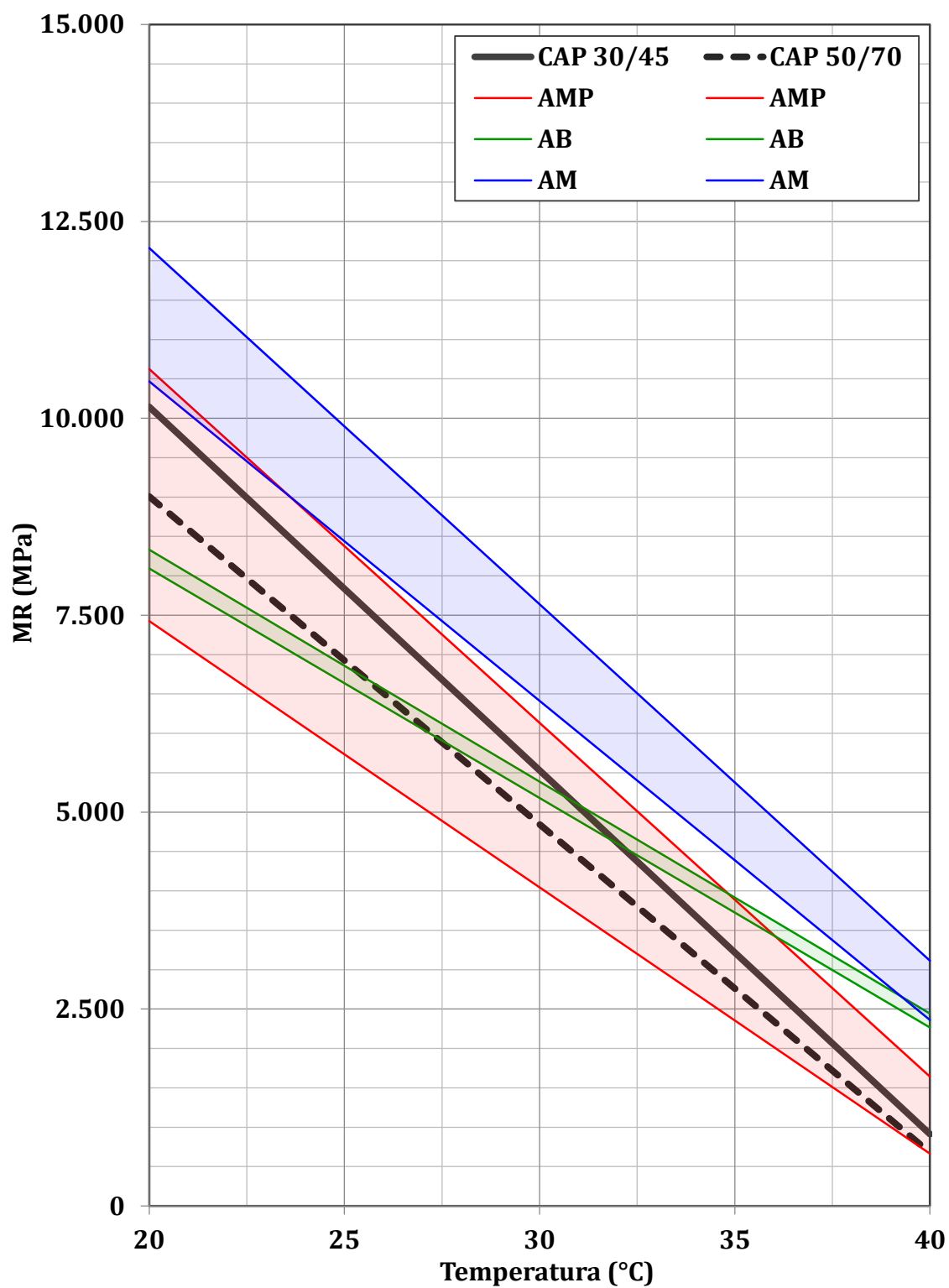


Figura 5.3. Resultados de MR nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos do Estado de São Paulo, em função da temperatura de ensaio

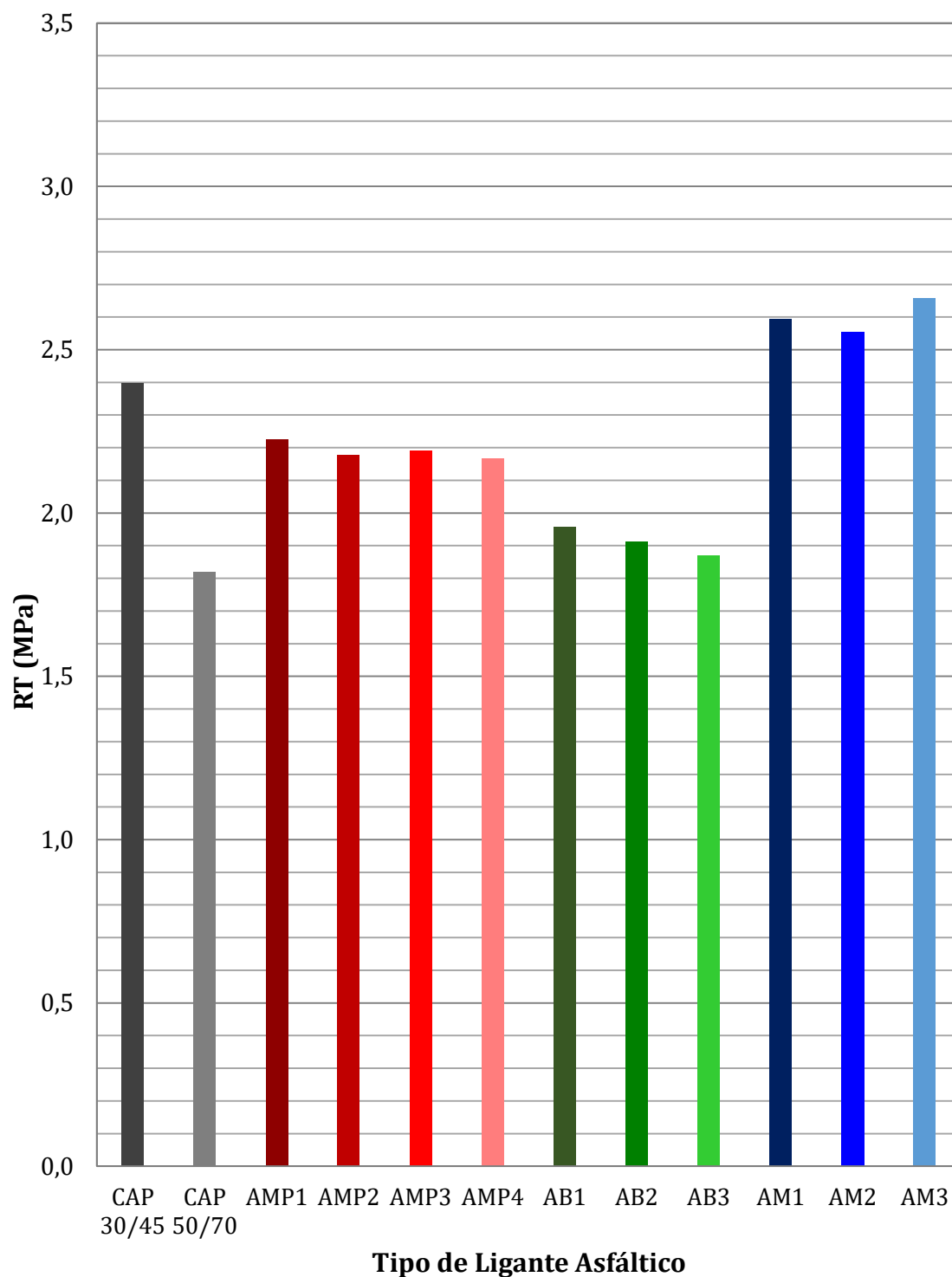


Figura 5.4. Resultados de RT nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo

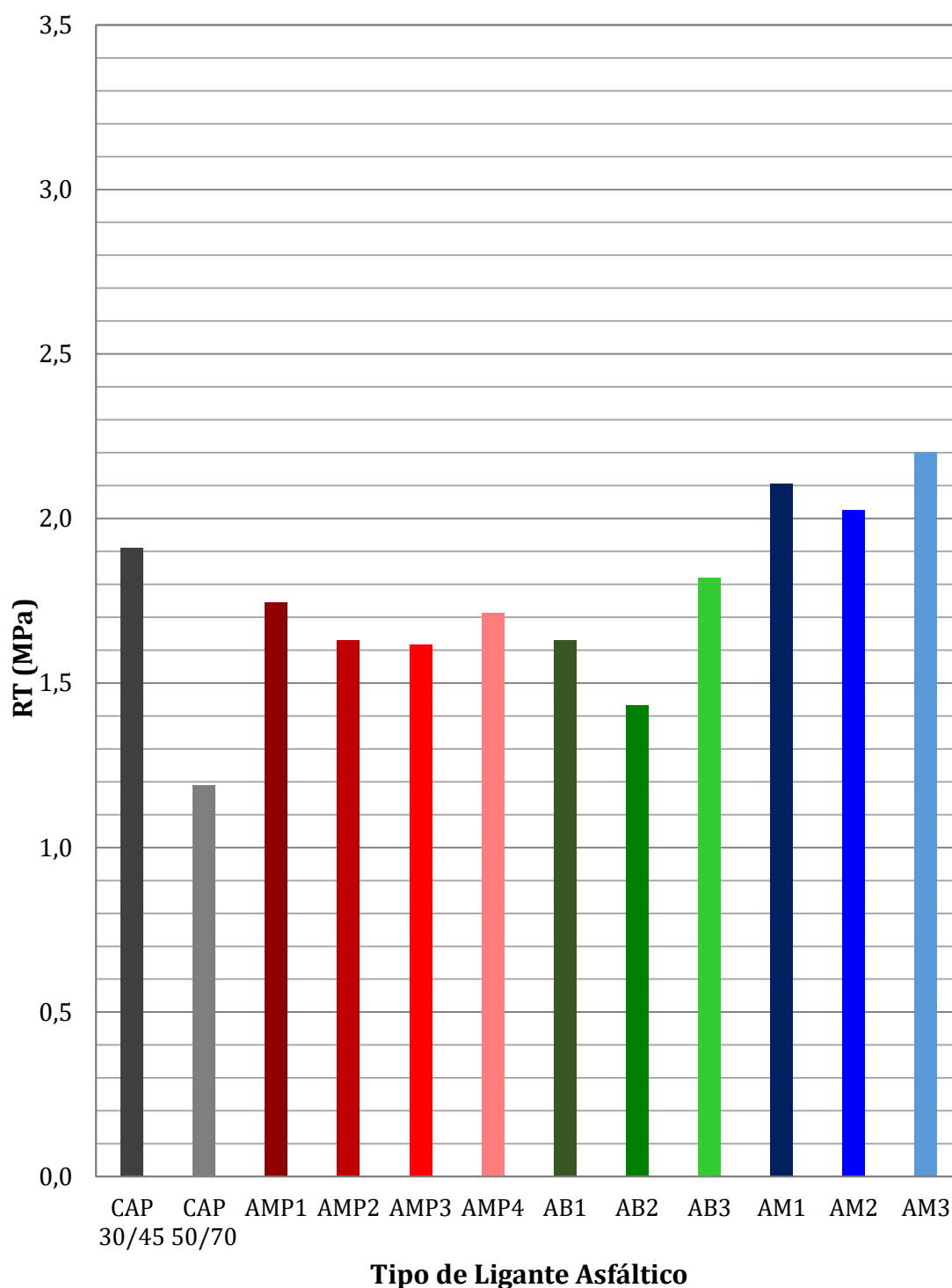


Figura 5.5. Resultados de RT nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de Rio Janeiro

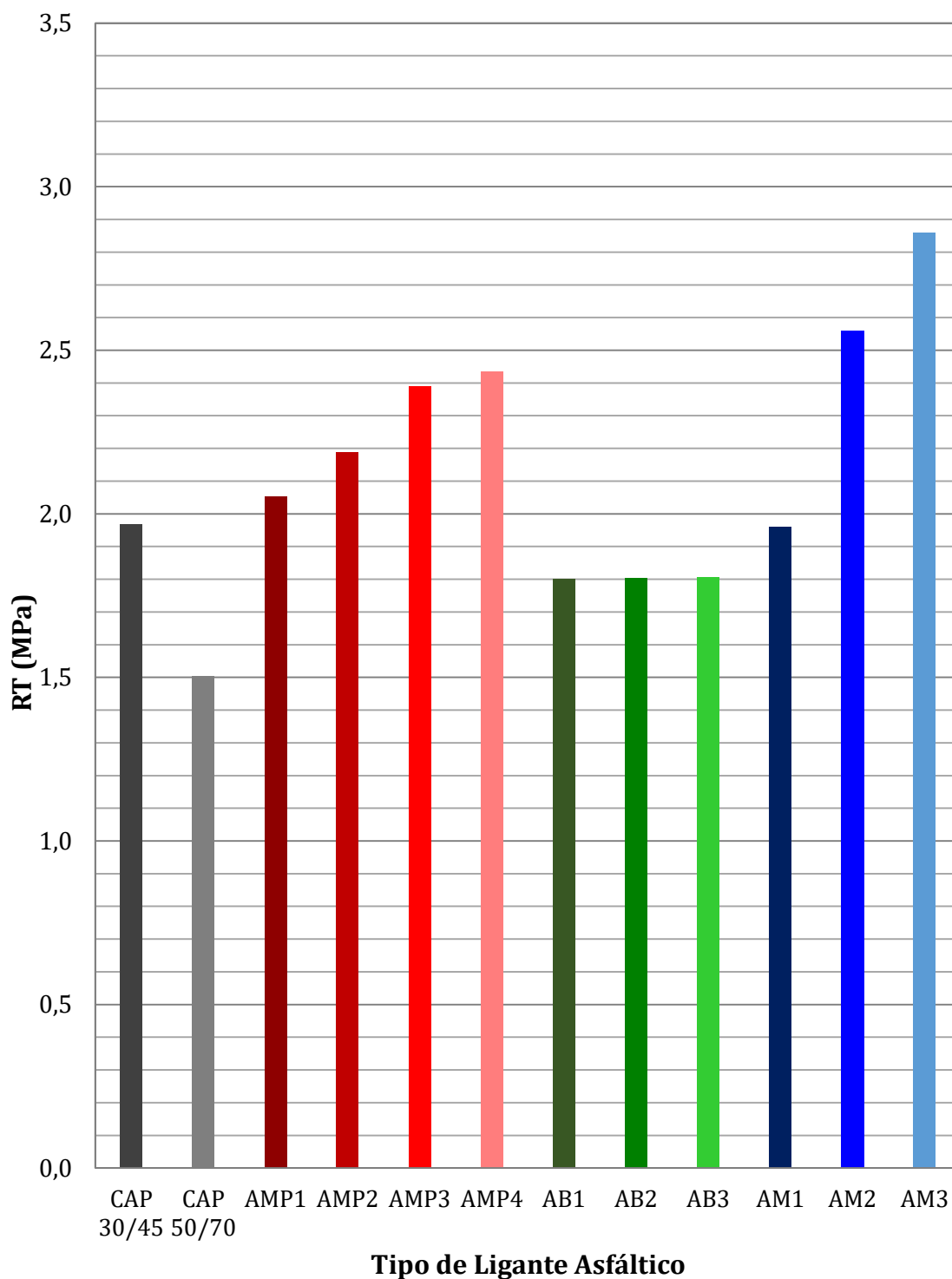


Figura 5.6. Resultados de RT nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos do Estado de São Paulo

### 5.1.2. Faixa Granulométrica EGL 19,0mm

Nas Tabelas 5.7 a 5.12 são apresentados os resultados os resultados de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração, das misturas asfálticas com agregados graníticos e basálticos do Estado de São Paulo e com agregados basálticos do Estado do Rio de Janeiro. Vale salientar que esses resultados, tanto no parâmetro MR como no RT, são a média de ensaios executados em três corpos de prova compactados no teor de projeto para o volume de vazios de projeto.

Tabela 5.7: Resultados do ensaio de MR nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | MR @ 21,1°C (MPa) |               | MR @ 25,0°C (MPa) |               | MR @ 37,8°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 13                | Granito / SP       | EGL 19mm             | CAP 30/45         | 9,641             | 134           | 6,824             | 449           | 2,506             | 240           |
| 14                | Granito / SP       | EGL 19mm             | CAP 50/70         | 6,094             | 210           | 5,533             | 277           | 1,196             | 74            |
| 15                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AMP1              | 6,955             | 710           | 5,221             | 586           | 1,449             | 18            |
| 16                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AMP2              | 7,628             | 410           | 5,511             | 284           | 1,580             | 30            |
| 17                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AMP3              | 5,581             | 463           | 4,126             | 41            | 1,508             | 61            |
| 18                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AMP4              | 5,939             | 735           | 4,922             | 320           | 1,538             | 239           |
| 19                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AB1               | 7,919             | 598           | 5,418             | 847           | 2,133             | 13            |
| 20                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AB2               | 5,060             | 329           | 4,245             | 113           | 1,816             | 168           |
| 21                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AB3               | 5,271             | 33            | 4,132             | 286           | 1,492             | 168           |
| 22                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AM1               | 8,569             | 633           | 7,322             | 285           | 2,655             | 244           |
| 23                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AM2               | 10,394            | 1,246         | 9,021             | 720           | 3,743             | 180           |
| 24                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AM3               | 9,237             | 1,050         | 8,060             | 1,283         | 2,440             | 24            |

Tabela 5.8: Resultados do ensaio de MR nas misturas asfálticas Faixa EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | MR @ 21,1°C (MPa) |               | MR @ 25,0°C (MPa) |               | MR @ 37,8°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 61                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | CAP 30/45         | 9,308             | 143           | 7,128             | 425           | 2,382             | 426           |
| 62                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | CAP 50/70         | 6,335             | 818           | 6,159             | 611           | 1,837             | 172           |
| 63                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AMP1              | 6,275             | 126           | 5,410             | 275           | 1,987             | 132           |
| 64                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AMP2              | 8,162             | 265           | 6,878             | 721           | 2,828             | 111           |
| 65                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AMP3              | 10,584            | 451           | 7,248             | 355           | 2,255             | 87            |
| 66                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AMP4              | 5,866             | 193           | 4,017             | 386           | 1,805             | 554           |
| 67                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AB1               | 6,029             | 848           | 4,392             | 773           | 1,685             | 137           |
| 68                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AB2               | 6,616             | 1,477         | 5,539             | 736           | 2,489             | 332           |
| 69                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AB3               | 5,228             | 643           | 4,370             | 65            | 1,895             | 233           |
| 70                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AM1               | 12,900            | 300           | 10,120            | 754           | 3,498             | 210           |
| 71                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AM2               | 11,839            | 636           | 7,671             | 210           | 3,027             | 66            |
| 72                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AM3               | 12,687            | 1,602         | 9,488             | 331           | 4,019             | 149           |

Tabela 5.9: Resultados do ensaio de MR nas misturas asfálticas Faixa EGL 19,0mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | MR @ 21,1°C (MPa) |               | MR @ 25,0°C (MPa) |               | MR @ 37,8°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 109               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | CAP 30/45         | 7,073             | 725           | 4,538             | 750           | 1,372             | 362           |
| 110               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | CAP 50/70         | 7,781             | 444           | 5,809             | 319           | 1,349             | 87            |
| 111               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AMP1              | 7,545             | 204           | 5,272             | 17            | 2,220             | 72            |
| 112               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AMP2              | 8,710             | 417           | 6,219             | 619           | 2,255             | 34            |
| 113               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AMP3              | 9,588             | 285           | 7,394             | 320           | 2,760             | 185           |
| 114               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AMP4              | 6,795             | 948           | 4,974             | 268           | 1,889             | 456           |
| 115               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AB1               | 6,341             | 906           | 4,640             | 1,184         | 2,378             | 593           |
| 116               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AB2               | 6,346             | 617           | 4,542             | 816           | 2,237             | 393           |
| 117               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AB3               | 6,352             | 328           | 4,444             | 448           | 2,095             | 192           |
| 118               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AM1               | 10,058            | 498           | 6,923             | 338           | 3,459             | 462           |
| 119               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AM2               | 10,267            | 1,357         | 8,393             | 717           | 2,893             | 59            |
| 120               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AM3               | 12,933            | 73            | 10,076            | 264           | 5,439             | 507           |

Tabela 5.10: Resultados do ensaio de RT nas misturas asfálticas Faixa EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | RT @ 25,0°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 13                | Granito / SP       | EGL 19mm             | CAP 30/45         | 2,00              | 0,17          |
| 14                | Granito / SP       | EGL 19mm             | CAP 50/70         | 1,28              | 0,04          |
| 15                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AMP1              | 2,19              | 0,08          |
| 16                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AMP2              | 1,81              | 0,01          |
| 17                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AMP3              | 1,86              | 0,16          |
| 18                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AMP4              | 2,12              | 0,11          |
| 19                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AB1               | 1,93              | 0,05          |
| 20                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AB2               | 1,62              | 0,23          |
| 21                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AB3               | 1,95              | 0,04          |
| 22                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AM1               | 2,52              | 0,27          |
| 23                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AM2               | 2,22              | 0,12          |
| 24                | Granito / SP       | EGL 19mm             | AM3               | 2,64              | 0,15          |

Tabela 5.11: Resultados do ensaio de RT nas misturas asfálticas Faixa EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | RT @ 25,0°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 61                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | CAP 30/45         | 2.55              | 0.02          |
| 62                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | CAP 50/70         | 2.53              | 0.02          |
| 63                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AMP1              | 2.55              | 0.02          |
| 64                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AMP2              | 2.54              | 0.01          |
| 65                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AMP3              | 2.03              | 0.07          |
| 66                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AMP4              | 1.75              | 0.05          |
| 67                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AB1               | 1.63              | 0.09          |
| 68                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AB2               | 1.81              | 0.07          |
| 69                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AB3               | 1.51              | 0.09          |
| 70                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AM1               | 2.39              | 0.16          |
| 71                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AM2               | 2.52              | 0.17          |
| 72                | Granito / RJ       | EGL 19mm             | AM3               | 2.66              | 0.08          |

Tabela 5.12: Resultados do ensaio de RT nas misturas asfálticas Faixa EGL 19,0mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | RT @ 25,0°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 109               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | CAP 30/45         | 2,51              | 0,01          |
| 110               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | CAP 50/70         | 1,65              | 0,05          |
| 111               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AMP1              | 2,15              | 0,08          |
| 112               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AMP2              | 2,37              | 0,07          |
| 113               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AMP3              | 2,02              | 0,06          |
| 114               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AMP4              | 2,69              | 0,11          |
| 115               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AB1               | 1,66              | 0,12          |
| 116               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AB2               | 1,57              | 0,12          |
| 117               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AB3               | 1,47              | 0,12          |
| 118               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AM1               | 1,84              | 0,02          |
| 119               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AM2               | 2,51              | 0,02          |
| 120               | Basalto / SP       | EGL 19mm             | AM3               | 3,13              | 0,09          |

Na Figura 5.7 são apresentados os resultados de MR das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo em função da temperatura. A construção dessa figura foi realizada da mesma forma em que foi realizado para as misturas asfálticas Faixa III-DERSA, do item anterior. A Figura 5.8 apresenta os resultados de MR das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro e a Figura 5.9 com agregados basálticos do Estado de São Paulo.

Com relação aos resultados de resistência à tração, nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 são apresentados esses valores para as misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos e basálticos do Estado de São Paulo e com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro.



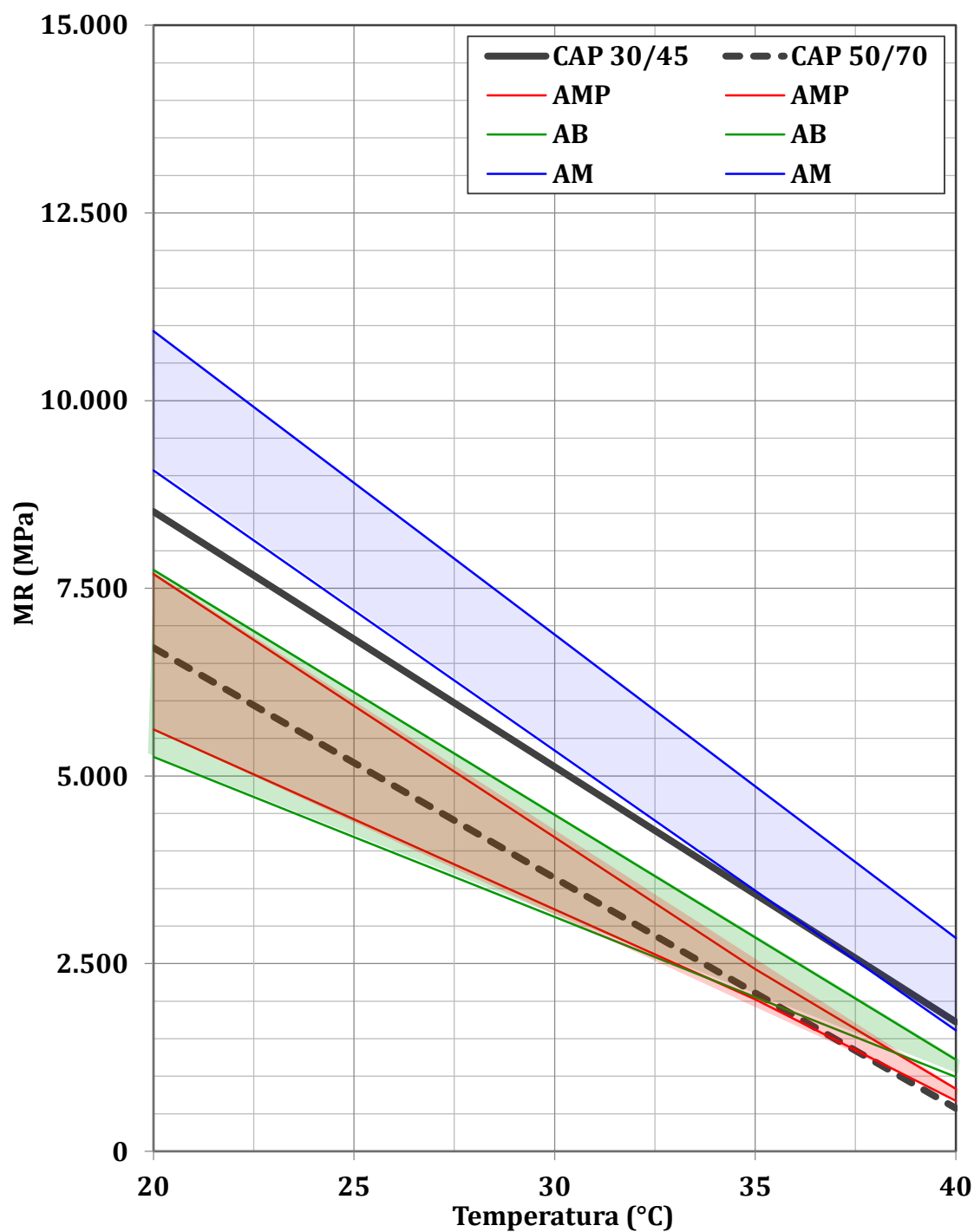


Figura 5.7. Resultados de MR nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo, em função da temperatura de ensaio

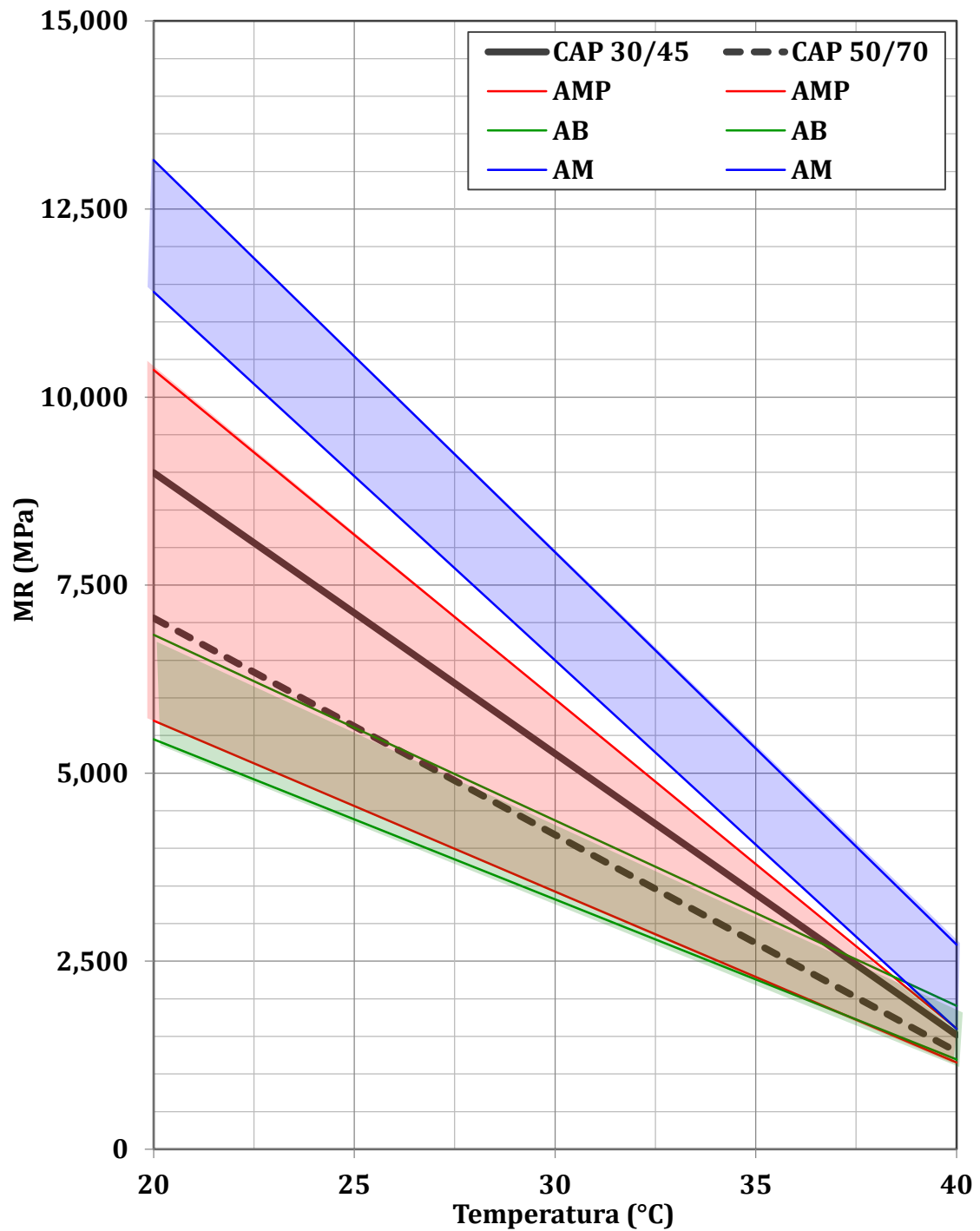


Figura 5.8. Resultados de MR nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro, em função da temperatura de ensaio

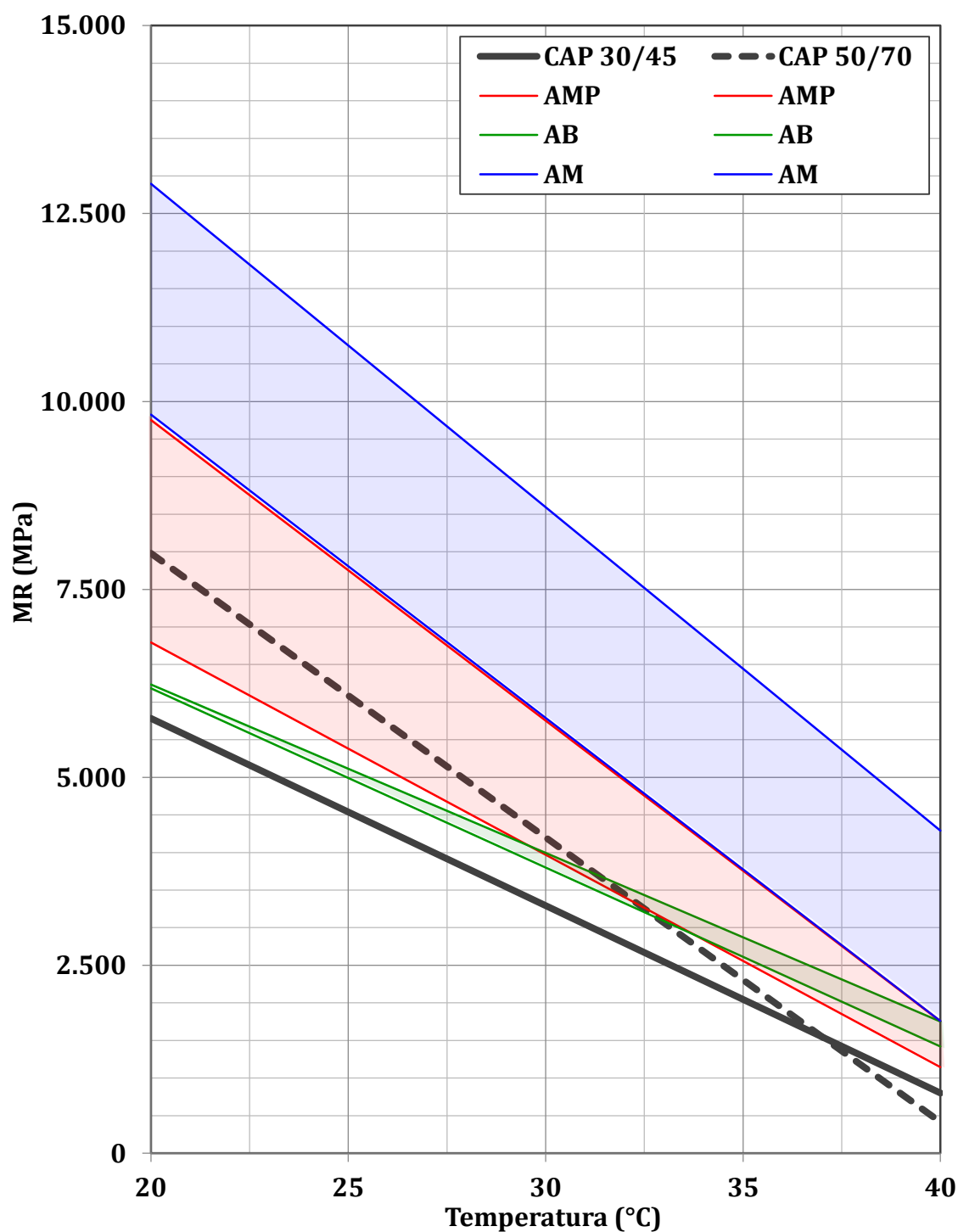


Figura 5.9. Resultados de MR nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo, em função da temperatura de ensaio

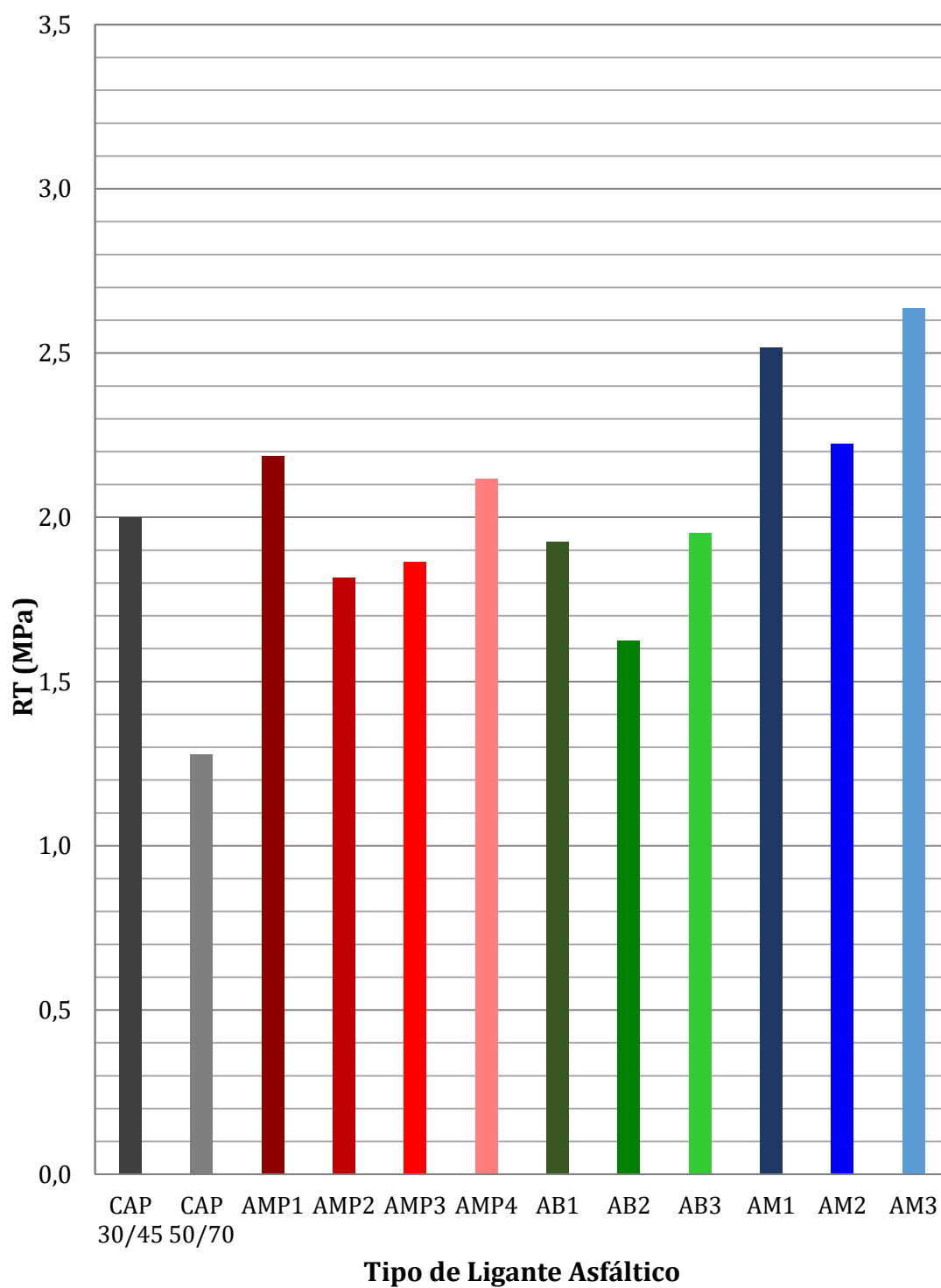


Figura 5.10. Resultados de RT nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo

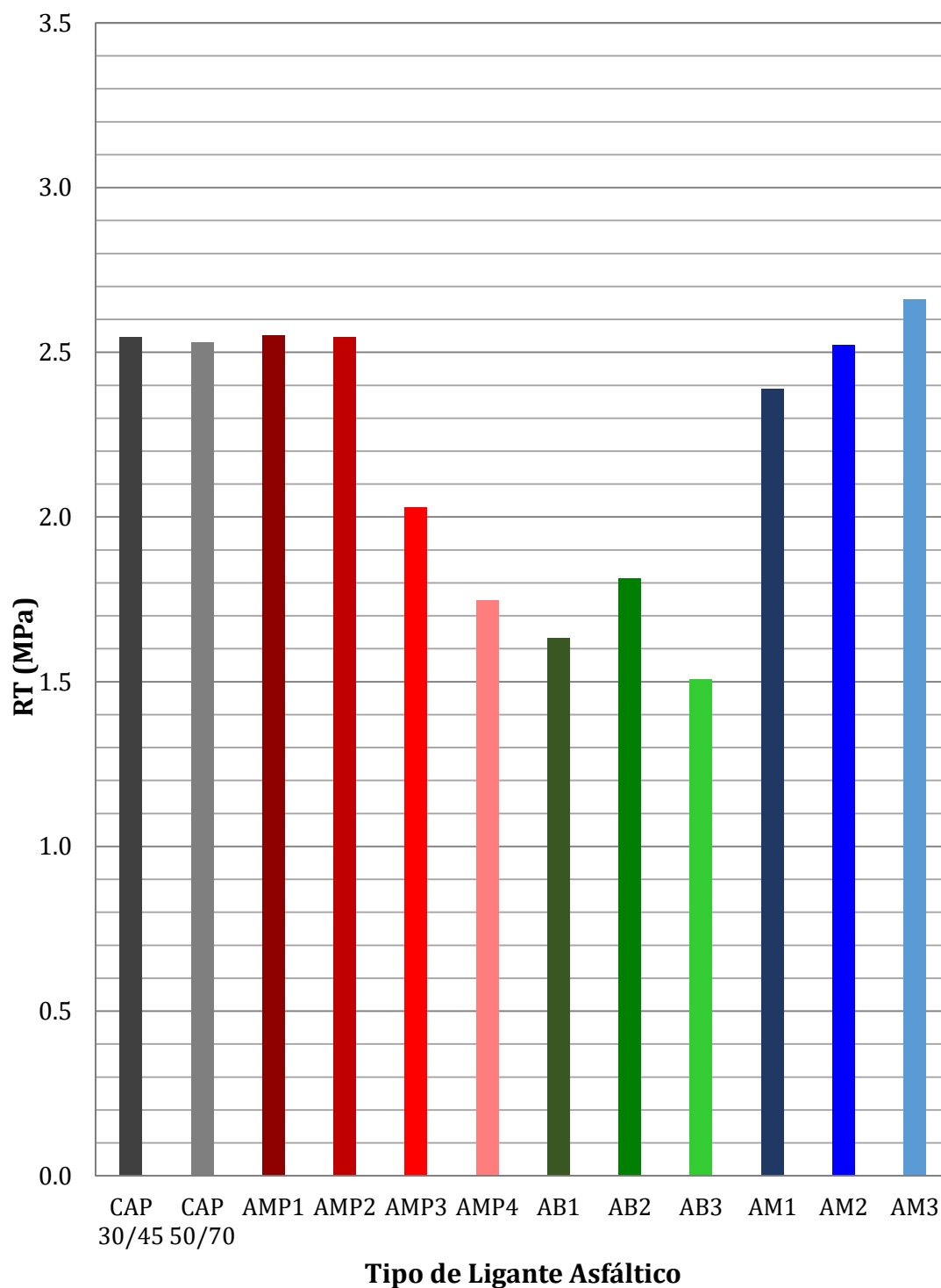


Figura 5.11. Resultados de RT nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

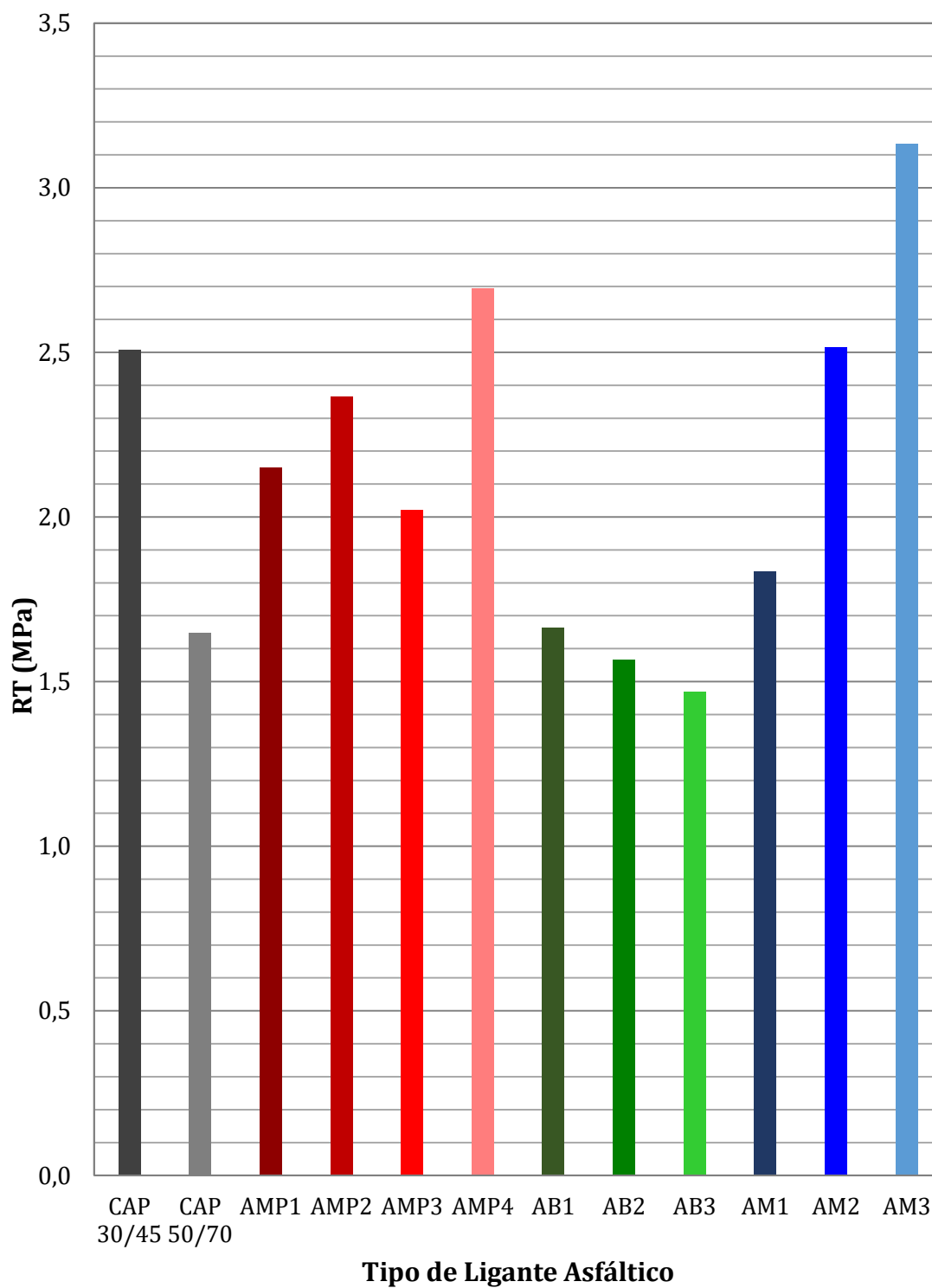


Figura 5.12. Resultados de RT nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo

### 5.1.3. Faixa Granulométrica EGL 9,5mm

Nas Tabelas 5.13 a 5.15 são apresentados os resultados do ensaio de MR para as misturas asfálticas com granulometria EGL 9,5mm e com agregados graníticos de São Paulo e do Rio de Janeiro e com agregados basálticos de São Paulo, respectivamente. Os resultados de resistência à tração para essas misturas asfálticas são apresentados nas Tabelas 5.16 a 5.18.

Tabela 5.13: Resultados do ensaio de MR nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| Mistura<br>Asfáltica | Fonte de<br>Agregados | Faixa<br>Granulométrica | Ligante<br>Asfáltico | MR @ 21,1°C<br>(MPa) |                  | MR @ 25,0°C<br>(MPa) |                  | MR @ 37,8°C<br>(MPa) |                  |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|
|                      |                       |                         |                      | Valor<br>Médio       | Desvio<br>Padrão | Valor<br>Médio       | Desvio<br>Padrão | Valor<br>Médio       | Desvio<br>Padrão |
| 25                   | Granito / SP          | EGL 9,5mm               | CAP 30/45            | 8,821                | 786              | 8,234                | 566              | 2,153                | 193              |
| 26                   | Granito / SP          | EGL 9,5mm               | CAP 50/70            | 8,511                | 690              | 6,494                | 113              | 1,333                | 244              |
| 27                   | Granito / SP          | EGL 9,5mm               | AMP1                 | 7,989                | 361              | 5,925                | 889              | 1,825                | 145              |
| 28                   | Granito / SP          | EGL 9,5mm               | AMP2                 | 8,252                | 502              | 6,513                | 288              | 1,893                | 264              |
| 29                   | Granito / SP          | EGL 9,5mm               | AMP3                 | 6,130                | 270              | 4,946                | 159              | 2,420                | 129              |
| 30                   | Granito / SP          | EGL 9,5mm               | AMP4                 | 8,616                | 761              | 5,473                | 281              | 2,462                | 145              |
| 31                   | Granito / SP          | EGL 9,5mm               | AB1                  | 10,806               | 202              | 8,377                | 115              | 4,160                | 108              |
| 32                   | Granito / SP          | EGL 9,5mm               | AB2                  | 5,728                | 426              | 4,611                | 181              | 2,268                | 191              |
| 33                   | Granito / SP          | EGL 9,5mm               | AB3                  | 6,396                | 925              | 4,700                | 633              | 1,855                | 173              |
| 34                   | Granito / SP          | EGL 9,5mm               | AM1                  | 8,880                | 247              | 6,247                | 480              | 2,302                | 187              |
| 35                   | Granito / SP          | EGL 9,5mm               | AM2                  | 11,645               | 607              | 9,345                | 583              | 3,196                | 302              |
| 36                   | Granito / SP          | EGL 9,5mm               | AM3                  | 12,154               | 274              | 9,393                | 660              | 3,493                | 13               |

Tabela 5.14: Resultados do ensaio de MR nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | MR @ 21,1°C (MPa) |               | MR @ 25,0°C (MPa) |               | MR @ 37,8°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 73                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | CAP 30/45         | 6,685             | 219           | 4,888             | 170           | 1,983             | 113           |
| 74                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | CAP 50/70         | 3,711             | 148           | 2,653             | 144           | 1,211             | 110           |
| 75                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AMP1              | 5,429             | 316           | 4,007             | 39            | 1,983             | 69            |
| 76                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AMP2              | 5,717             | 217           | 4,553             | 135           | 1,837             | 302           |
| 77                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AMP3              | 5,836             | 271           | 5,164             | 448           | 1,690             | 62            |
| 78                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AMP4              | 7,349             | 444           | 4,158             | 183           | 1,232             | 7             |
| 79                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AB1               | 3,246             | 399           | 2,456             | 319           | 941               | 208           |
| 80                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AB2               | 4,999             | 239           | 3,589             | 74            | 1,429             | 170           |
| 81                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AB3               | 6,569             | 743           | 4,694             | 361           | 1,547             | 178           |
| 82                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AM1               | 7,807             | 475           | 5,561             | 331           | 2,221             | 213           |
| 83                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AM2               | 11,213            | 378           | 7,585             | 24            | 3,215             | 162           |
| 84                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AM3               | 8,992             | 815           | 7,543             | 621           | 4,821             | 590           |

Tabela 5.15: Resultados do ensaio de RT nas misturas asfálticas Faixa EGL 9,5mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | MR @ 21,1°C (MPa) |               | MR @ 25,0°C (MPa) |               | MR @ 37,8°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 121               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | CAP 30/45         | 6,845             | 630           | 5,403             | 202           | 1,751             | 33            |
| 122               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | CAP 50/70         | 5,627             | 76            | 4,262             | 224           | 948               | 33            |
| 123               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AMP1              | 4,987             | 190           | 3,424             | 120           | 1,144             | 106           |
| 124               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AMP2              | 5,545             | 867           | 4,218             | 62            | 1,561             | 201           |
| 125               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AMP3              | 6,621             | 552           | 4,675             | 136           | 1,576             | 225           |
| 126               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AMP4              | 5,752             | 542           | 3,742             | 327           | 1,277             | 108           |
| 127               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AB1               | 3,292             | 364           | 2,307             | 403           | 866               | 75            |
| 128               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AB2               | 4,375             | 186           | 3,150             | 520           | 1,255             | 232           |
| 129               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AB3               | 5,458             | 9             | 3,992             | 637           | 1,645             | 389           |
| 130               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AM1               | 7,427             | 732           | 5,244             | 627           | 2,760             | 376           |
| 131               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AM2               | 6,533             | 462           | 4,853             | 241           | 1,485             | 345           |
| 132               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AM3               | 9,257             | 609           | 7,474             | 661           | 3,748             | 371           |



Tabela 5.16: Resultados do ensaio de RT nas misturas asfálticas Faixa EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | RT @ 25,0°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 25                | Granito / SP       | EGL 9,5mm            | CAP 30/45         | 2,48              | 0,20          |
| 26                | Granito / SP       | EGL 9,5mm            | CAP 50/70         | 1,86              | 0,11          |
| 27                | Granito / SP       | EGL 9,5mm            | AMP1              | 2,32              | 0,09          |
| 28                | Granito / SP       | EGL 9,5mm            | AMP2              | 2,15              | 0,12          |
| 29                | Granito / SP       | EGL 9,5mm            | AMP3              | 2,26              | 0,01          |
| 30                | Granito / SP       | EGL 9,5mm            | AMP4              | 2,14              | 0,09          |
| 31                | Granito / SP       | EGL 9,5mm            | AB1               | 2,22              | 0,08          |
| 32                | Granito / SP       | EGL 9,5mm            | AB2               | 1,93              | 0,07          |
| 33                | Granito / SP       | EGL 9,5mm            | AB3               | 2,12              | 0,07          |
| 34                | Granito / SP       | EGL 9,5mm            | AM1               | 2,80              | 0,19          |
| 35                | Granito / SP       | EGL 9,5mm            | AM2               | 2,44              | 0,15          |
| 36                | Granito / SP       | EGL 9,5mm            | AM3               | 3,01              | 0,14          |

Tabela 5.17: Resultados do ensaio de RT nas misturas asfálticas Faixa EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | RT @ 25,0°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 73                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | CAP 30/45         | 2.32              | 0.27          |
| 74                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | CAP 50/70         | 1.57              | 0.04          |
| 75                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AMP1              | 2.36              | 0.06          |
| 76                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AMP2              | 2.45              | 0.16          |
| 77                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AMP3              | 2.24              | 0.07          |
| 78                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AMP4              | 1.82              | 0.11          |
| 79                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AB1               | 1.33              | 0.08          |
| 80                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AB2               | 1.73              | 0.06          |
| 81                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AB3               | 1.57              | 0.18          |
| 82                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AM1               | 2.01              | 0.17          |
| 83                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AM2               | 2.21              | 0.10          |
| 84                | Granito / RJ       | EGL 9,5mm            | AM3               | 2.90              | 0.12          |

Tabela 5.18: Resultados do ensaio de RT nas misturas asfálticas Faixa EGL 9,5mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | RT @ 25,0°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 121               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | CAP 30/45         | 2,11              | 0,02          |
| 122               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | CAP 50/70         | 1,57              | 0,02          |
| 123               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AMP1              | 1,93              | 0,04          |
| 124               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AMP2              | 1,97              | 0,02          |
| 125               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AMP3              | 1,65              | 0,13          |
| 126               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AMP4              | 2,31              | 0,13          |
| 127               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AB1               | 1,32              | 0,10          |
| 128               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AB2               | 1,46              | 0,14          |
| 129               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AB3               | 1,60              | 0,17          |
| 130               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AM1               | 1,57              | 0,26          |
| 131               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AM2               | 2,05              | 0,08          |
| 132               | Basalto / SP       | EGL 9,5mm            | AM3               | 2,93              | 0,10          |

Na Figura 5.13 são apresentados os resultados de MR das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo em função da temperatura. A construção dessa figura foi realizada conforme detalhado anteriormente. As Figura 3.14 e 3.15 apresentam os resultados de MR das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado de Rio de Janeiro e agregados basálticos do Estado de São Paulo, respectivamente

Com relação aos resultados de resistência à tração, nas Figuras 3.16. 3.17 e 3.18 são apresentados esses valores para as misturas asfálticas EGL 9,5mm com os agregados estudados nesta pesquisa.

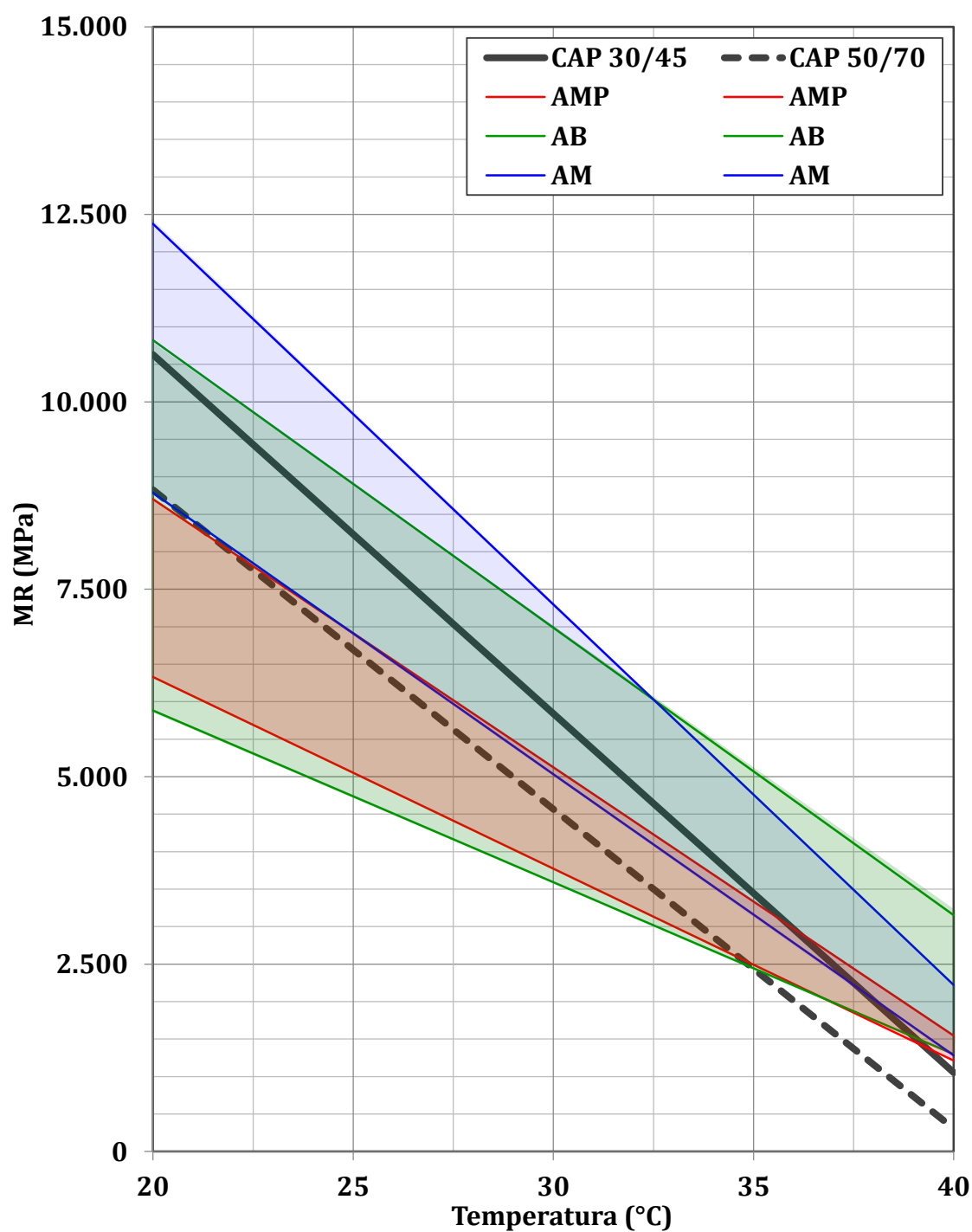


Figura 5.13. Resultados de MR nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo, em função da temperatura de ensaio

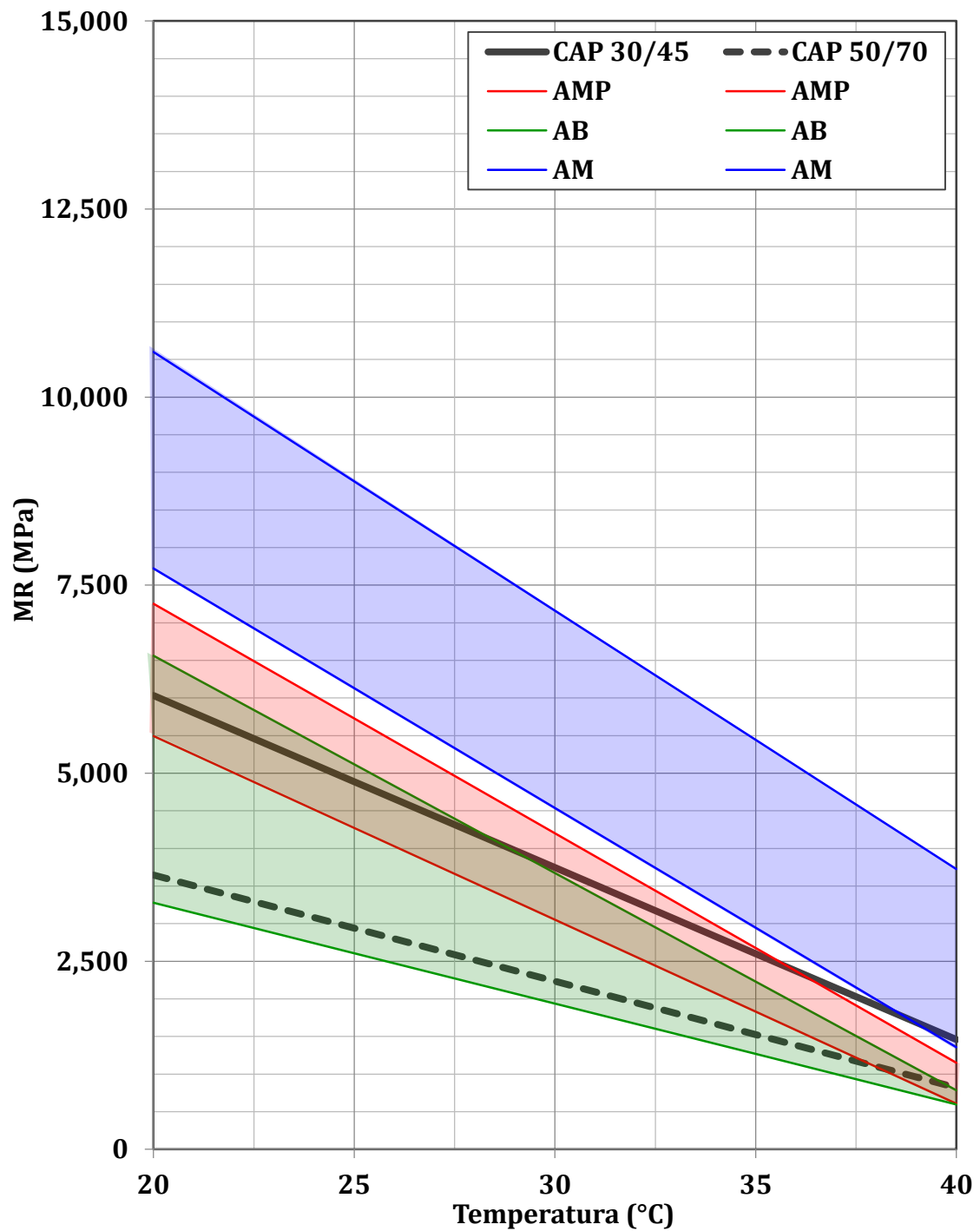


Figura 5.14. Resultados de MR nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro, em função da temperatura de ensaio

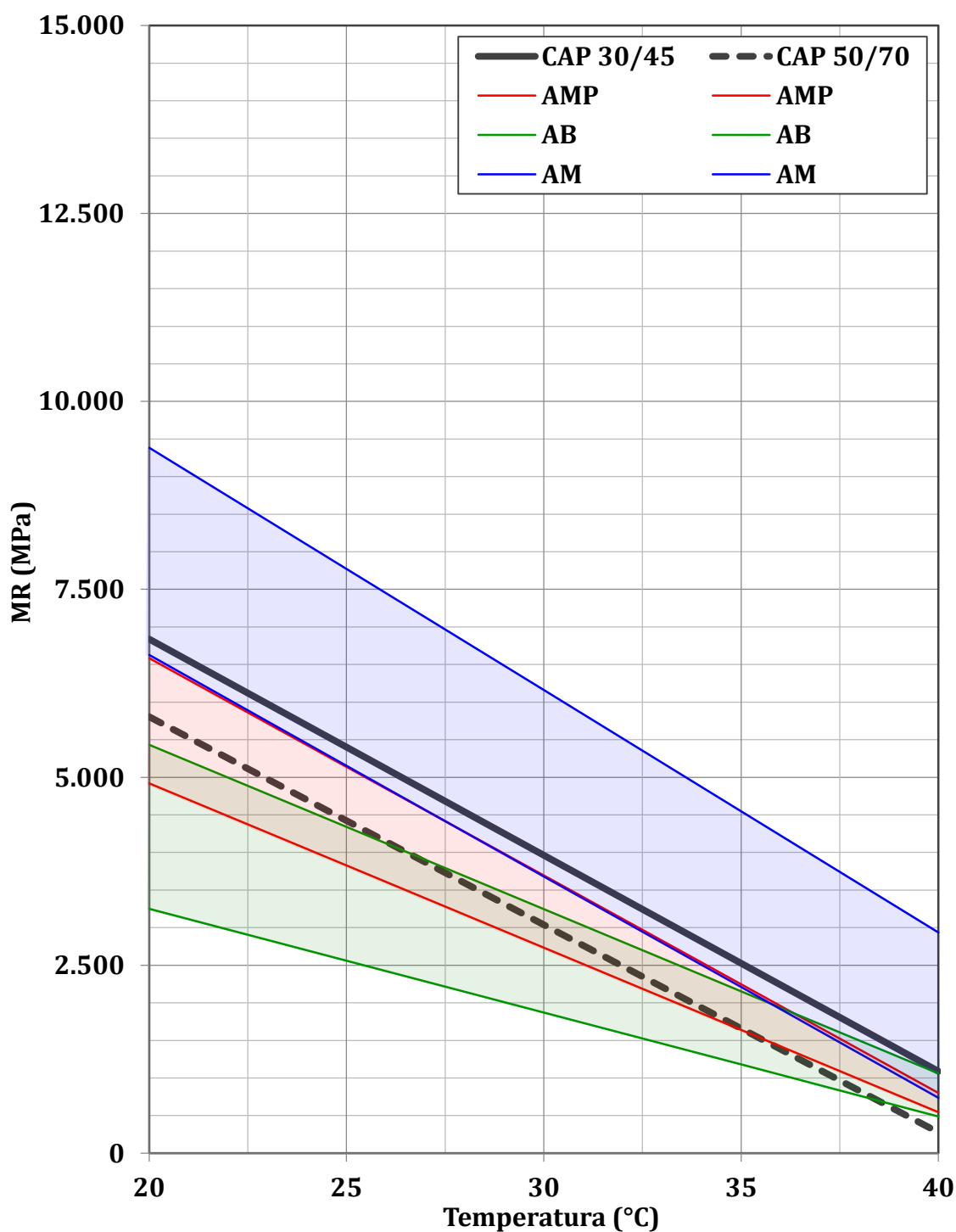


Figura 5.15. Resultados de MR nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo, em função da temperatura de ensaio

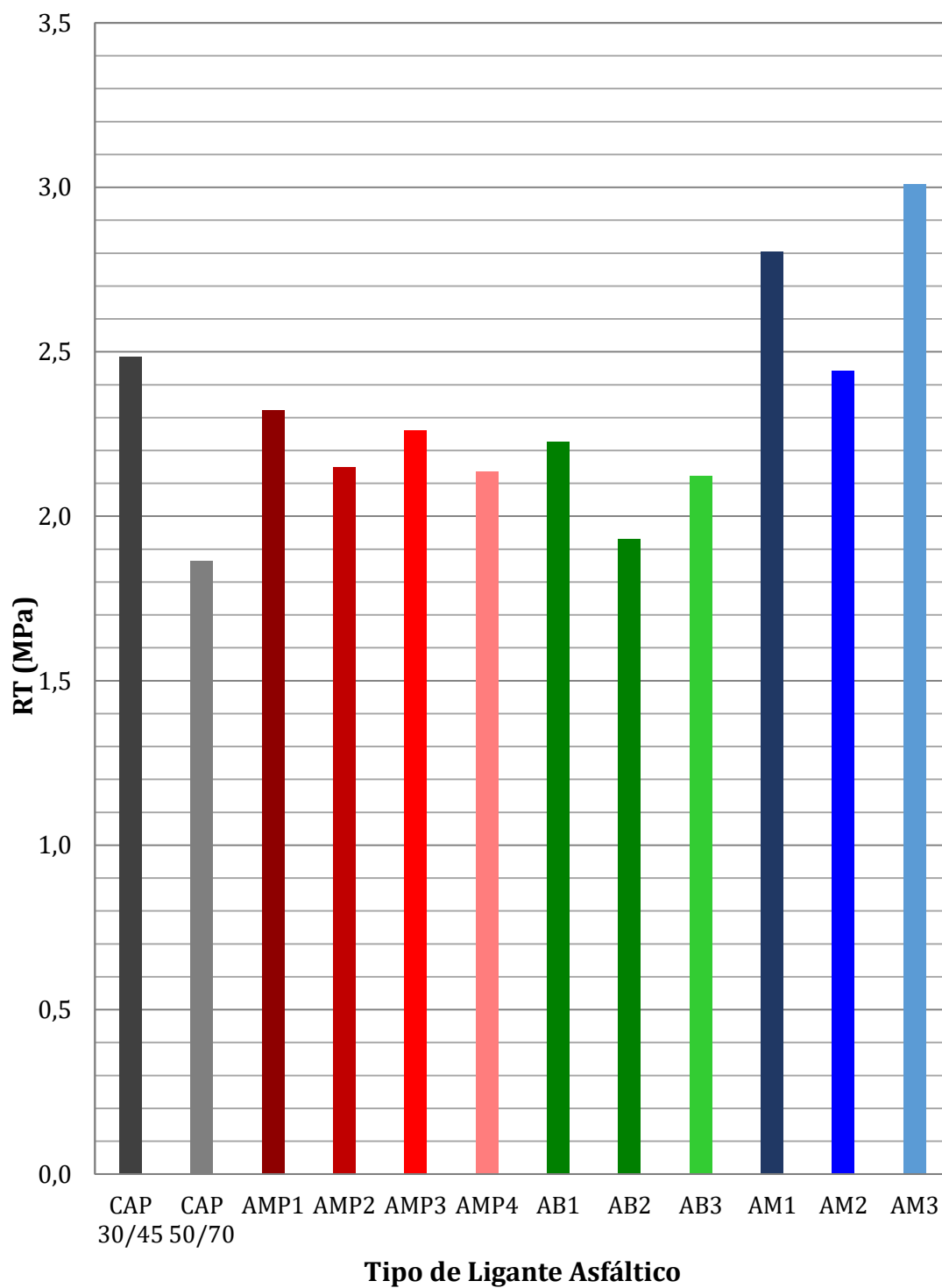


Figura 5.16. Resultados de RT nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo

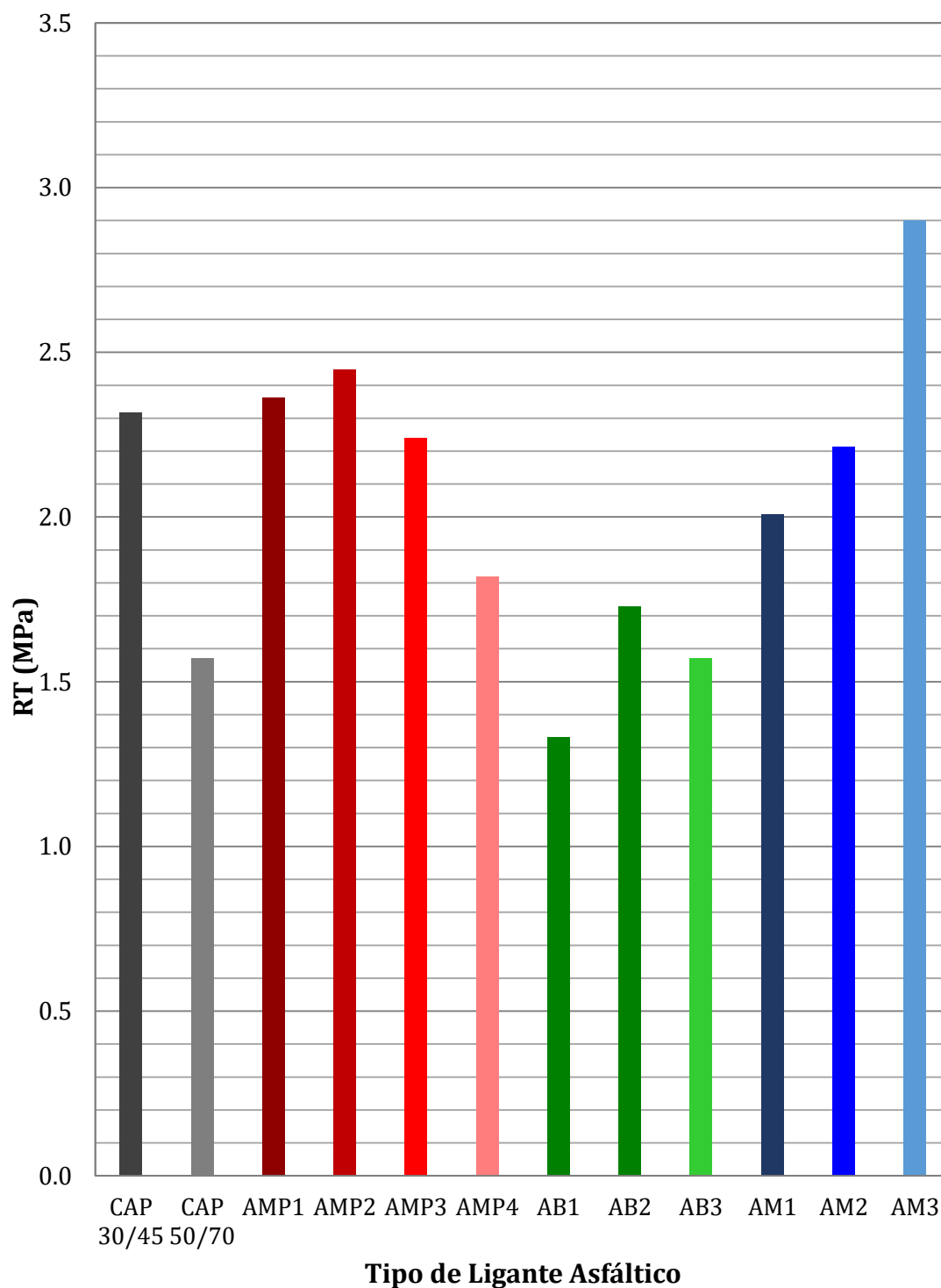


Figura 5.17. Resultados de RT nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

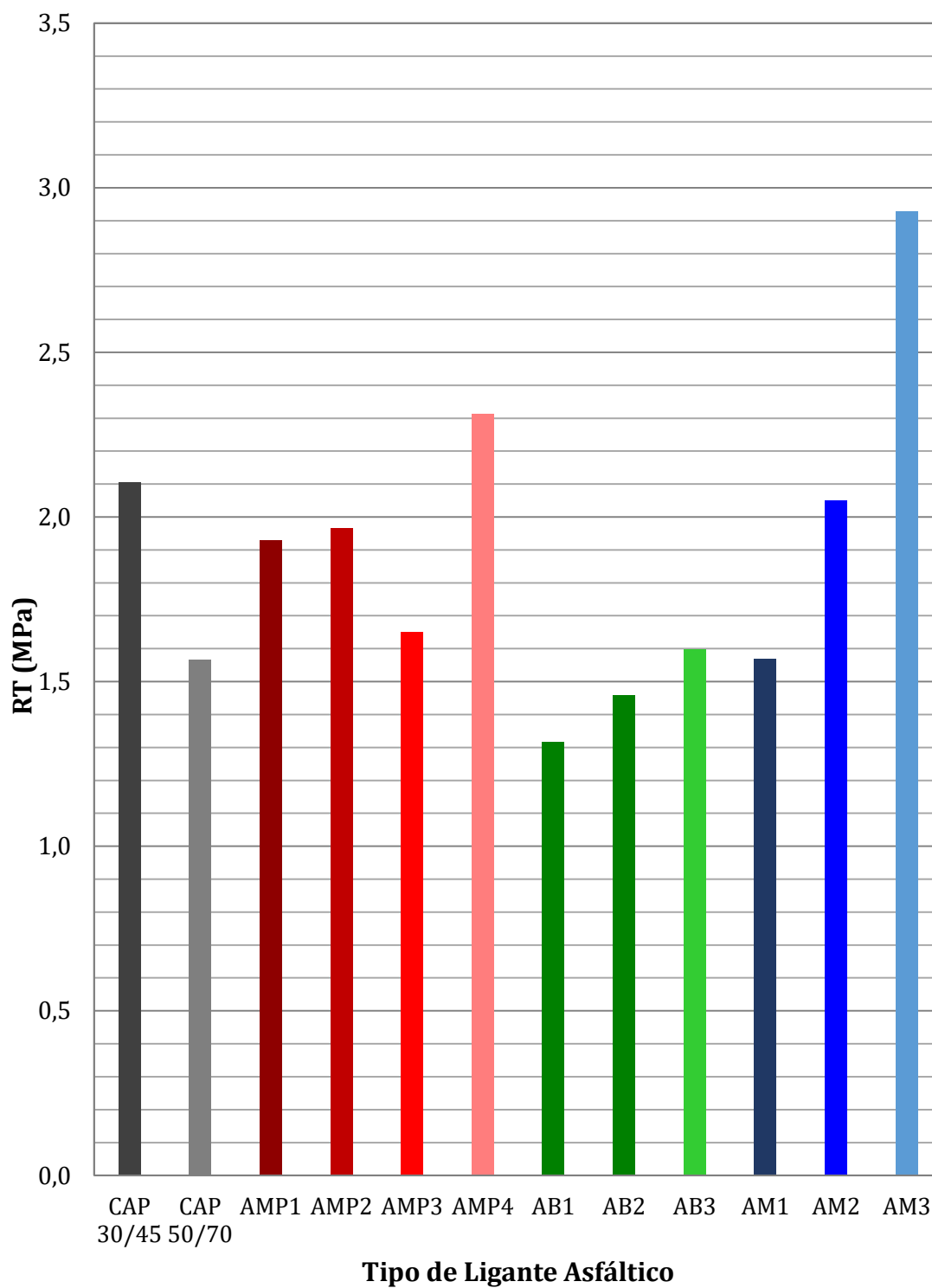


Figura 5.18. Resultados de RT nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo



#### 5.1.4. Faixa Granulométrica *Gap Graded*

Nas Tabelas 5.19 a 5.21 apresentam-se os resultados do parâmetro módulo de resiliência das misturas asfálticas com granulometria *Gap Graded* e com agregados graníticos de São Paulo e do Rio de Janeiro e com agregados basálticos de São Paulo. Já nas Tabelas 5.22 a 5.24 são apresentados os resultados de resistência à tração dessas misturas asfálticas.

Tabela 5.19: Resultados do ensaio de MR nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | MR @ 21,1°C (MPa) |               | MR @ 25,0°C (MPa) |               | MR @ 37,8°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 37                | Granito / SP       | Gap Graded           | CAP 30/45         | 6,824             | 603           | 5,273             | 174           | 1,905             | 104           |
| 38                | Granito / SP       | Gap Graded           | CAP 50/70         | 5,392             | 293           | 3,696             | 611           | 1,069             | 152           |
| 39                | Granito / SP       | Gap Graded           | AMP1              | 4,323             | 67            | 3,156             | 91            | 1,069             | 31            |
| 40                | Granito / SP       | Gap Graded           | AMP2              | 5,344             | 875           | 4,184             | 250           | 1,149             | 21            |
| 41                | Granito / SP       | Gap Graded           | AMP3              | 4,261             | 214           | 3,164             | 393           | 1,049             | 134           |
| 42                | Granito / SP       | Gap Graded           | AMP4              | 5,000             | 330           | 3,851             | 162           | 1,397             | 54            |
| 43                | Granito / SP       | Gap Graded           | AB1               | 5,272             | 535           | 3,864             | 112           | 1,611             | 142           |
| 44                | Granito / SP       | Gap Graded           | AB2               | 5,151             | 231           | 3,579             | 156           | 2,331             | 189           |
| 45                | Granito / SP       | Gap Graded           | AB3               | 5,029             | 488           | 3,921             | 112           | 1,647             | 50            |
| 46                | Granito / SP       | Gap Graded           | AM1               | 7,915             | 196           | 5,428             | 617           | 1,510             | 48            |
| 47                | Granito / SP       | Gap Graded           | AM2               | 8,401             | 222           | 6,013             | 643           | 2,063             | 296           |
| 48                | Granito / SP       | Gap Graded           | AM3               | 8,069             | 130           | 5,332             | 51            | 2,879             | 133           |

Tabela 5.20: Resultados do ensaio de MR nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | MR @ 21,1°C (MPa) |               | MR @ 25,0°C (MPa) |               | MR @ 37,8°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 85                | Granito / RJ       | Gap Graded           | CAP 30/45         | 9,371             | 1,518         | 7,515             | 231           | 3,601             | 464           |
| 86                | Granito / RJ       | Gap Graded           | CAP 50/70         | 7,374             | 506           | 5,381             | 49            | 2,145             | 128           |
| 87                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AMP1              | 7,073             | 590           | 4,861             | 349           | 2,254             | 360           |
| 88                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AMP2              | 8,586             | 1,006         | 6,250             | 737           | 2,484             | 404           |
| 89                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AMP3              | 8,891             | 640           | 7,512             | 785           | 3,396             | 262           |
| 90                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AMP4              | 9,775             | 1,023         | 7,768             | 698           | 2,853             | 637           |
| 91                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AB1               | 4,579             | 1,042         | 3,388             | 115           | 1,317             | 116           |
| 92                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AB2               | 6,299             | 428           | 5,264             | 980           | 2,119             | 183           |
| 93                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AB3               | 5,459             | 978           | 4,321             | 236           | 2,393             | 414           |
| 94                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AM1               | 8,922             | 1,446         | 8,077             | 451           | 3,140             | 297           |
| 95                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AM2               | 10,089            | 1,194         | 7,450             | 335           | 3,866             | 259           |
| 96                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AM3               | 11,605            | 1,667         | 9,506             | 377           | 4,484             | 245           |

Tabela 5.21: Resultados do ensaio de MR nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | MR @ 21,1°C (MPa) |               | MR @ 25,0°C (MPa) |               | MR @ 37,8°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 133               | Basalto / SP       | Gap Graded           | CAP 30/45         | 3,783             | 2,932         | 4,540             | 73            | 1,118             | 131           |
| 134               | Basalto / SP       | Gap Graded           | CAP 50/70         | 4,717             | 333           | 3,469             | 343           | 791               | 62            |
| 135               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AMP1              | 5,945             | 1,318         | 4,547             | 610           | 1,865             | 114           |
| 136               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AMP2              | 4,155             | 565           | 3,256             | 192           | 1,055             | 174           |
| 137               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AMP3              | 6,668             | 12            | 4,907             | 208           | 1,333             | 187           |
| 138               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AMP4              | 4,535             | 426           | 3,036             | 166           | 1,069             | 14            |
| 139               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AB1               | 3,213             | 152           | 2,271             | 62            | 692               | 98            |
| 140               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AB2               | 3,867             | 96            | 2,872             | 86            | 1,119             | 173           |
| 141               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AB3               | 4,521             | 41            | 3,474             | 110           | 1,545             | 248           |
| 142               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AM1               | 7,829             | 555           | 5,719             | 457           | 2,600             | 487           |
| 143               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AM2               | 5,513             | 930           | 4,204             | 791           | 957               | 211           |
| 144               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AM3               | 5,766             | 1,582         | 4,524             | 1,179         | 1,460             | 704           |

Tabela 5.22: Resultados do ensaio de RT nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | RT @ 25,0°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 37                | Granito / SP       | Gap Graded           | CAP 30/45         | 1,70              | 0,05          |
| 38                | Granito / SP       | Gap Graded           | CAP 50/70         | 1,19              | 0,08          |
| 39                | Granito / SP       | Gap Graded           | AMP1              | 1,57              | 0,10          |
| 40                | Granito / SP       | Gap Graded           | AMP2              | 1,68              | 0,07          |
| 41                | Granito / SP       | Gap Graded           | AMP3              | 1,66              | 0,09          |
| 42                | Granito / SP       | Gap Graded           | AMP4              | 1,86              | 0,04          |
| 43                | Granito / SP       | Gap Graded           | AB1               | 1,62              | 0,05          |
| 44                | Granito / SP       | Gap Graded           | AB2               | 1,73              | 0,02          |
| 45                | Granito / SP       | Gap Graded           | AB3               | 1,98              | 0,06          |
| 46                | Granito / SP       | Gap Graded           | AM1               | 2,53              | 0,05          |
| 47                | Granito / SP       | Gap Graded           | AM2               | 1,92              | 0,05          |
| 48                | Granito / SP       | Gap Graded           | AM3               | 2,46              | 0,02          |

Tabela 5.23: Resultados do ensaio de RT nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | RT @ 25,0°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 85                | Granito / RJ       | Gap Graded           | CAP 30/45         | 2.19              | 0.04          |
| 86                | Granito / RJ       | Gap Graded           | CAP 50/70         | 1.77              | 0.19          |
| 87                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AMP1              | 2.04              | 0.26          |
| 88                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AMP2              | 2.27              | 0.05          |
| 89                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AMP3              | 2.26              | 0.12          |
| 90                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AMP4              | 2.18              | 0.04          |
| 91                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AB1               | 1.52              | 0.09          |
| 92                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AB2               | 1.69              | 0.16          |
| 93                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AB3               | 1.94              | 0.06          |
| 94                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AM1               | 2.33              | 0.26          |
| 95                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AM2               | 2.09              | 0.11          |
| 96                | Granito / RJ       | Gap Graded           | AM3               | 2.64              | 0.11          |

Tabela 5.24: Resultados do ensaio de RT nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Fonte de Agregados | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | RT @ 25,0°C (MPa) |               |
|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|
|                   |                    |                      |                   | Valor Médio       | Desvio Padrão |
| 133               | Basalto / SP       | Gap Graded           | CAP 30/45         | 1,61              | 0,03          |
| 134               | Basalto / SP       | Gap Graded           | CAP 50/70         | 1,25              | 0,10          |
| 135               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AMP1              | 1,71              | 0,02          |
| 136               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AMP2              | 1,60              | 0,03          |
| 137               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AMP3              | 1,78              | 0,10          |
| 138               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AMP4              | 1,88              | 0,09          |
| 139               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AB1               | 1,20              | 0,10          |
| 140               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AB2               | 1,29              | 0,07          |
| 141               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AB3               | 1,38              | 0,05          |
| 142               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AM1               | 1,70              | 0,03          |
| 143               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AM2               | 1,68              | 0,15          |
| 144               | Basalto / SP       | Gap Graded           | AM3               | 1,98              | 0,26          |

Na Figura 5.19 são apresentados os resultados de MR das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado de São Paulo em função da temperatura. A construção dessa figura foi realizada conforme detalhado anteriormente. As Figuras 5.20 e 5.21 apresentam os resultados de MR das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado de Rio de Janeiro e com agregados basálticos do Estado de São Paulo, respectivamente.

Com relação aos resultados de resistência à tração, nas Figuras 5.22, 5.23 e 5.24 são apresentados esses valores para as misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados estudados nesta pesquisa.

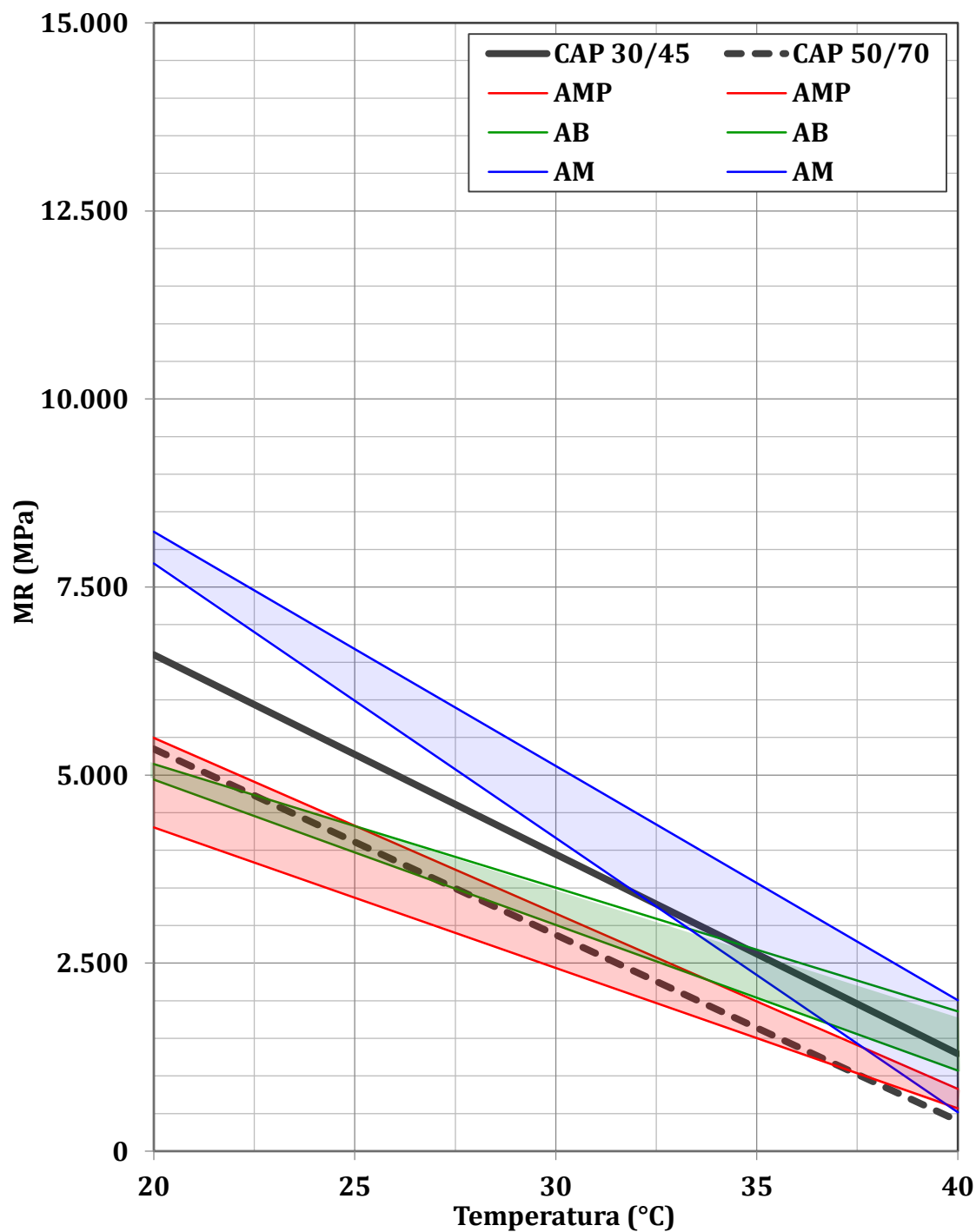


Figura 5.19. Resultados de MR nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado de São Paulo, em função da temperatura de ensaio

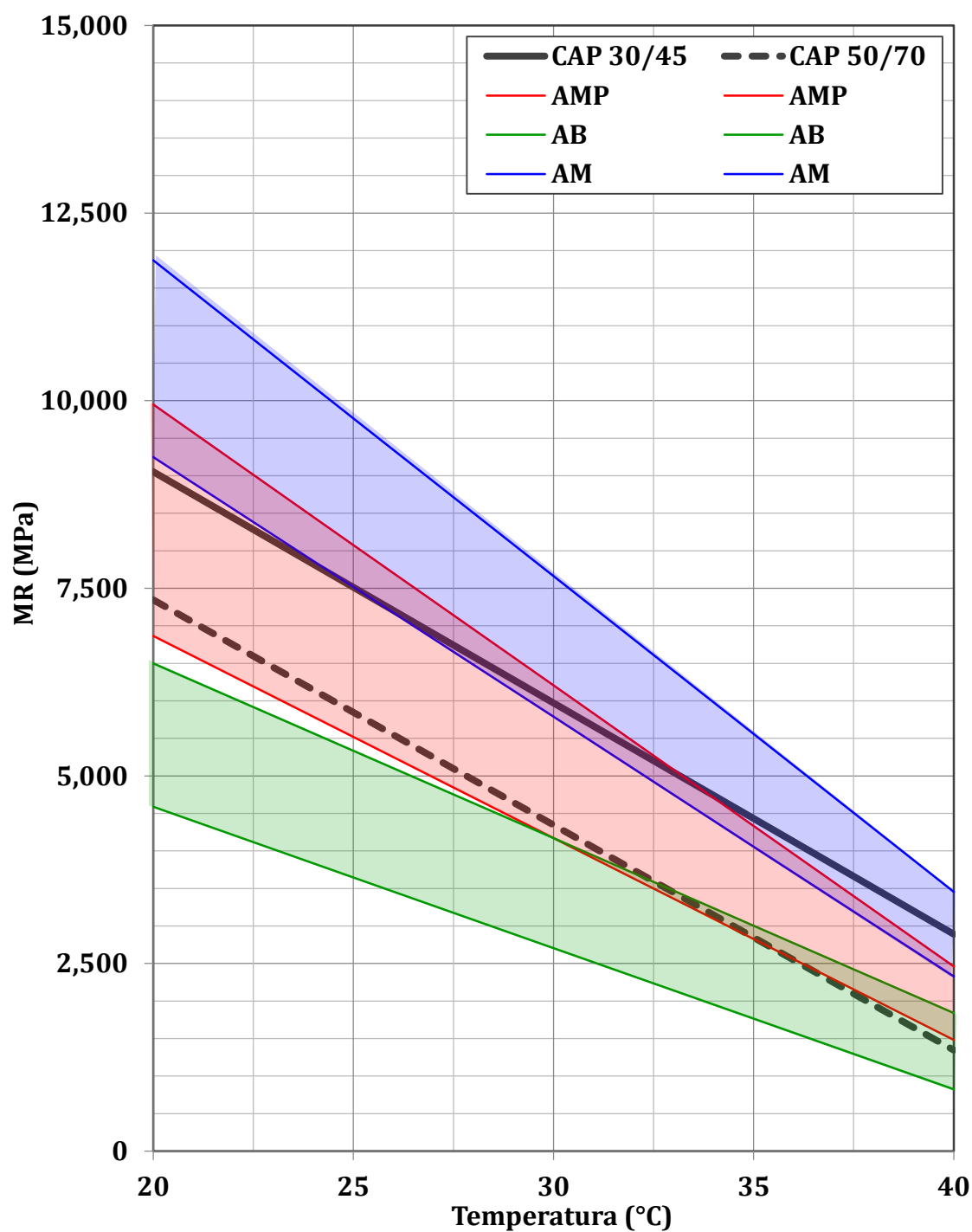


Figura 5.20. Resultados de MR nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro, em função da temperatura de ensaio

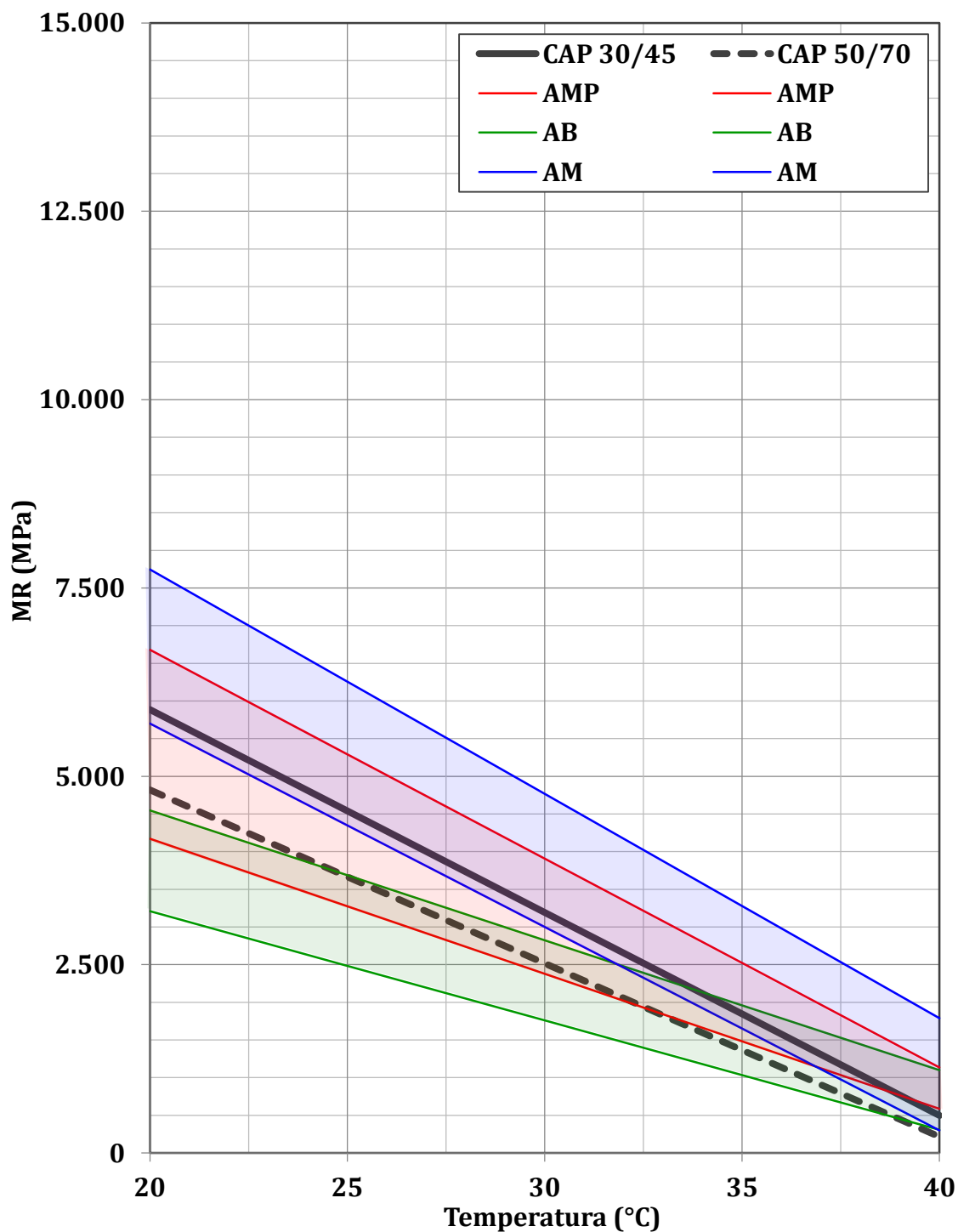


Figura 5.21. Resultados de MR nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos do Estado de São Paulo, em função da temperatura de ensaio

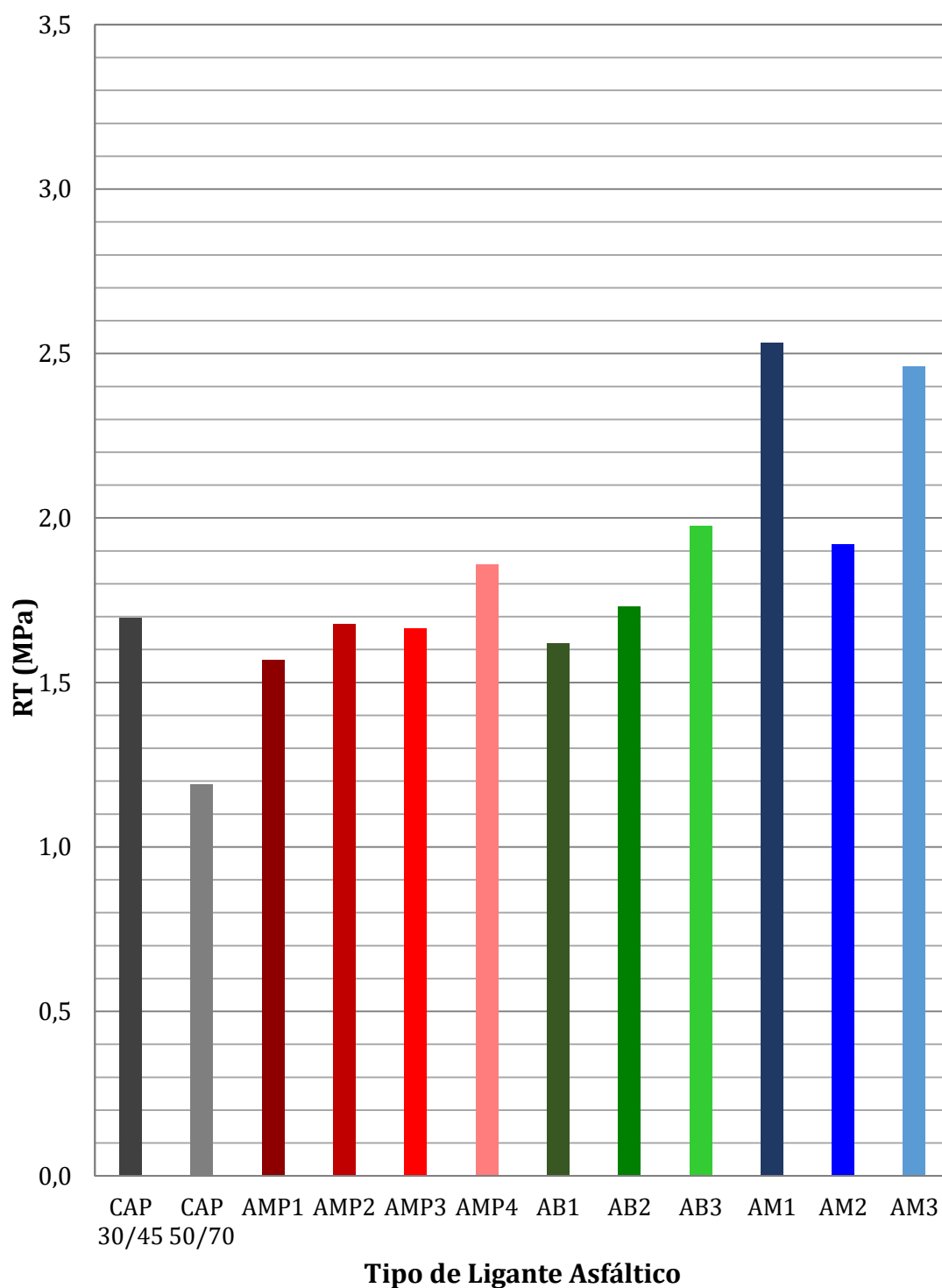


Figura 5.22: Resultados de RT nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado de São Paulo



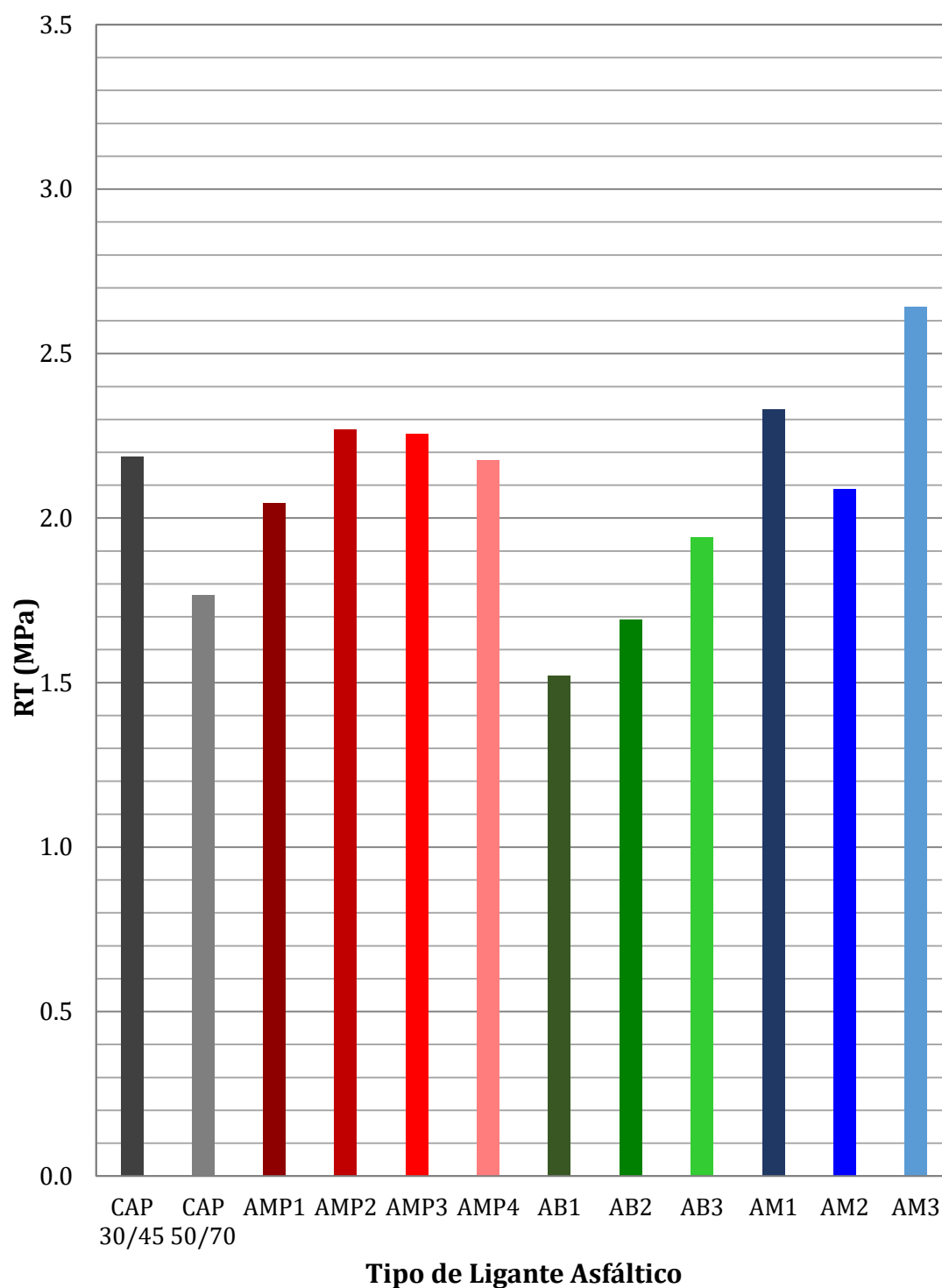


Figura 5.23: Resultados de RT nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

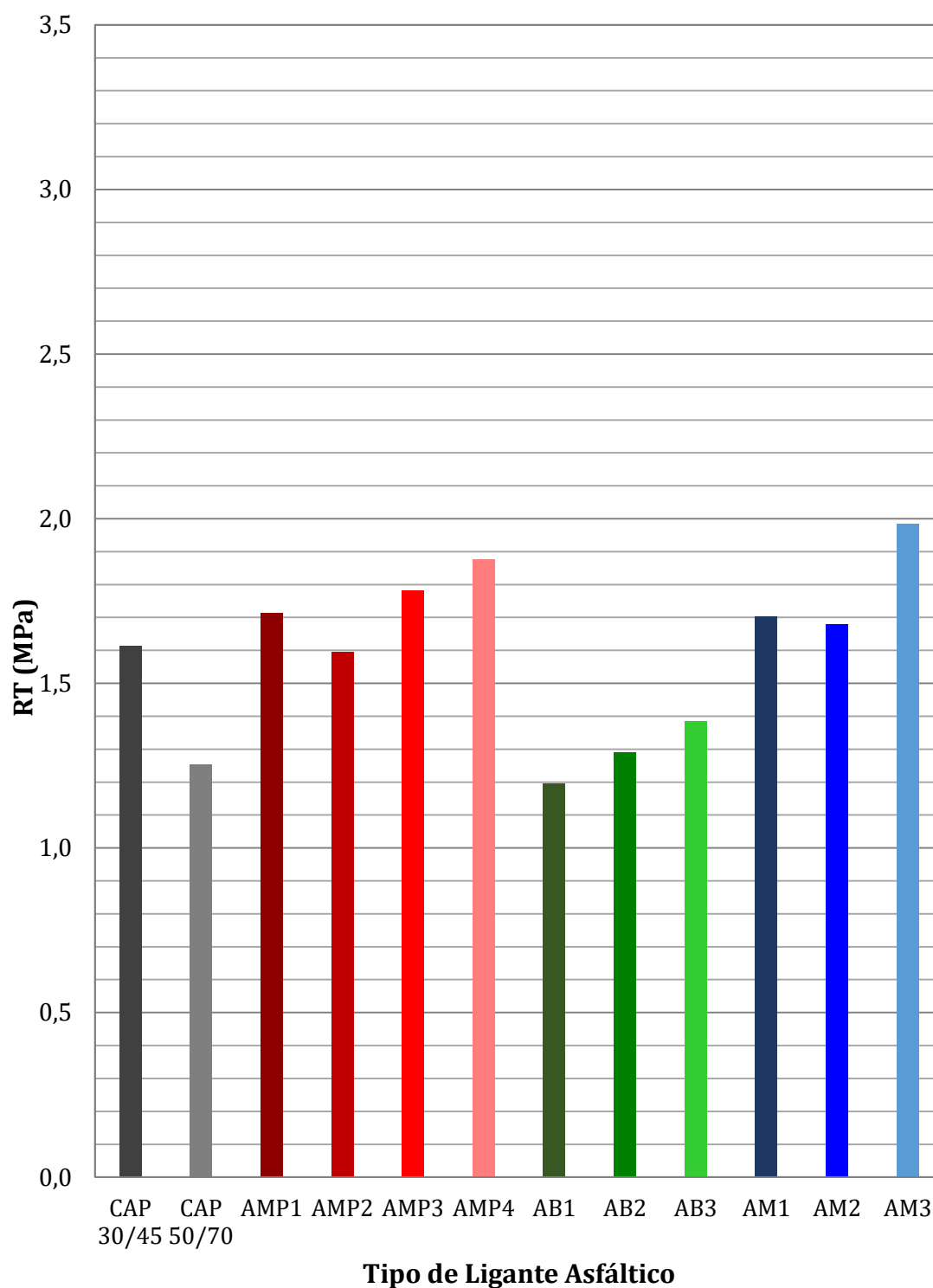


Figura 5.24. Resultados de RT nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos do Estado de São Paulo

## 5.2. RESULTADOS DE MÓDULO DINÂMICO

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios de módulo dinâmico ( $E^*$ ), nas mesmas misturas asfálticas apresentadas no item 5.1.

### 5.2.1. Faixa Granulométrica Faixa III-DERSA

A Tabela 5.25 apresenta os resultados de  $E^*$  na frequência reduzida das misturas asfálticas com granulometria Faixa III-DERSA, agregados graníticos do Estado de São Paulo e com os doze tipos de ligantes asfálticos utilizados neste estudo. Esses dados foram utilizados para construir as curvas mestres apresentadas na Figura 5.25.

Para facilitar a visualização das curvas mestre das misturas asfálticas são também apresentadas as Figuras 5.26 e 5.27. Na Figura 5.26a apresentam-se as curvas mestre das misturas com os ligantes asfálticos convencionais, CAP 30/45 e CAP50/70. Essas curvas foram mantidas nas demais figuras como referência comparativa. Na Figura 5.26b, por exemplo, foram incluídas as curvas mestre das misturas asfálticas com os ligantes asfálticos modificados por polímero. Já nas Figuras 5.27a e 5.27b, apresentam-se as curvas das misturas com ligantes asfálticos modificados por borracha de pneu e asfaltos de alto módulo, respectivamente.

Na Tabela 5.26 apresentam-se os resultados de módulo dinâmico na frequência reduzida das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro e as respectivas curvas mestres são mostradas na Figura 5.28 a 5.30.

Na Tabela 5.27 apresentam-se os resultados de módulo dinâmico na frequência reduzida das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos do Estado de São Paulo e as respectivas curvas mestres são mostradas na Figura 5.31 a 5.33.

Tabela 5.25: Resultados de Módulo Dinâmico ( $E^*$ ) e frequência reduzida para construção das curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| Mistura<br>Asfáltica           | 1              | 2              | 3              | 4              | 5              | 6              | 7              | 8              | 9              | 10             | 11             | 12             |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ligante<br>Asfáltico           | CAP<br>30/45   | CAP<br>50/70   | AMP1           | AMP2           | AMP3           | AMP4           | AB1            | AB2            | AB3            | AM1            | AM2            | AM3            |
| Frequência<br>Reduzida<br>(Hz) | $E^*$<br>(MPa) | $E^*$<br>(MPa) | $E^*$<br>(MPa) | $E^*$<br>(MPa) | $E^*$<br>(MPa) | $E^*$<br>(MPa) | $E^*$<br>(MPa) | $E^*$<br>(MPa) | $E^*$<br>(MPa) | $E^*$<br>(MPa) | $E^*$<br>(MPa) | $E^*$<br>(MPa) |
| 3,92E+05                       | 21.528         | 20.988         | 19.976         | 20.033         | 21.182         | 20.836         | 18.908         | 19.220         | 18.976         | 21.147         | 20.925         | 18.419         |
| 1,57E+05                       | 21.344         | 20.690         | 19.511         | 19.606         | 20.964         | 20.527         | 18.366         | 18.725         | 18.437         | 20.930         | 20.695         | 17.869         |
| 7,84E+04                       | 21.169         | 20.412         | 19.102         | 19.226         | 20.757         | 20.243         | 17.898         | 18.293         | 17.965         | 20.726         | 20.481         | 17.409         |
| 1,57E+04                       | 20.604         | 19.543         | 17.937         | 18.126         | 20.097         | 19.381         | 16.596         | 17.067         | 16.636         | 20.071         | 19.814         | 16.185         |
| 7,84E+03                       | 20.273         | 19.050         | 17.332         | 17.546         | 19.715         | 18.905         | 15.936         | 16.436         | 15.955         | 19.691         | 19.434         | 15.591         |
| 1,57E+03                       | 19.228         | 17.565         | 15.667         | 15.922         | 18.527         | 17.502         | 14.174         | 14.719         | 14.118         | 18.510         | 18.277         | 14.061         |
| 3,42E+03                       | 19.788         | 18.349         | 16.519         | 16.758         | 19.160         | 18.236         | 15.067         | 15.594         | 15.051         | 19.139         | 18.890         | 14.827         |
| 1,37E+03                       | 19.119         | 17.414         | 15.509         | 15.766         | 18.404         | 17.362         | 14.009         | 14.557         | 13.945         | 18.387         | 18.159         | 13.923         |
| 6,84E+02                       | 18.504         | 16.586         | 14.666         | 14.930         | 17.719         | 16.597         | 13.147         | 13.700         | 13.040         | 17.705         | 17.503         | 13.200         |
| 1,37E+02                       | 16.656         | 14.244         | 12.478         | 12.730         | 15.705         | 14.472         | 10.979         | 11.511         | 10.762         | 15.698         | 15.601         | 11.423         |
| 6,84E+01                       | 15.661         | 13.068         | 11.457         | 11.691         | 14.650         | 13.415         | 10.001         | 10.509         | 9.737          | 14.646         | 14.612         | 10.632         |
| 1,37E+01                       | 12.903         | 10.069         | 9.006          | 9.175          | 11.825         | 10.721         | 7.731          | 8.155          | 7.385          | 11.826         | 11.965         | 8.791          |
| 2,50E+01                       | 14.005         | 11.223         | 9.929          | 10.125         | 12.937         | 11.760         | 8.573          | 9.033          | 8.253          | 12.936         | 13.008         | 9.477          |
| 1,00E+01                       | 12.304         | 9.465          | 8.530          | 8.684          | 11.230         | 10.175         | 7.303          | 7.707          | 6.947          | 11.232         | 11.406         | 8.439          |
| 5,00E+00                       | 10.929         | 8.139          | 7.496          | 7.615          | 9.890          | 8.964          | 6.385          | 6.743          | 6.015          | 9.892          | 10.137         | 7.675          |
| 1,00E+00                       | 7.663          | 5.300          | 5.287          | 5.333          | 6.844          | 6.286          | 4.479          | 4.733          | 4.125          | 6.846          | 7.191          | 6.020          |
| 5,00E-01                       | 6.334          | 4.262          | 4.456          | 4.478          | 5.658          | 5.257          | 3.780          | 3.994          | 3.451          | 5.659          | 6.009          | 5.374          |
| 1,00E-01                       | 3.727          | 2.411          | 2.873          | 2.864          | 3.409          | 3.298          | 2.470          | 2.610          | 2.224          | 3.410          | 3.685          | 4.062          |
| 3,10E-01                       | 5.479          | 3.629          | 3.934          | 3.944          | 4.910          | 4.610          | 3.346          | 3.534          | 3.038          | 4.911          | 5.250          | 4.956          |
| 1,24E-01                       | 4.028          | 2.613          | 3.056          | 3.049          | 3.664          | 3.523          | 2.620          | 2.769          | 2.362          | 3.665          | 3.955          | 4.222          |
| 6,20E-02                       | 3.117          | 2.010          | 2.499          | 2.487          | 2.895          | 2.840          | 2.163          | 2.287          | 1.945          | 2.895          | 3.132          | 3.726          |
| 1,24E-02                       | 1.625          | 1.076          | 1.534          | 1.523          | 1.640          | 1.689          | 1.371          | 1.457          | 1.240          | 1.639          | 1.743          | 2.768          |
| 6,20E-03                       | 1.213          | 827            | 1.239          | 1.233          | 1.288          | 1.350          | 1.127          | 1.203          | 1.028          | 1.287          | 1.342          | 2.434          |
| 1,24E-03                       | 627            | 469            | 763            | 768            | 765            | 824            | 727            | 788            | 684            | 765            | 741            | 1.817          |
| 6,15E-03                       | 1.209          | 824            | 1.236          | 1.230          | 1.284          | 1.347          | 1.125          | 1.201          | 1.025          | 1.284          | 1.338          | 2.431          |
| 2,46E-03                       | 825            | 591            | 935            | 935            | 946            | 1.011          | 873            | 939            | 809            | 946            | 950            | 2.055          |
| 1,23E-03                       | 625            | 468            | 761            | 767            | 763            | 822            | 725            | 786            | 683            | 763            | 739            | 1.814          |
| 2,46E-04                       | 349            | 292            | 487            | 502            | 496            | 535            | 487            | 540            | 481            | 496            | 434            | 1.377          |
| 1,23E-04                       | 282            | 247            | 409            | 427            | 425            | 456            | 417            | 467            | 421            | 426            | 354            | 1.233          |
| 2,46E-05                       | 187            | 180            | 285            | 308            | 320            | 334            | 303            | 350            | 324            | 320            | 239            | 973            |

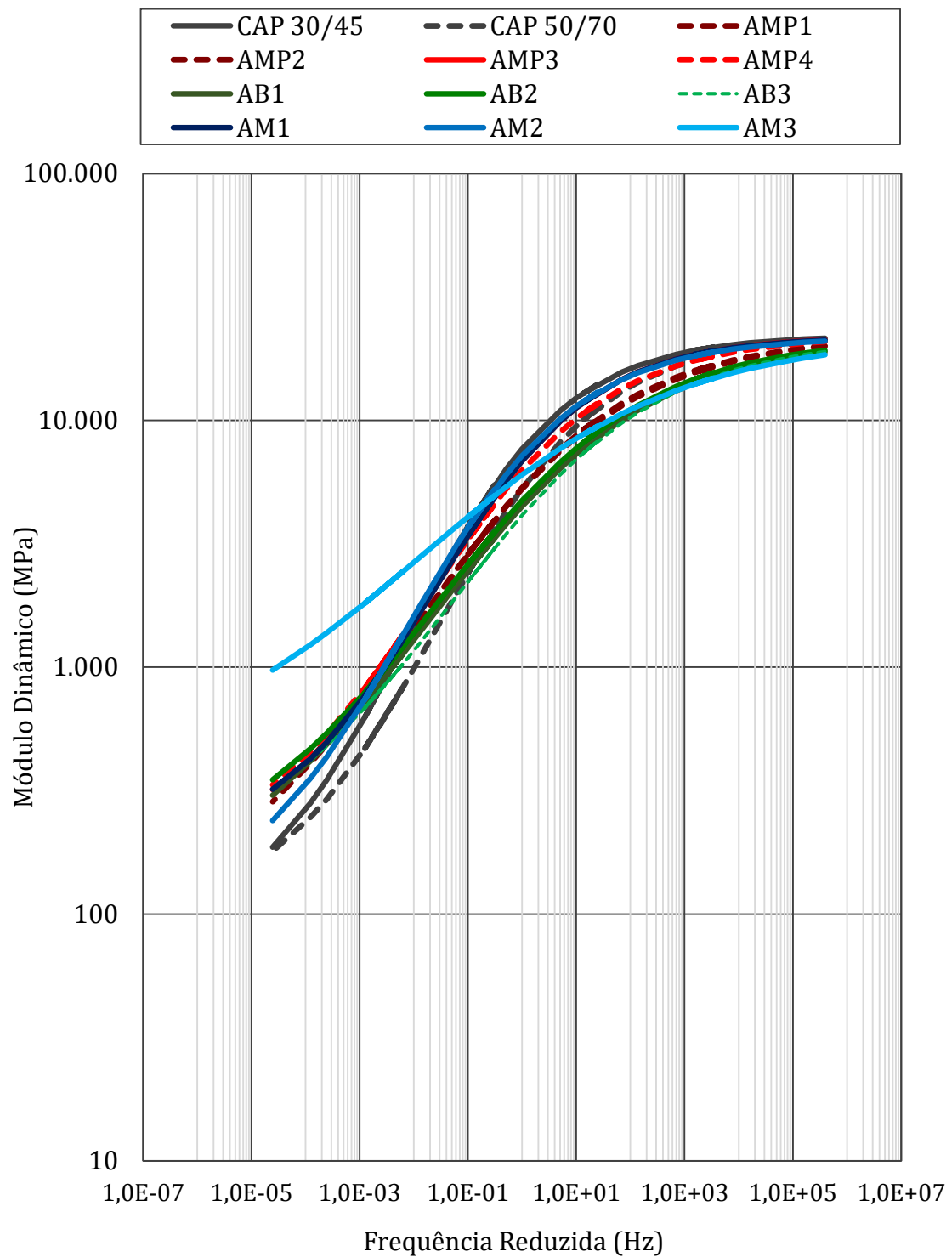


Figura 5.25: Curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo e os ligantes asfálticos estudados

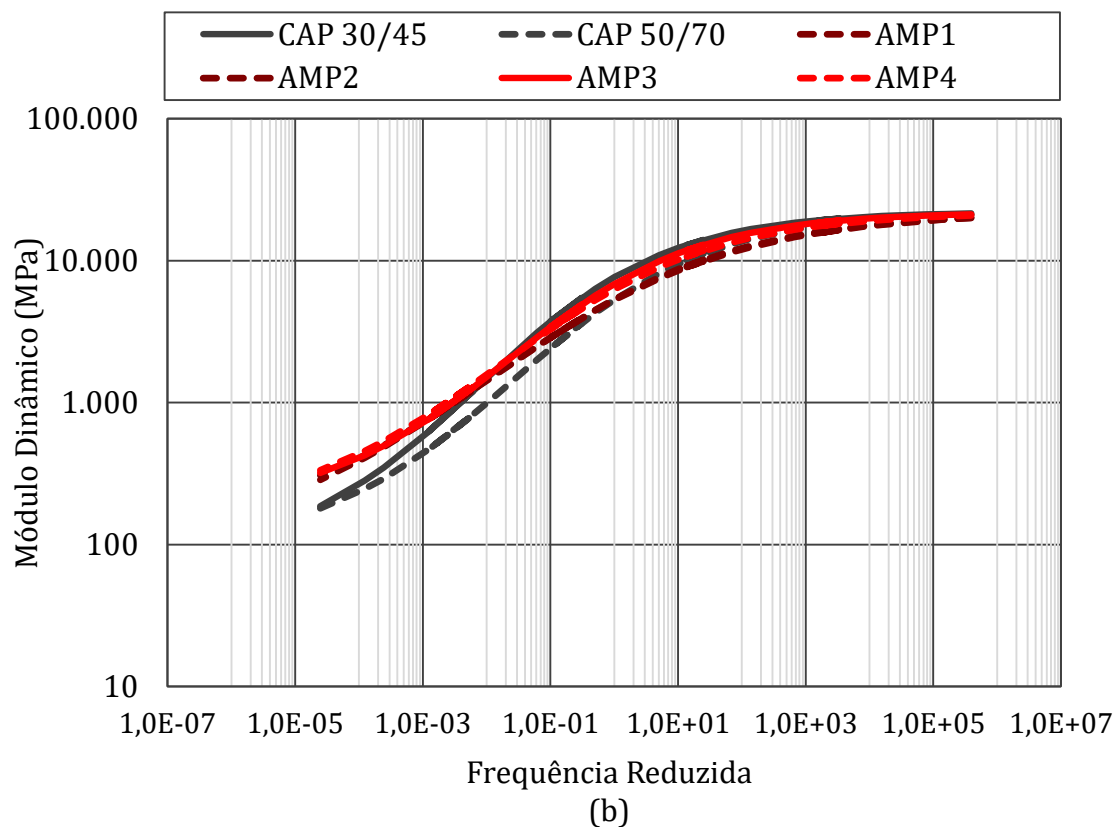
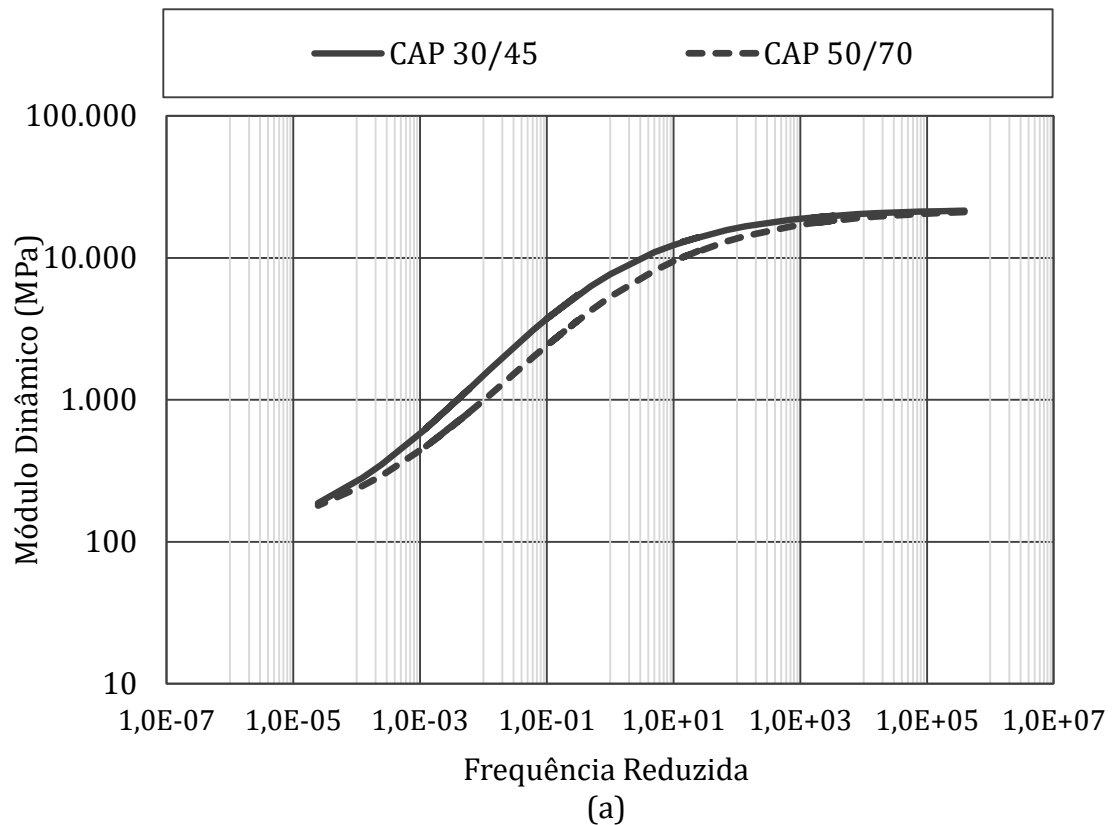


Figura 5.26: Curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos (SP)

(a) Com CAP 30/45 e CAP 50/70; (b) Com ligantes asfálticos modificados por polímero

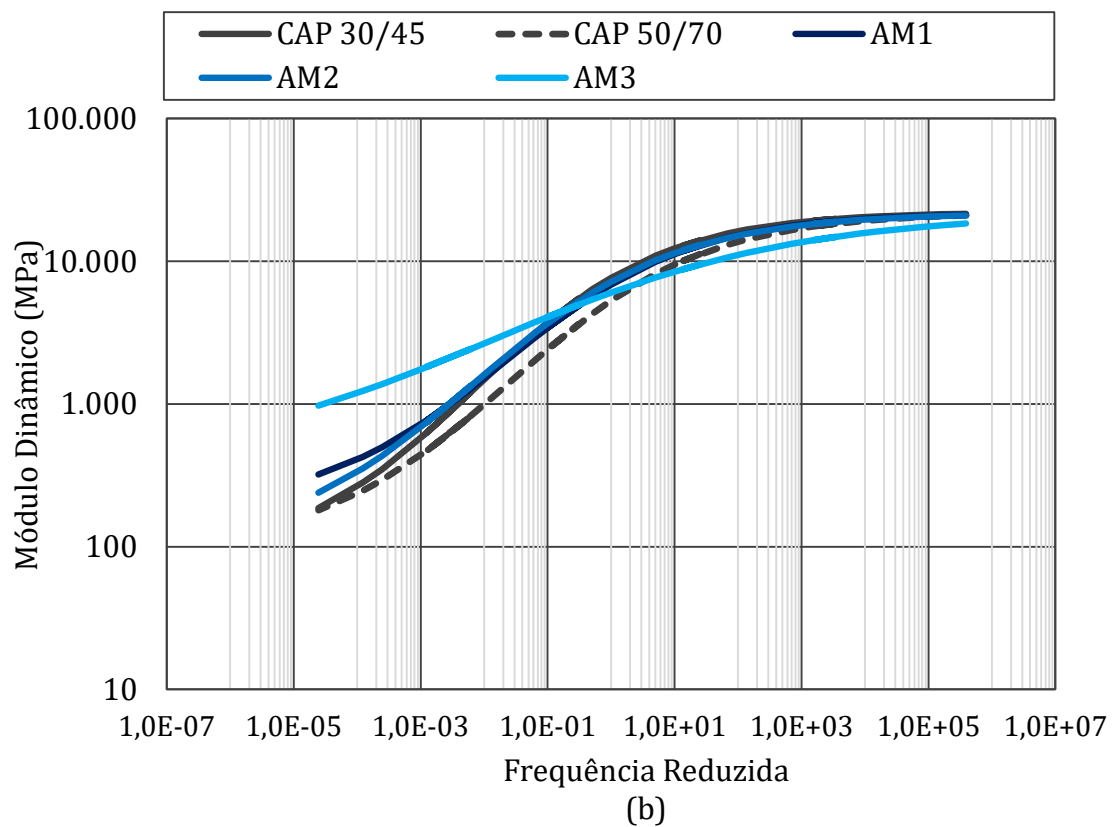
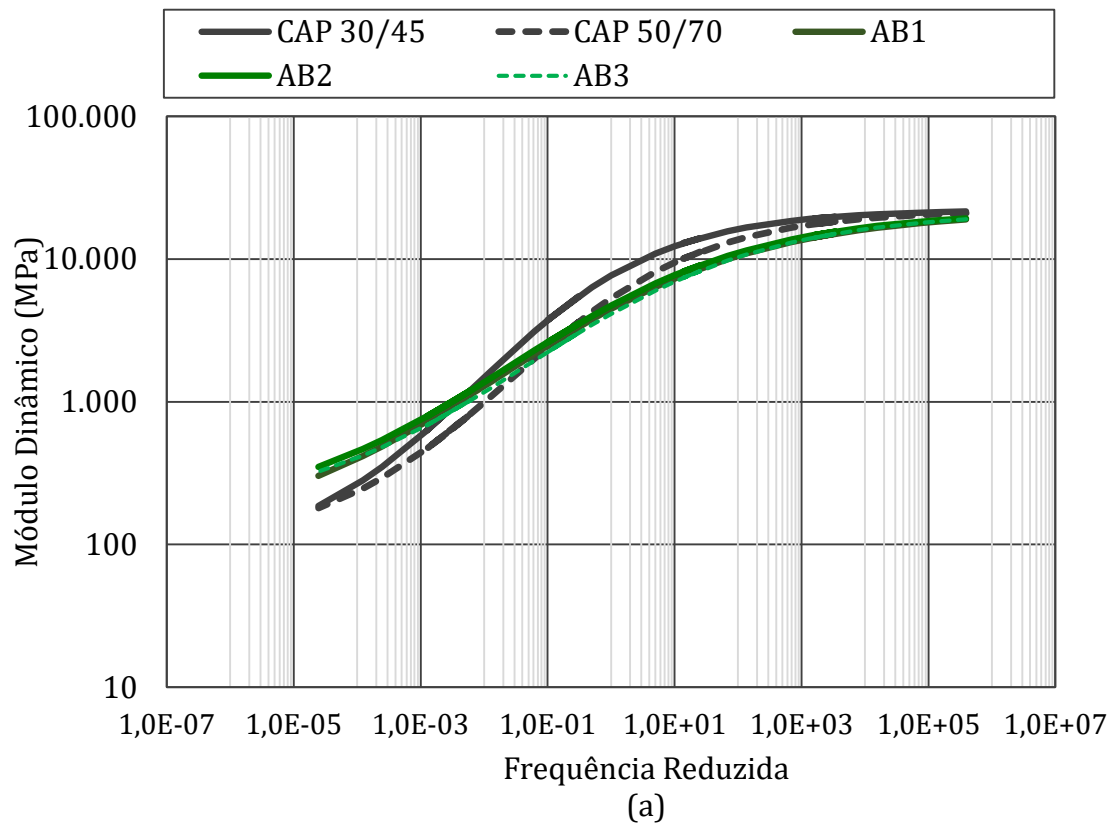


Figura 5.27: Curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos (SP)

(a) Com ligante asfáltico modificado por borracha; (b) Com ligantes asfálticos de alto módulo

Tabela 5.26: Resultados de Módulo Dinâmico ( $E^*$ ) e frequência reduzida para construção das curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de Rio de Janeiro

| Mistura Asfáltica        | 49          | 50          | 51          | 52          | 53          | 54          | 55          | 56          | 57          | 58          | 59          | 60          |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ligante Asfáltico        | CAP 30/45   | CAP 50/70   | AMP1        | AMP2        | AMP3        | AMP4        | AB1         | AB2         | AB3         | AM1         | AM2         | AM3         |
| Frequência Reduzida (Hz) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) |
| 3,92E+05                 | 19.281      | 20.194      | 19.017      | 19.710      | 20.419      | 19.490      | 19.819      | 17.731      | 18.167      | 20.527      | 20.424      | 20.083      |
| 1,57E+05                 | 18.896      | 19.850      | 18.483      | 19.265      | 20.025      | 19.026      | 19.361      | 17.125      | 17.560      | 20.288      | 20.132      | 19.733      |
| 7,84E+04                 | 18.567      | 19.536      | 18.017      | 18.866      | 19.668      | 18.616      | 18.955      | 16.610      | 17.046      | 20.064      | 19.863      | 19.417      |
| 1,57E+04                 | 17.668      | 18.582      | 16.700      | 17.696      | 18.607      | 17.437      | 17.792      | 15.217      | 15.660      | 19.368      | 19.042      | 18.478      |
| 7,84E+03                 | 17.216      | 18.056      | 16.024      | 17.074      | 18.034      | 16.822      | 17.184      | 14.531      | 14.978      | 18.973      | 18.586      | 17.970      |
| 1,57E+03                 | 15.997      | 16.512      | 14.194      | 15.323      | 16.389      | 15.123      | 15.507      | 12.747      | 13.211      | 17.777      | 17.235      | 16.510      |
| 3,42E+03                 | 16.617      | 17.319      | 15.125      | 16.226      | 17.242      | 15.994      | 16.366      | 13.642      | 14.098      | 18.409      | 17.944      | 17.269      |
| 1,37E+03                 | 15.882      | 16.358      | 14.022      | 15.154      | 16.227      | 14.961      | 15.347      | 12.584      | 13.050      | 17.655      | 17.100      | 16.366      |
| 6,84E+02                 | 15.271      | 15.523      | 13.117      | 14.250      | 15.359      | 14.101      | 14.497      | 11.736      | 12.211      | 16.982      | 16.359      | 15.590      |
| 1,37E+02                 | 13.670      | 13.222      | 10.827      | 11.878      | 13.023      | 11.876      | 12.296      | 9.662       | 10.158      | 15.052      | 14.287      | 13.481      |
| 6,84E+01                 | 12.903      | 12.092      | 9.791       | 10.768      | 11.901      | 10.845      | 11.275      | 8.749       | 9.253       | 14.062      | 13.251      | 12.454      |
| 1,37E+01                 | 10.968      | 9.266       | 7.398       | 8.127       | 9.156       | 8.403       | 8.847       | 6.677       | 7.187       | 11.457      | 10.595      | 9.885       |
| 2,50E+01                 | 11.717      | 10.346      | 8.283       | 9.115       | 10.196      | 9.317       | 9.757       | 7.439       | 7.949       | 12.476      | 11.622      | 10.869      |
| 1,00E+01                 | 10.571      | 8.704       | 6.950       | 7.622       | 8.619       | 7.936       | 8.381       | 6.292       | 6.802       | 10.915      | 10.055      | 9.371       |
| 5,00E+00                 | 9.673       | 7.474       | 5.995       | 6.538       | 7.450       | 6.929       | 7.373       | 5.473       | 5.978       | 9.698       | 8.853       | 8.238       |
| 1,00E+00                 | 7.541       | 4.855       | 4.049       | 4.311       | 4.982       | 4.825       | 5.250       | 3.797       | 4.270       | 6.933       | 6.190       | 5.757       |
| 5,00E-01                 | 6.632       | 3.896       | 3.355       | 3.517       | 4.078       | 4.054       | 4.464       | 3.189       | 3.641       | 5.845       | 5.166       | 4.810       |
| 1,00E-01                 | 4.636       | 2.175       | 2.093       | 2.097       | 2.430       | 2.620       | 2.980       | 2.056       | 2.445       | 3.736       | 3.217       | 3.005       |
| 3,10E-01                 | 6.018       | 3.310       | 2.929       | 3.034       | 3.522       | 3.576       | 3.972       | 2.812       | 3.247       | 5.153       | 4.521       | 4.214       |
| 1,24E-01                 | 4.889       | 2.364       | 2.235       | 2.254       | 2.614       | 2.783       | 3.150       | 2.186       | 2.583       | 3.980       | 3.440       | 3.212       |
| 6,20E-02                 | 4.093       | 1.800       | 1.808       | 1.784       | 2.062       | 2.288       | 2.631       | 1.792       | 2.159       | 3.237       | 2.764       | 2.582       |
| 1,24E-02                 | 2.504       | 922         | 1.097       | 1.026       | 1.165       | 1.443       | 1.728       | 1.112       | 1.407       | 1.969       | 1.627       | 1.513       |
| 6,20E-03                 | 1.950       | 688         | 887         | 811         | 912         | 1.188       | 1.448       | 903         | 1.168       | 1.594       | 1.295       | 1.198       |
| 1,24E-03                 | 986         | 357         | 555         | 486         | 530         | 775         | 986         | 561         | 765         | 1.006       | 783         | 706         |
| 6,15E-03                 | 1.945       | 686         | 885         | 809         | 909         | 1.185       | 1.445       | 901         | 1.166       | 1.590       | 1.291       | 1.194       |
| 2,46E-03                 | 1.343       | 469         | 674         | 600         | 664         | 925         | 1.155       | 686         | 914         | 1.215       | 964         | 880         |
| 1,23E-03                 | 982         | 356         | 554         | 485         | 529         | 774         | 985         | 560         | 764         | 1.004       | 781         | 704         |
| 2,46E-04                 | 422         | 199         | 366         | 311         | 329         | 533         | 706         | 359         | 515         | 681         | 505         | 437         |
| 1,23E-04                 | 278         | 160         | 312         | 264         | 275         | 463         | 623         | 300         | 440         | 591         | 429         | 364         |
| 2,46E-05                 | 92          | 104         | 227         | 191         | 194         | 350         | 487         | 206         | 316         | 453         | 314         | 253         |



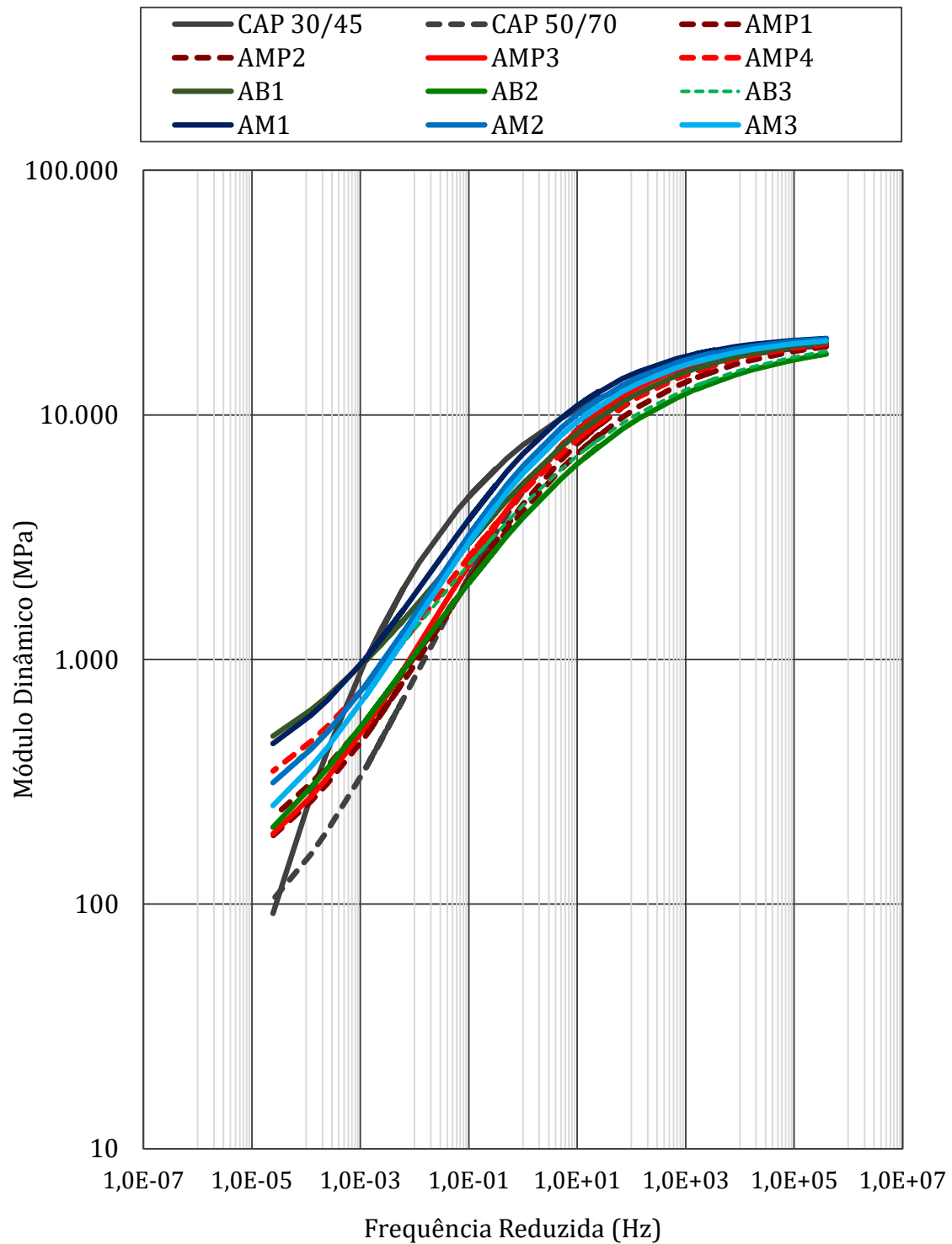


Figura 5.28: Curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de Rio de Janeiro e os ligantes asfálticos estudados

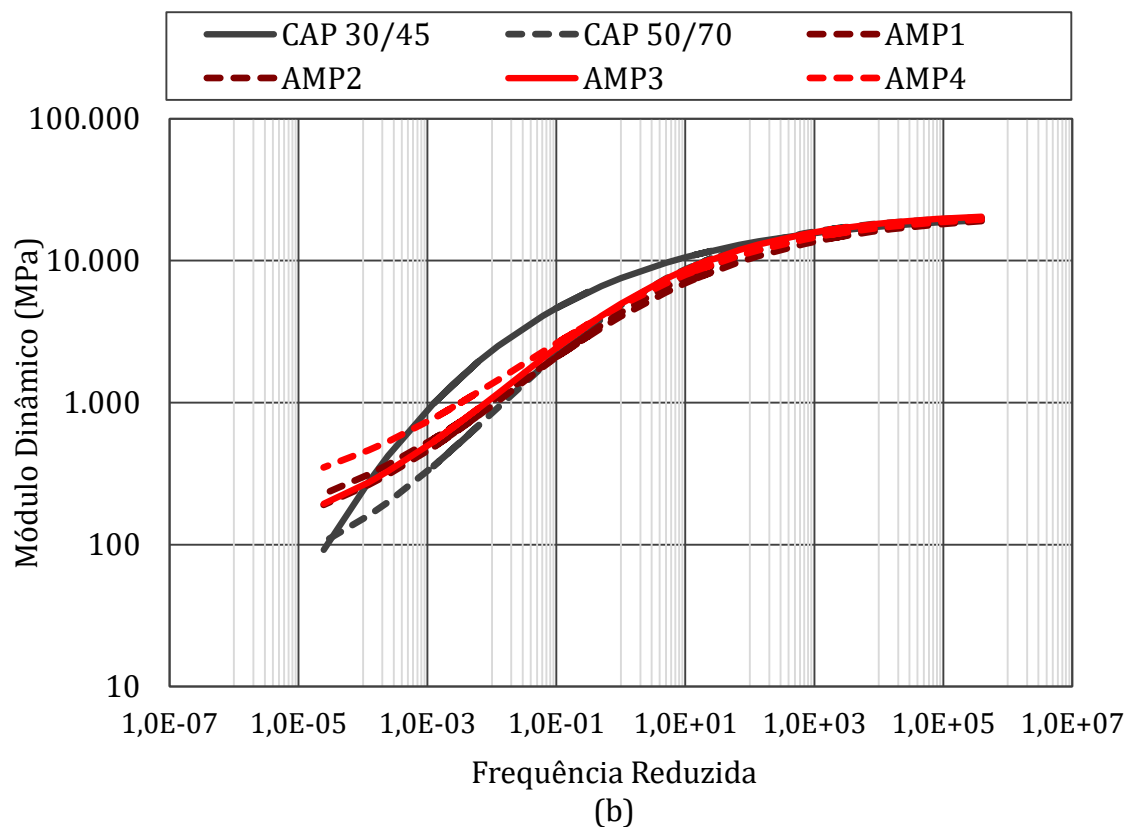
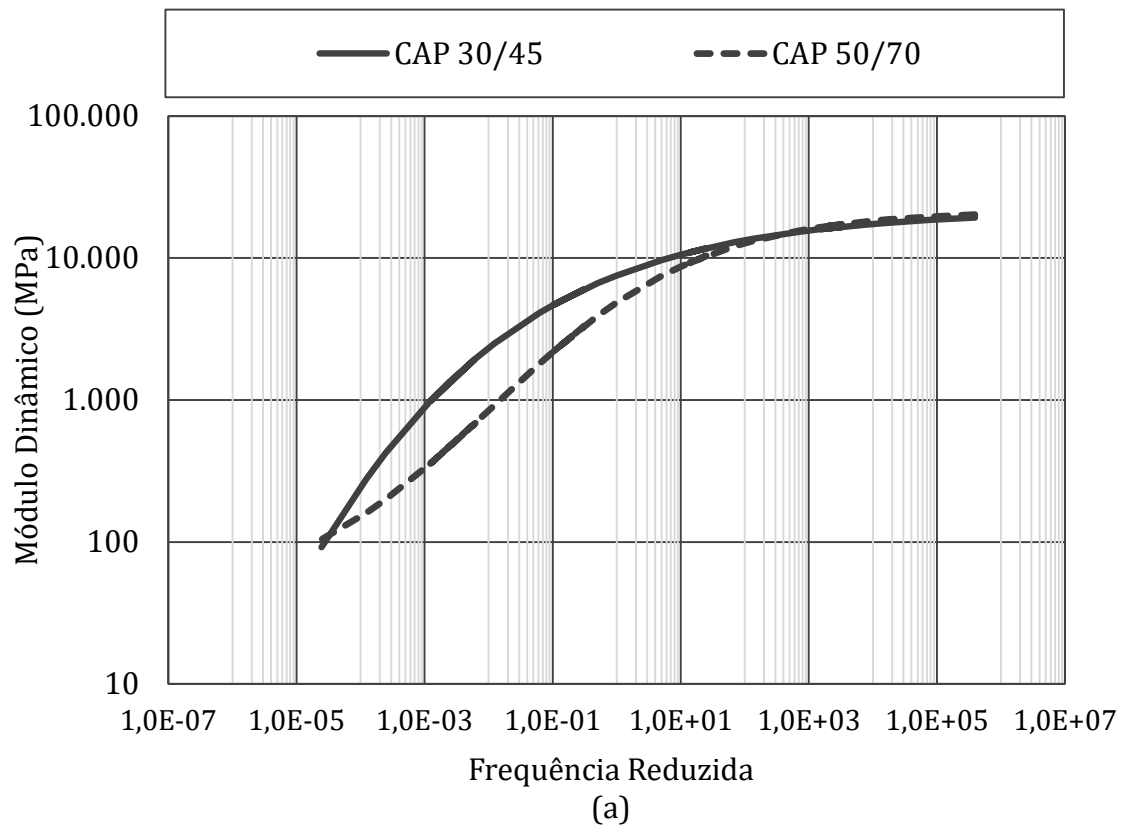


Figura 5.29: Curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos (RJ)

(a) Com CAP 30/45 e CAP 50/70; (b) Com ligantes asfálticos modificados por polímero

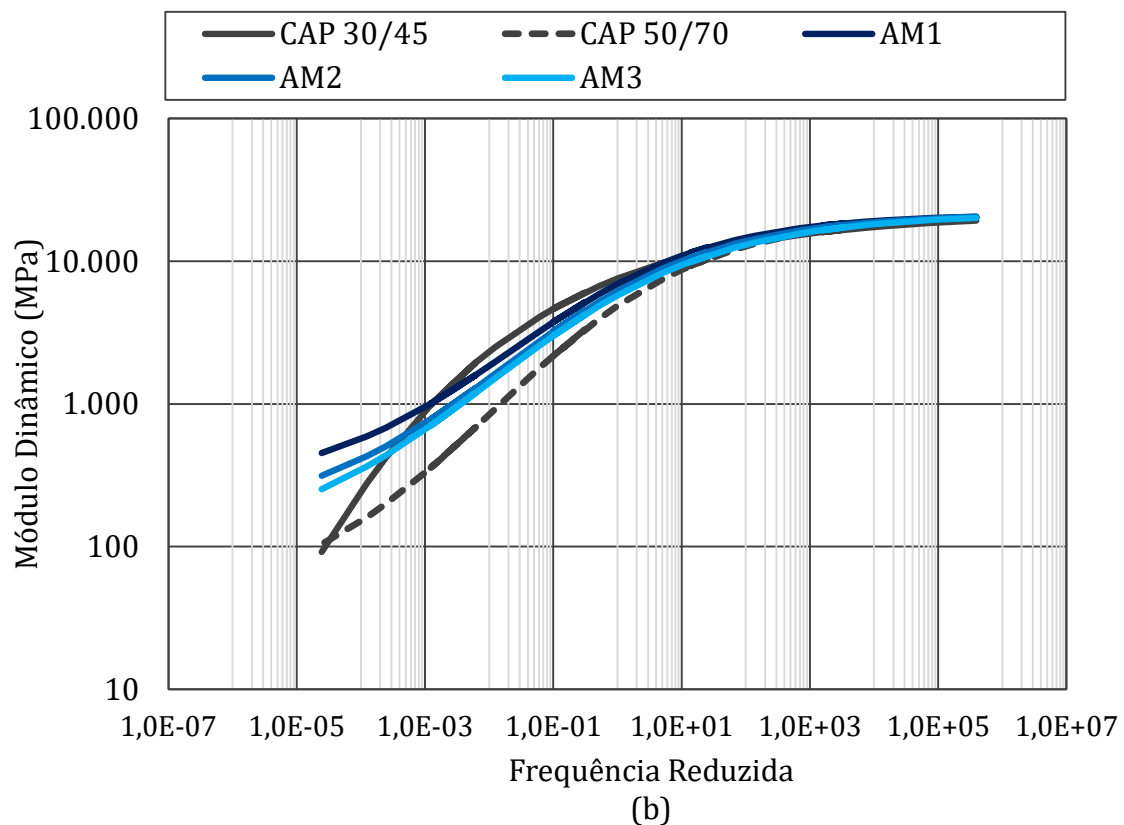
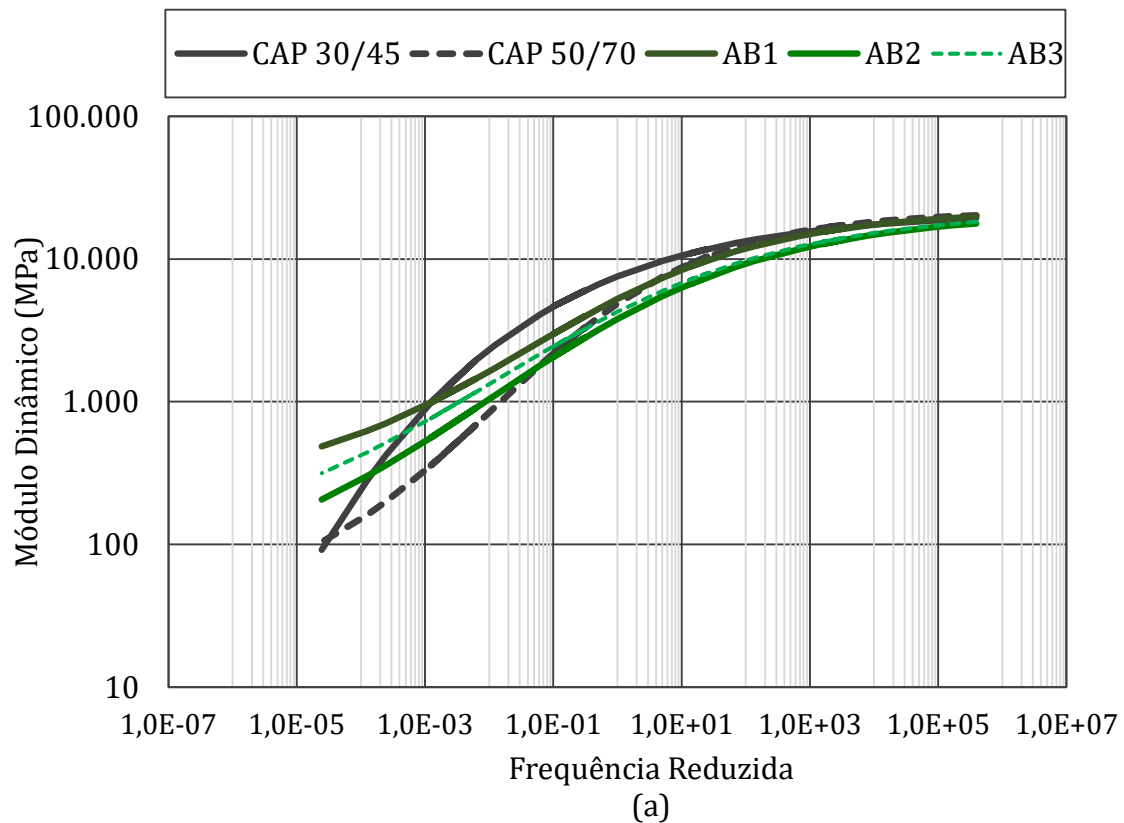


Figura 5.30: Curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos (RJ)

(a) Com ligante asfáltico modificado por borracha; (b) Com ligantes asfálticos de alto módulo

Tabela 5.27: Resultados de Módulo Dinâmico ( $E^*$ ) e frequência reduzida para construção das curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica        | 97          | 98          | 99          | 100         | 101         | 102         | 103         | 104         | 105         | 106         | 107         | 108         |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ligante Asfáltico        | CAP 30/45   | CAP 50/70   | AMP1        | AMP2        | AMP3        | AMP4        | AB1         | AB2         | AB3         | AM1         | AM2         | AM3         |
| Frequência Reduzida (Hz) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) |
| 3,92E+05                 | 20.422      | 20.464      | 20.093      | 20.661      | 20.557      | 20.786      | 20.353      | 19.746      | 19.140      | 20.833      | 20.501      | 20.817      |
| 1,57E+05                 | 20.283      | 20.318      | 19.888      | 20.536      | 20.363      | 20.587      | 20.230      | 19.512      | 18.794      | 20.722      | 20.411      | 20.741      |
| 7,84E+04                 | 20.149      | 20.174      | 19.694      | 20.412      | 20.178      | 20.399      | 20.108      | 19.291      | 18.474      | 20.612      | 20.321      | 20.665      |
| 1,57E+04                 | 19.705      | 19.680      | 19.072      | 19.989      | 19.578      | 19.800      | 19.692      | 18.595      | 17.497      | 20.243      | 20.010      | 20.398      |
| 7,84E+03                 | 19.438      | 19.375      | 18.709      | 19.727      | 19.225      | 19.454      | 19.435      | 18.195      | 16.955      | 20.016      | 19.815      | 20.229      |
| 1,57E+03                 | 18.575      | 18.357      | 17.579      | 18.850      | 18.114      | 18.375      | 18.574      | 16.970      | 15.366      | 19.262      | 19.149      | 19.644      |
| 3,42E+03                 | 19.041      | 18.912      | 18.182      | 19.328      | 18.709      | 18.950      | 19.044      | 17.620      | 16.196      | 19.672      | 19.515      | 19.966      |
| 1,37E+03                 | 18.482      | 18.246      | 17.461      | 18.754      | 17.997      | 18.263      | 18.480      | 16.844      | 15.208      | 19.180      | 19.075      | 19.579      |
| 6,84E+02                 | 17.959      | 17.613      | 16.805      | 18.207      | 17.345      | 17.639      | 17.942      | 16.147      | 14.352      | 18.711      | 18.649      | 19.200      |
| 1,37E+02                 | 16.336      | 15.618      | 14.873      | 16.468      | 15.396      | 15.792      | 16.235      | 14.131      | 12.027      | 17.217      | 17.252      | 17.939      |
| 6,84E+01                 | 15.438      | 14.506      | 13.858      | 15.490      | 14.359      | 14.815      | 15.274      | 13.092      | 10.910      | 16.368      | 16.436      | 17.193      |
| 1,37E+01                 | 12.869      | 11.365      | 11.138      | 12.677      | 11.537      | 12.158      | 12.508      | 10.355      | 8.203       | 13.877      | 13.966      | 14.896      |
| 2,50E+01                 | 13.909      | 12.625      | 12.208      | 13.814      | 12.654      | 13.211      | 13.627      | 11.424      | 9.221       | 14.895      | 14.987      | 15.853      |
| 1,00E+01                 | 12.298      | 10.683      | 10.566      | 12.054      | 10.936      | 11.590      | 11.895      | 9.788       | 7.681       | 13.311      | 13.392      | 14.355      |
| 5,00E+00                 | 10.971      | 9.130       | 9.278       | 10.616      | 9.576       | 10.296      | 10.481      | 8.522       | 6.562       | 11.982      | 12.030      | 13.058      |
| 1,00E+00                 | 7.742       | 5.622       | 6.362       | 7.226       | 6.465       | 7.273       | 7.144       | 5.713       | 4.283       | 8.675       | 8.565       | 9.688       |
| 5,00E-01                 | 6.402       | 4.316       | 5.235       | 5.884       | 5.254       | 6.059       | 5.821       | 4.653       | 3.484       | 7.274       | 7.080       | 8.206       |
| 1,00E-01                 | 3.750       | 2.071       | 3.118       | 3.378       | 2.991       | 3.686       | 3.348       | 2.720       | 2.092       | 4.449       | 4.101       | 5.133       |
| 3,10E-01                 | 5.536       | 3.528       | 4.527       | 5.041       | 4.495       | 5.281       | 4.990       | 3.997       | 3.005       | 6.359       | 6.110       | 7.221       |
| 1,24E-01                 | 4.057       | 2.304       | 3.356       | 3.656       | 3.244       | 3.961       | 3.623       | 2.933       | 2.243       | 4.780       | 4.446       | 5.498       |
| 6,20E-02                 | 3.128       | 1.624       | 2.639       | 2.824       | 2.485       | 3.128       | 2.801       | 2.297       | 1.792       | 3.775       | 3.403       | 4.385       |
| 1,24E-02                 | 1.616       | 693         | 1.482       | 1.536       | 1.292       | 1.741       | 1.527       | 1.304       | 1.081       | 2.104       | 1.733       | 2.516       |
| 6,20E-03                 | 1.204       | 483         | 1.161       | 1.198       | 974         | 1.346       | 1.191       | 1.037       | 882         | 1.635       | 1.291       | 1.988       |
| 1,24E-03                 | 624         | 228         | 689         | 722         | 527         | 760         | 719         | 651         | 582         | 952         | 685         | 1.218       |
| 6,15E-03                 | 1.200       | 481         | 1.158       | 1.194       | 971         | 1.342       | 1.188       | 1.034       | 880         | 1.630       | 1.287       | 1.983       |
| 2,46E-03                 | 819         | 308         | 852         | 883         | 678         | 963         | 879         | 783         | 688         | 1.186       | 886         | 1.482       |
| 1,23E-03                 | 622         | 227         | 688         | 720         | 526         | 758         | 718         | 649         | 581         | 950         | 683         | 1.216       |
| 2,46E-04                 | 355         | 127         | 449         | 493         | 315         | 463         | 492         | 455         | 419         | 615         | 412         | 836         |
| 1,23E-04                 | 290         | 105         | 386         | 435         | 262         | 386         | 434         | 404         | 373         | 529         | 347         | 738         |
| 2,46E-05                 | 199         | 74          | 292         | 351         | 187         | 274         | 351         | 327         | 303         | 405         | 256         | 597         |

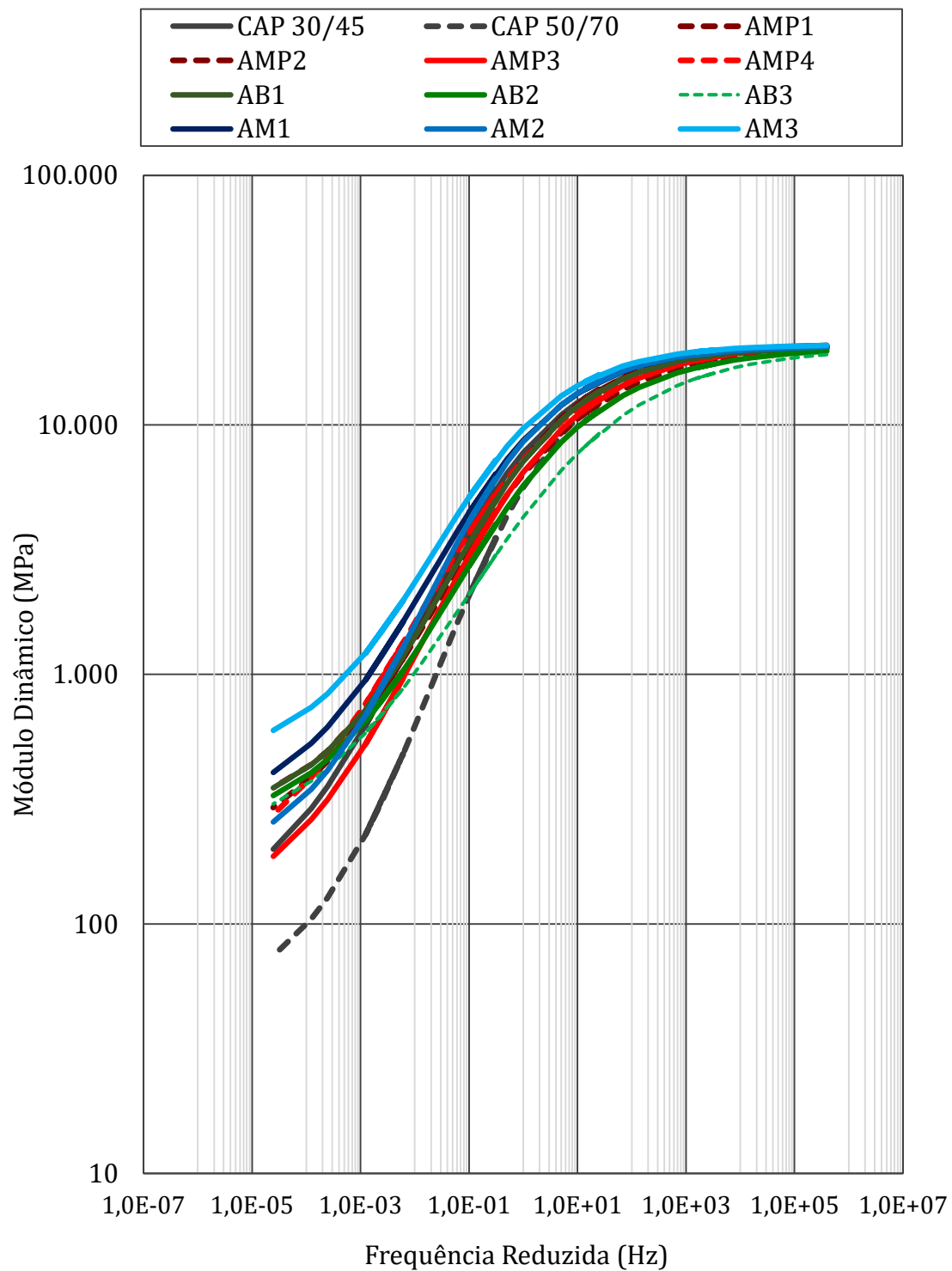


Figura 5.31: Curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos do Estado de São Paulo e os ligantes asfálticos estudados

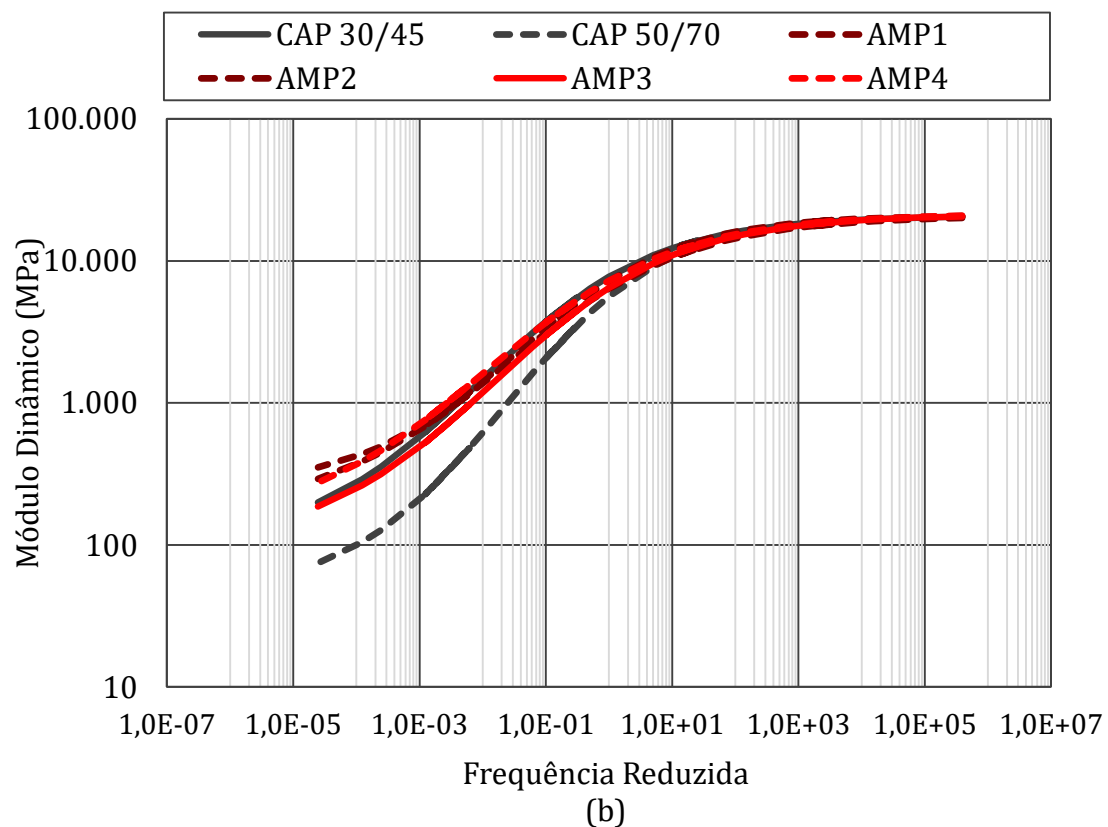
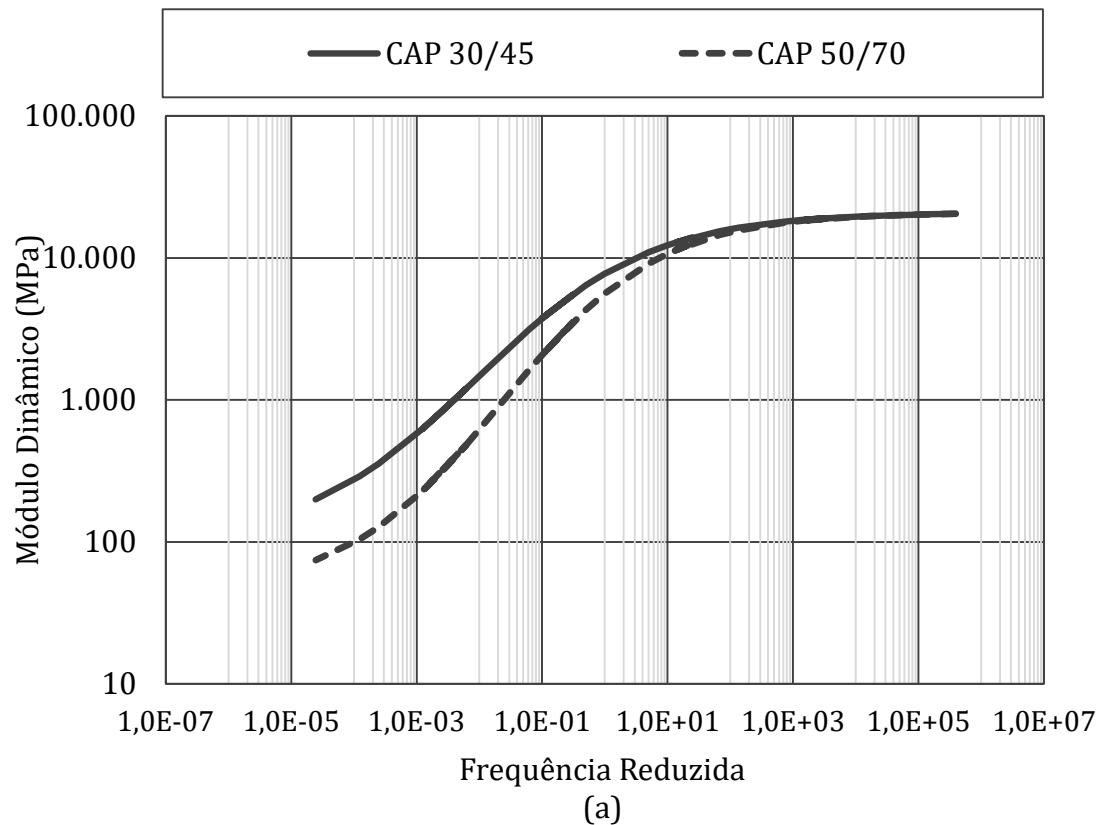


Figura 5.32: Curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos (SP)

(a) Com CAP 30/45 e CAP 50/70; (b) Com ligantes asfálticos modificados por polímero

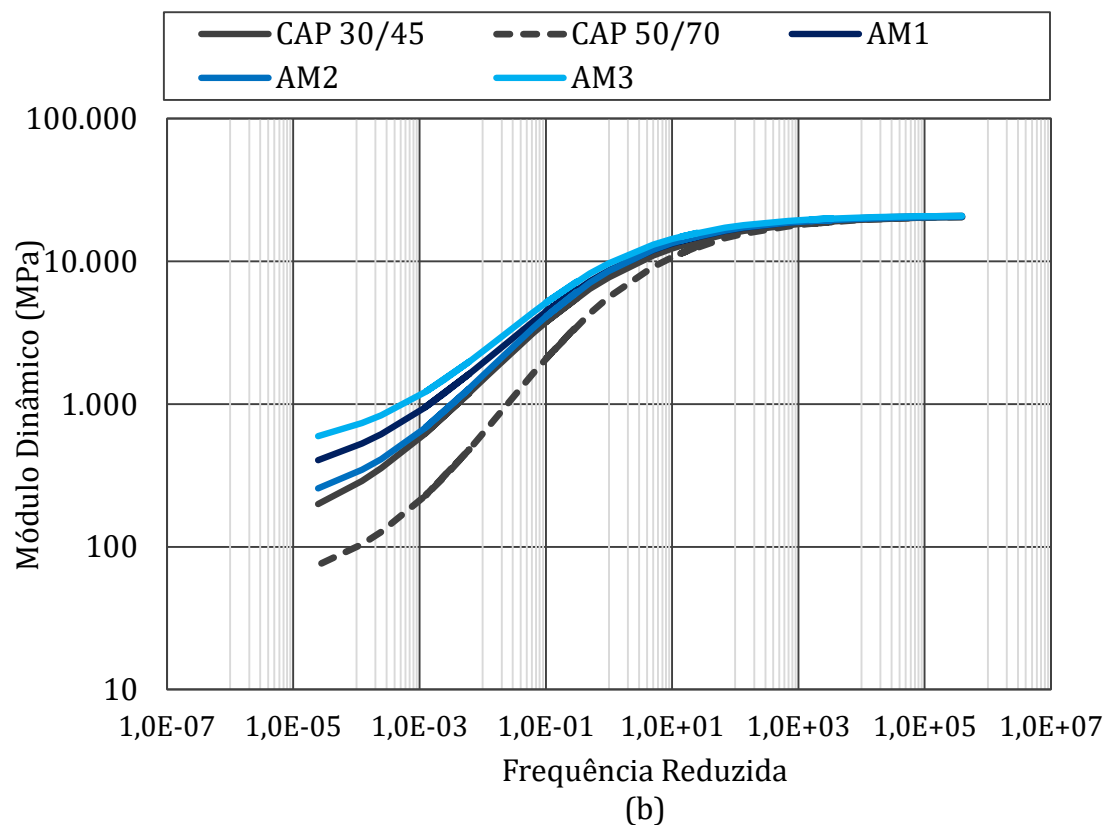
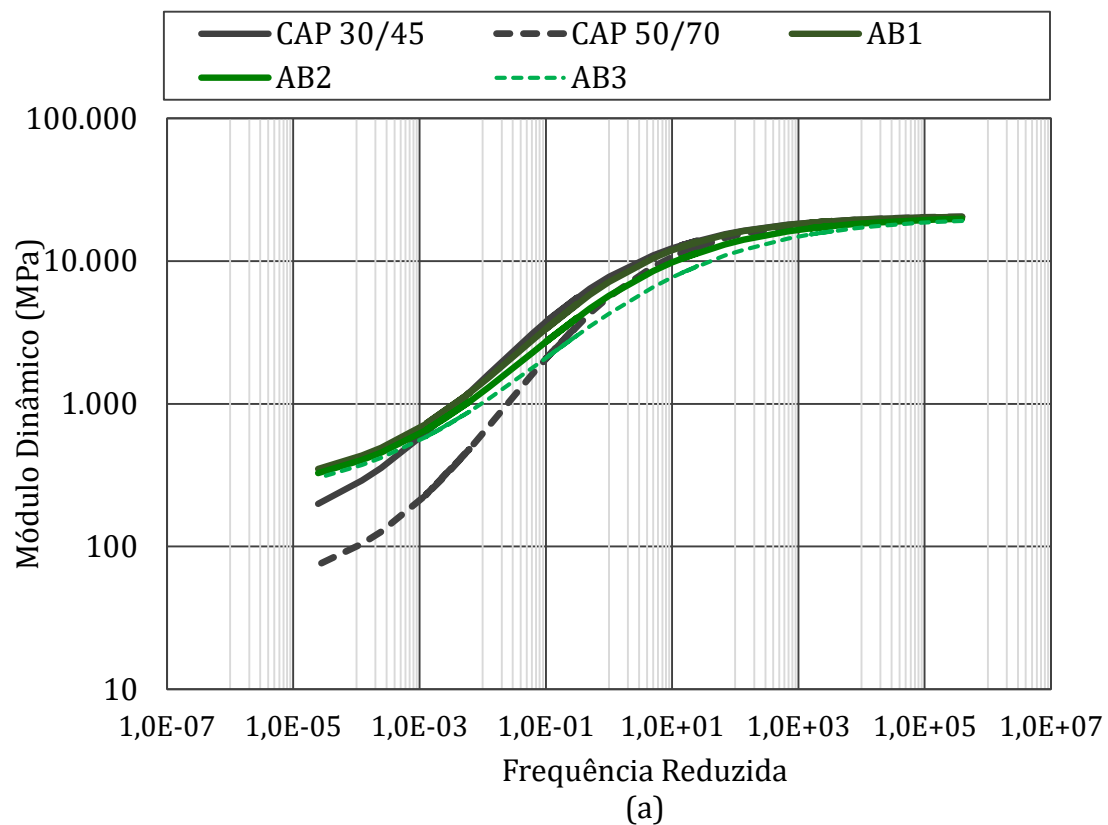


Figura 5.33: Curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos (SP)

(a) Com ligante asfáltico modificado por borracha; (b) Com ligantes asfálticos de alto módulo

### 5.2.2. Faixa Granulométrica EGL 19,0mm

A Tabela 5.28 apresenta os resultados de  $E^*$  na frequência reduzida das misturas asfálticas com granulometria EGL 19,0mm, agregados graníticos do Estado de São Paulo e com os doze tipos de ligantes asfálticos utilizados neste estudo. Esses dados foram utilizados para construir as curvas mestres apresentadas nas Figuras 5.34 a 5.36.

Na Tabela 5.29 apresentam-se os resultados de módulo dinâmico na frequência reduzida das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro e as respectivas curvas mestres são mostradas na Figura 5.37 a 5.39.

Na Tabela 5.30 apresentam-se os resultados de módulo dinâmico na frequência reduzida das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo e as respectivas curvas mestres são mostradas na Figura 5.40 a 5.42.



Tabela 5.28: Resultados de Módulo Dinâmico ( $E^*$ ) e frequência reduzida para construção das curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica        | 13          | 14          | 15          | 16          | 17          | 18          | 19          | 20          | 21          | 22          | 23          | 24          |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ligante Asfáltico        | CAP 30/45   | CAP 50/70   | AMP1        | AMP2        | AMP3        | AMP4        | AB1         | AB2         | AB3         | AM1         | AM2         | AM3         |
| Frequência Reduzida (Hz) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) |
| 3,92E+05                 | 21.062      | 21.497      | 19.971      | 20.648      | 21.593      | 21.687      | 18.425      | 19.546      | 19.414      | 22.029      | 21.441      | 20.909      |
| 1,57E+05                 | 20.802      | 21.227      | 19.546      | 20.262      | 21.363      | 21.453      | 17.855      | 19.102      | 18.909      | 21.901      | 21.261      | 20.587      |
| 7,84E+04                 | 20.561      | 20.973      | 19.164      | 19.909      | 21.140      | 21.231      | 17.369      | 18.713      | 18.468      | 21.775      | 21.090      | 20.296      |
| 1,57E+04                 | 19.809      | 20.171      | 18.036      | 18.835      | 20.410      | 20.521      | 16.046      | 17.609      | 17.223      | 21.353      | 20.533      | 19.433      |
| 7,84E+03                 | 19.384      | 19.711      | 17.432      | 18.244      | 19.977      | 20.108      | 15.388      | 17.038      | 16.583      | 21.096      | 20.205      | 18.965      |
| 1,57E+03                 | 18.098      | 18.301      | 15.719      | 16.522      | 18.601      | 18.822      | 13.662      | 15.465      | 14.845      | 20.249      | 19.164      | 17.616      |
| 3,42E+03                 | 18.778      | 19.049      | 16.604      | 17.420      | 19.338      | 19.507      | 14.532      | 16.270      | 15.731      | 20.709      | 19.722      | 18.318      |
| 1,37E+03                 | 17.967      | 18.156      | 15.552      | 16.351      | 18.456      | 18.688      | 13.503      | 15.315      | 14.681      | 20.157      | 19.055      | 17.483      |
| 6,84E+02                 | 17.244      | 17.355      | 14.661      | 15.428      | 17.648      | 17.945      | 12.673      | 14.517      | 13.813      | 19.634      | 18.440      | 16.762      |
| 1,37E+02                 | 15.167      | 15.046      | 12.305      | 12.927      | 15.260      | 15.763      | 10.613      | 12.434      | 11.594      | 17.983      | 16.587      | 14.785      |
| 6,84E+01                 | 14.101      | 13.861      | 11.194      | 11.724      | 14.015      | 14.624      | 9.692       | 11.453      | 10.574      | 17.053      | 15.590      | 13.812      |
| 1,37E+01                 | 11.287      | 10.768      | 8.534       | 8.798       | 10.755      | 11.593      | 7.562       | 9.069       | 8.169       | 14.339      | 12.833      | 11.334      |
| 2,50E+01                 | 12.388      | 11.970      | 9.532       | 9.901       | 12.021      | 12.781      | 8.352       | 9.972       | 9.068       | 15.446      | 13.933      | 12.291      |
| 1,00E+01                 | 10.700      | 10.132      | 8.023       | 8.232       | 10.089      | 10.960      | 7.161       | 8.600       | 7.709       | 13.727      | 12.237      | 10.830      |
| 5,00E+00                 | 9.382       | 8.721       | 6.922       | 7.012       | 8.623       | 9.543       | 6.297       | 7.573       | 6.718       | 12.292      | 10.874      | 9.704       |
| 1,00E+00                 | 6.395       | 5.637       | 4.645       | 4.510       | 5.512       | 6.383       | 4.490       | 5.339       | 4.640       | 8.743       | 7.667       | 7.163       |
| 5,00E-01                 | 5.230       | 4.492       | 3.826       | 3.627       | 4.400       | 5.182       | 3.818       | 4.482       | 3.874       | 7.250       | 6.377       | 6.154       |
| 1,00E-01                 | 3.018       | 2.437       | 2.349       | 2.087       | 2.484       | 2.976       | 2.535       | 2.825       | 2.442       | 4.267       | 3.866       | 4.142       |
| 3,10E-01                 | 4.495       | 3.789       | 3.326       | 3.097       | 3.734       | 4.437       | 3.396       | 3.939       | 3.397       | 6.279       | 5.551       | 5.504       |
| 1,24E-01                 | 3.269       | 2.661       | 2.513       | 2.253       | 2.687       | 3.220       | 2.684       | 3.018       | 2.605       | 4.613       | 4.155       | 4.381       |
| 6,20E-02                 | 2.513       | 1.996       | 2.019       | 1.757       | 2.084       | 2.488       | 2.228       | 2.429       | 2.110       | 3.563       | 3.280       | 3.647       |
| 1,24E-02                 | 1.291       | 985         | 1.211       | 983         | 1.177       | 1.337       | 1.422       | 1.406       | 1.266       | 1.851       | 1.837       | 2.332       |
| 6,20E-03                 | 957         | 725         | 978         | 773         | 940         | 1.028       | 1.167       | 1.096       | 1.013       | 1.386       | 1.431       | 1.917       |
| 1,24E-03                 | 482         | 370         | 617         | 464         | 601         | 585         | 743         | 607         | 610         | 731         | 831         | 1.233       |
| 6,15E-03                 | 954         | 723         | 975         | 771         | 937         | 1.025       | 1.165       | 1.093       | 1.010       | 1.381       | 1.427       | 1.913       |
| 2,46E-03                 | 642         | 488         | 745         | 571         | 717         | 736         | 899         | 781         | 754         | 951         | 1.038       | 1.483       |
| 1,23E-03                 | 480         | 369         | 616         | 462         | 600         | 584         | 741         | 605         | 608         | 729         | 829         | 1.230       |
| 2,46E-04                 | 257         | 208         | 417         | 303         | 431         | 367         | 484         | 339         | 381         | 427         | 528         | 826         |
| 1,23E-04                 | 203         | 169         | 361         | 260         | 386         | 312         | 408         | 267         | 317         | 353         | 449         | 708         |
| 2,46E-05                 | 127         | 114         | 274         | 196         | 319         | 230         | 284         | 160         | 217         | 250         | 333         | 521         |

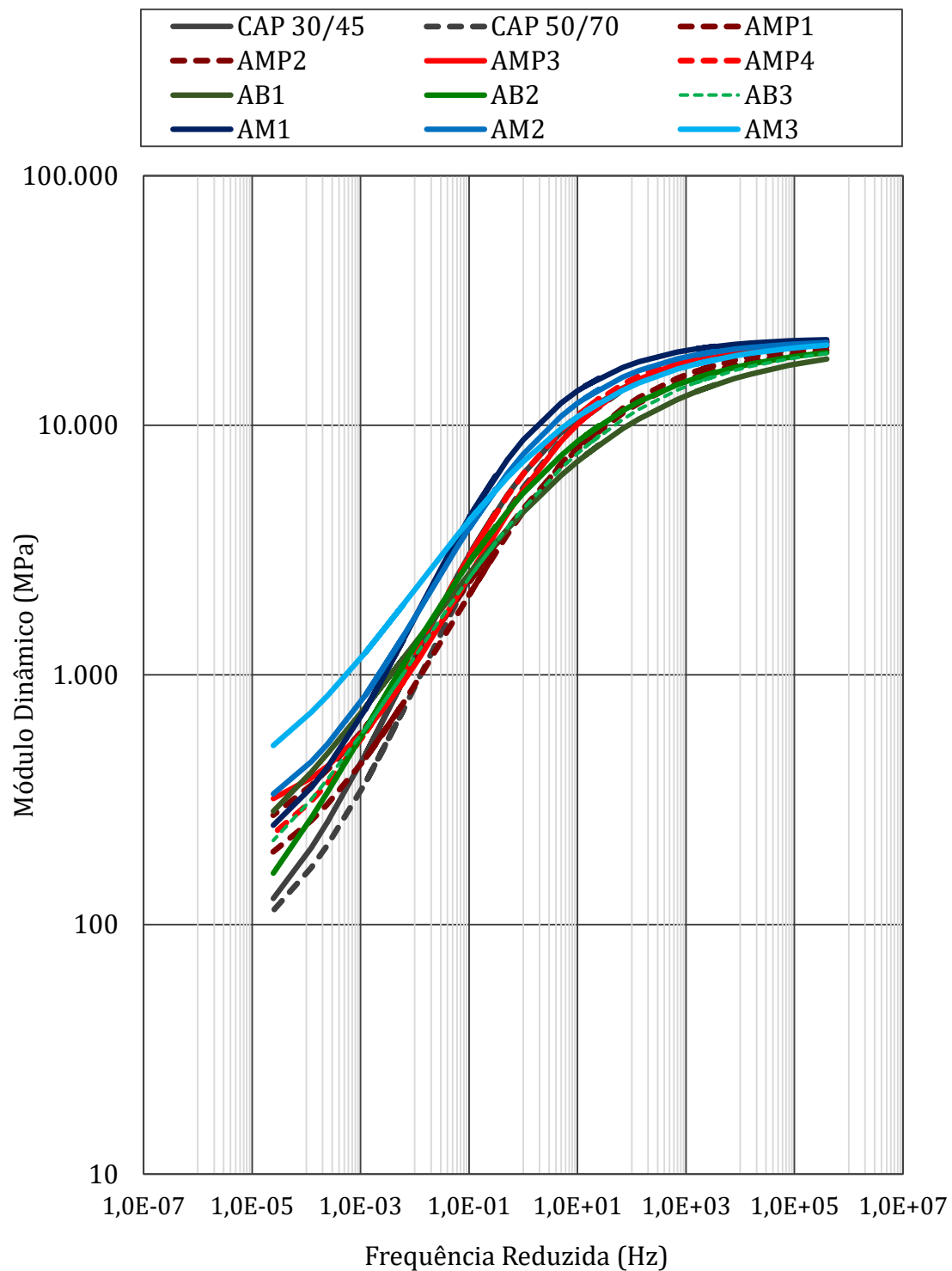


Figura 5.34: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo e os ligantes asfálticos estudados

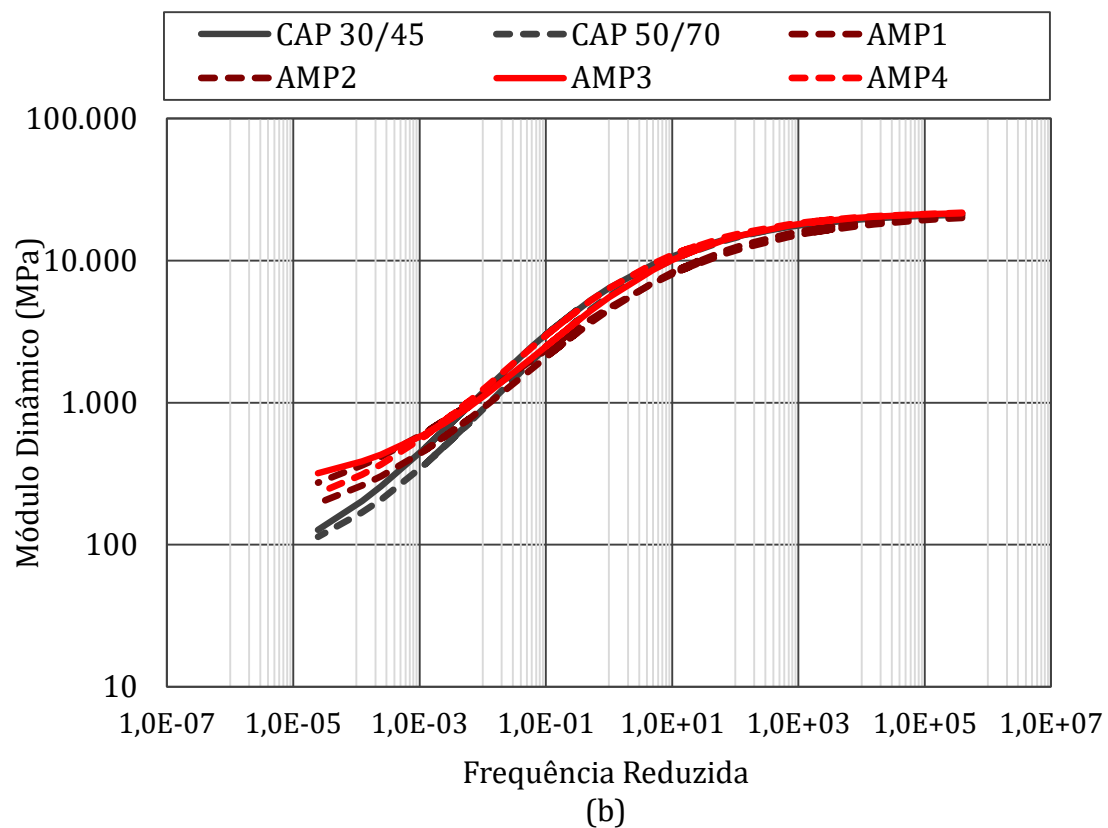
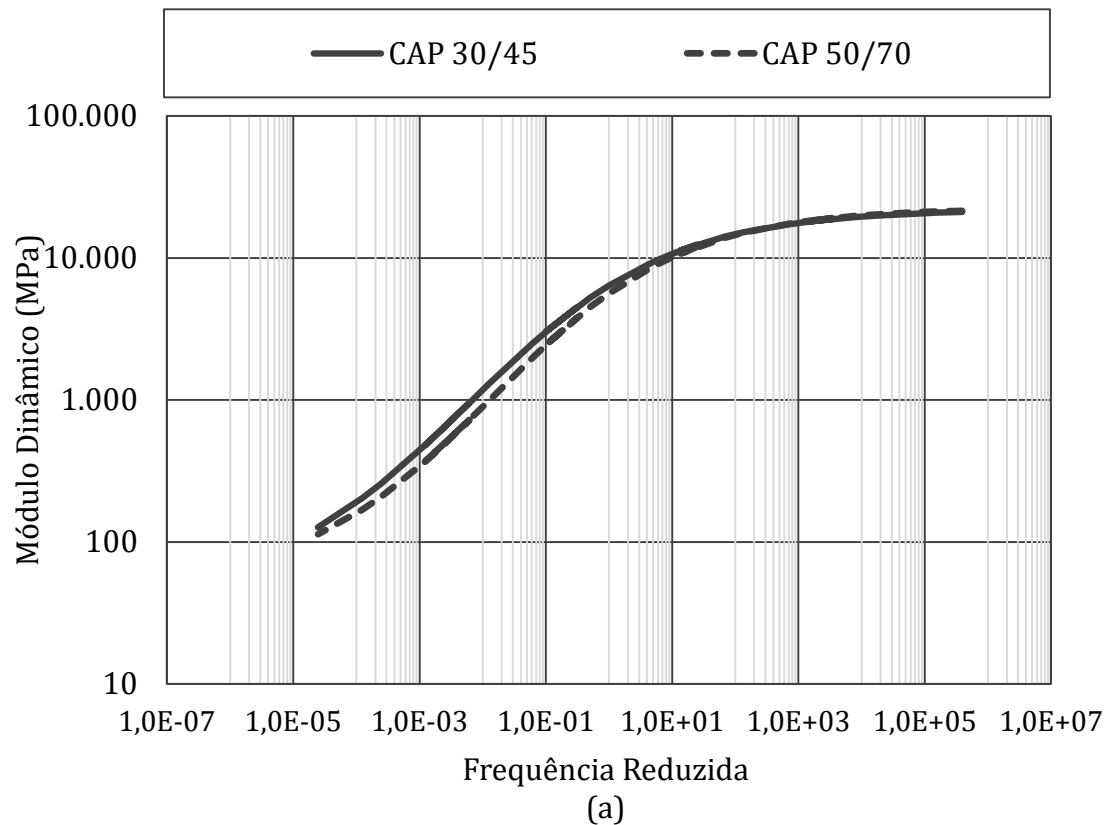


Figura 5.35: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos (SP)

(a) Com CAP 30/45 e CAP 50/70; (b) Com ligantes asfálticos modificados por polímero

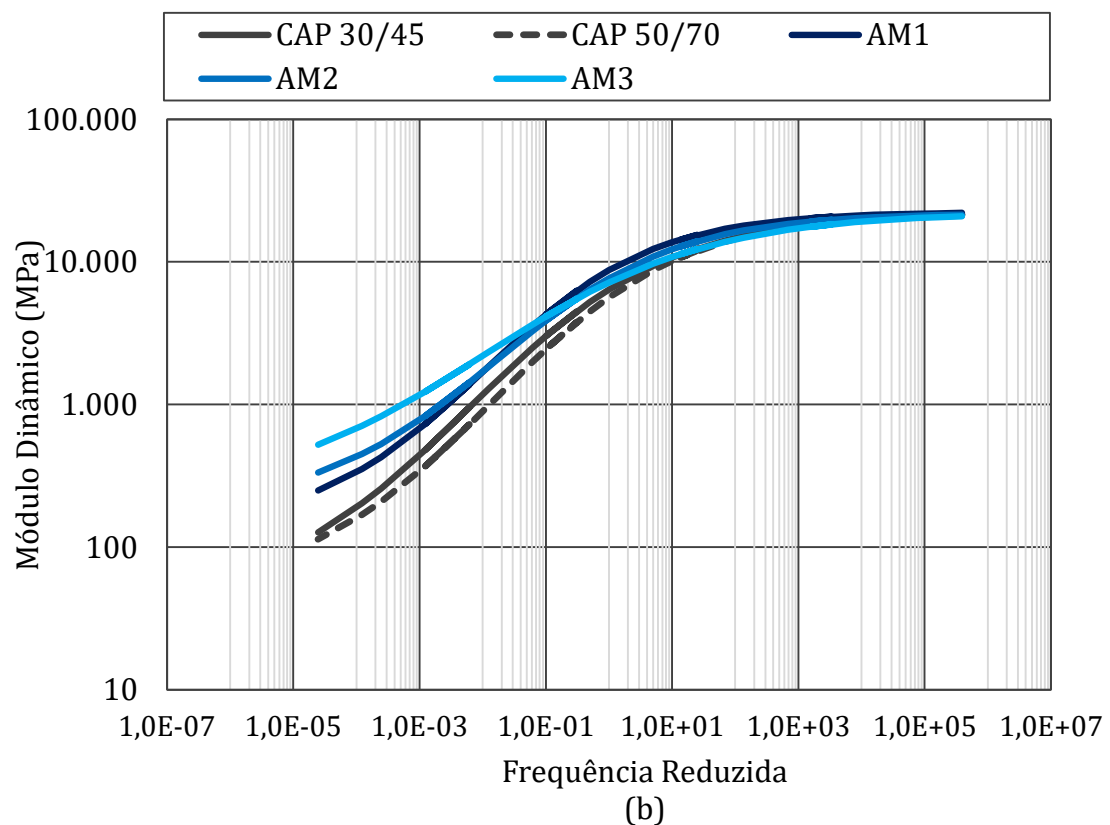
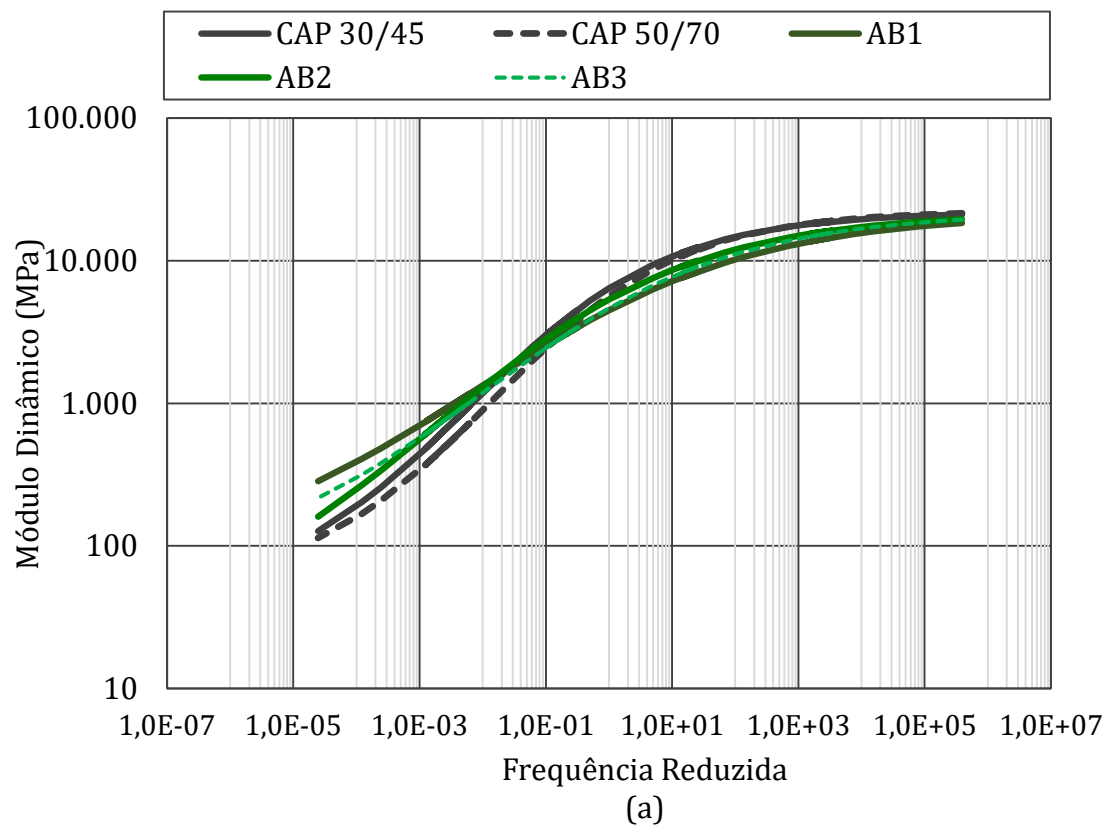


Figura 5.36: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos (SP)  
(a) Com ligante asfáltico modificado por borracha; (b) Com ligantes asfálticos de alto módulo

Tabela 5.29: Resultados de Módulo Dinâmico ( $E^*$ ) e frequência reduzida para construção das curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| Mistura Asfáltica        | 61          | 62          | 63          | 64          | 65          | 66          | 67          | 68          | 69          | 70          | 71          | 72          |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ligante Asfáltico        | CAP 30/45   | CAP 50/70   | AMP1        | AMP2        | AMP3        | AMP4        | AB1         | AB2         | AB3         | AM1         | AM2         | AM3         |
| Frequência Reduzida (Hz) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) |
| 3.92E+05                 | 21,827      | 21,336      | 20,950      | 21,984      | 21,287      | 21,905      | 19,474      | 20,414      | 20,696      | 22,236      | 22,222      | 21,792      |
| 1.57E+05                 | 21,668      | 21,072      | 20,583      | 21,736      | 20,974      | 21,692      | 18,985      | 20,011      | 20,274      | 22,156      | 22,137      | 21,646      |
| 7.84E+04                 | 21,517      | 20,828      | 20,253      | 21,505      | 20,684      | 21,485      | 18,560      | 19,651      | 19,886      | 22,076      | 22,052      | 21,506      |
| 1.57E+04                 | 21,024      | 20,071      | 19,270      | 20,782      | 19,794      | 20,792      | 17,371      | 18,595      | 18,713      | 21,796      | 21,754      | 21,051      |
| 7.84E+03                 | 20,733      | 19,645      | 18,740      | 20,370      | 19,297      | 20,375      | 16,764      | 18,032      | 18,069      | 21,618      | 21,566      | 20,782      |
| 1.57E+03                 | 19,807      | 18,361      | 17,215      | 19,116      | 17,817      | 19,026      | 15,117      | 16,442      | 16,208      | 21,008      | 20,919      | 19,925      |
| 3.42E+03                 | 20,305      | 19,039      | 18,007      | 19,780      | 18,594      | 19,753      | 15,956      | 17,263      | 17,175      | 21,344      | 21,275      | 20,386      |
| 1.37E+03                 | 19,709      | 18,230      | 17,065      | 18,988      | 17,668      | 18,883      | 14,962      | 16,288      | 16,026      | 20,940      | 20,846      | 19,835      |
| 6.84E+02                 | 19,157      | 17,510      | 16,255      | 18,277      | 16,853      | 18,077      | 14,139      | 15,461      | 15,042      | 20,546      | 20,429      | 19,324      |
| 1.37E+02                 | 17,469      | 15,444      | 14,057      | 16,220      | 14,576      | 15,653      | 12,022      | 13,264      | 12,428      | 19,239      | 19,050      | 17,766      |
| 6.84E+01                 | 16,544      | 14,382      | 12,988      | 15,155      | 13,441      | 14,371      | 11,040      | 12,219      | 11,199      | 18,468      | 18,240      | 16,914      |
| 1.37E+01                 | 13,914      | 11,573      | 10,316      | 12,318      | 10,555      | 10,967      | 8,685       | 9,671       | 8,302       | 16,100      | 15,773      | 14,497      |
| 2.50E+01                 | 14,977      | 12,674      | 11,339      | 13,433      | 11,665      | 12,295      | 9,572       | 10,636      | 9,379       | 17,086      | 16,796      | 15,472      |
| 1.00E+01                 | 13,329      | 10,985      | 9,782       | 11,722      | 9,973       | 10,268      | 8,227       | 9,172       | 7,757       | 15,543      | 15,198      | 13,961      |
| 5.00E+00                 | 11,968      | 9,660       | 8,605       | 10,374      | 8,690       | 8,722       | 7,228       | 8,083       | 6,600       | 14,208      | 13,826      | 12,714      |
| 1.00E+00                 | 8,616       | 6,629       | 6,029       | 7,279       | 5,905       | 5,447       | 5,077       | 5,748       | 4,302       | 10,730      | 10,312      | 9,638       |
| 5.00E-01                 | 7,197       | 5,434       | 5,046       | 6,053       | 4,863       | 4,288       | 4,259       | 4,870       | 3,514       | 9,192       | 8,787       | 8,325       |
| 1.00E-01                 | 4,305       | 3,136       | 3,169       | 3,674       | 2,936       | 2,327       | 2,684       | 3,204       | 2,157       | 5,965       | 5,652       | 5,589       |
| 3.10E-01                 | 6,267       | 4,675       | 4,426       | 5,271       | 4,216       | 3,599       | 3,742       | 4,319       | 3,045       | 8,165       | 7,779       | 7,457       |
| 1.24E-01                 | 4,647       | 3,399       | 3,385       | 3,948       | 3,152       | 2,532       | 2,867       | 3,395       | 2,304       | 6,352       | 6,023       | 5,920       |
| 6.20E-02                 | 3,605       | 2,605       | 2,729       | 3,116       | 2,501       | 1,928       | 2,309       | 2,811       | 1,867       | 5,166       | 4,891       | 4,901       |
| 1.24E-02                 | 1,852       | 1,315       | 1,613       | 1,729       | 1,442       | 1,047       | 1,339       | 1,801       | 1,174       | 3,127       | 2,974       | 3,078       |
| 6.20E-03                 | 1,361       | 961         | 1,282       | 1,333       | 1,142       | 825         | 1,045       | 1,492       | 979         | 2,534       | 2,423       | 2,516       |
| 1.24E-03                 | 663         | 461         | 765         | 743         | 689         | 516         | 578         | 989         | 679         | 1,640       | 1,598       | 1,620       |
| 6.15E-03                 | 1,356       | 957         | 1,279       | 1,329       | 1,139       | 823         | 1,042       | 1,489       | 977         | 2,528       | 2,417       | 2,510       |
| 2.46E-03                 | 898         | 629         | 949         | 947         | 848         | 620         | 745         | 1,172       | 785         | 1,951       | 1,885       | 1,941       |
| 1.23E-03                 | 660         | 459         | 763         | 741         | 688         | 515         | 577         | 988         | 678         | 1,637       | 1,595       | 1,617       |
| 2.46E-04                 | 341         | 231         | 479         | 442         | 450         | 366         | 321         | 692         | 511         | 1,177       | 1,170       | 1,117       |
| 1.23E-04                 | 266         | 176         | 401         | 364         | 385         | 327         | 252         | 605         | 463         | 1,055       | 1,057       | 978         |
| 2.46E-05                 | 163         | 103         | 281         | 251         | 287         | 271         | 149         | 466         | 387         | 876         | 891         | 765         |

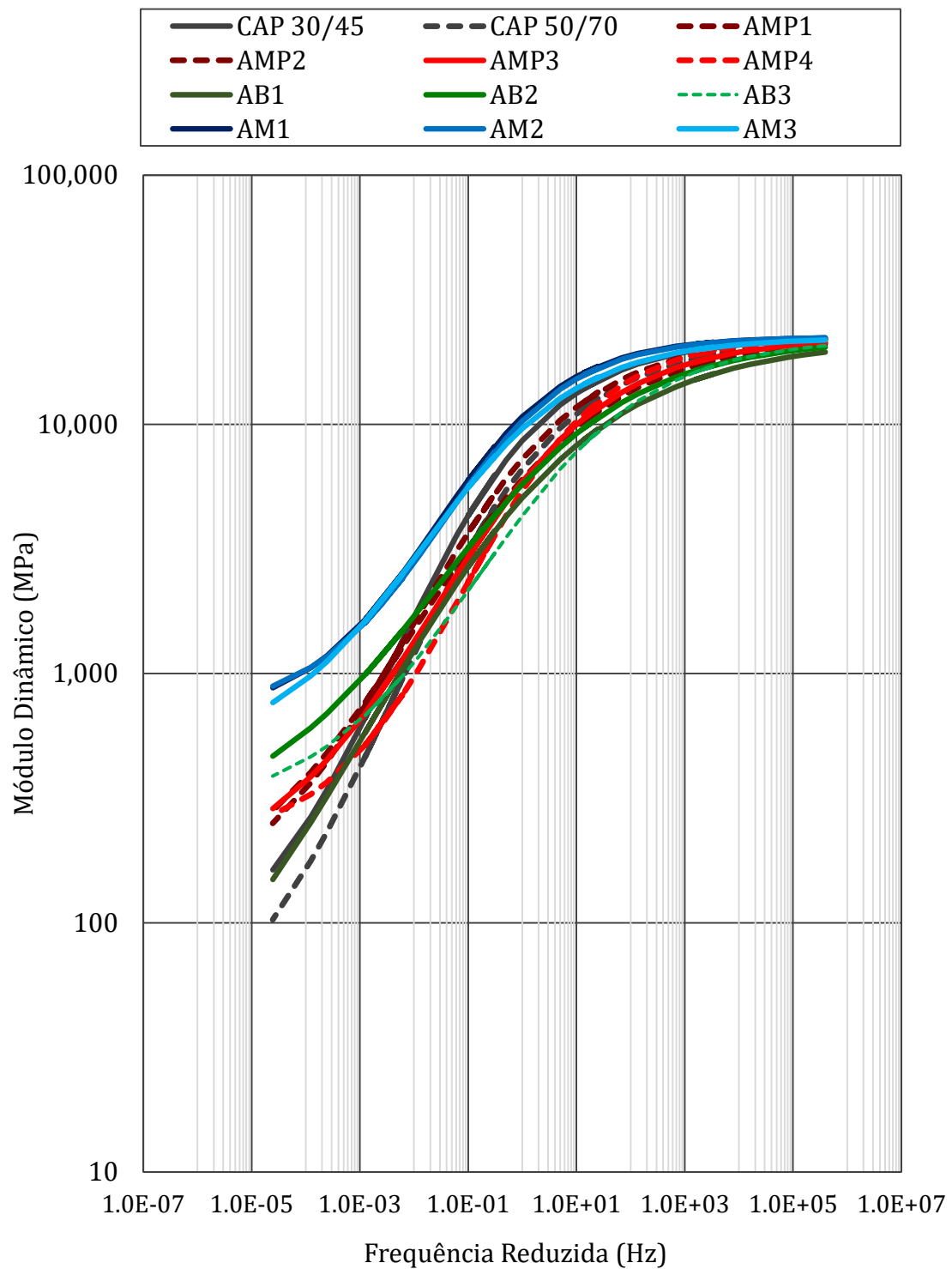


Figura 5.37: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro e os ligantes asfálticos estudados

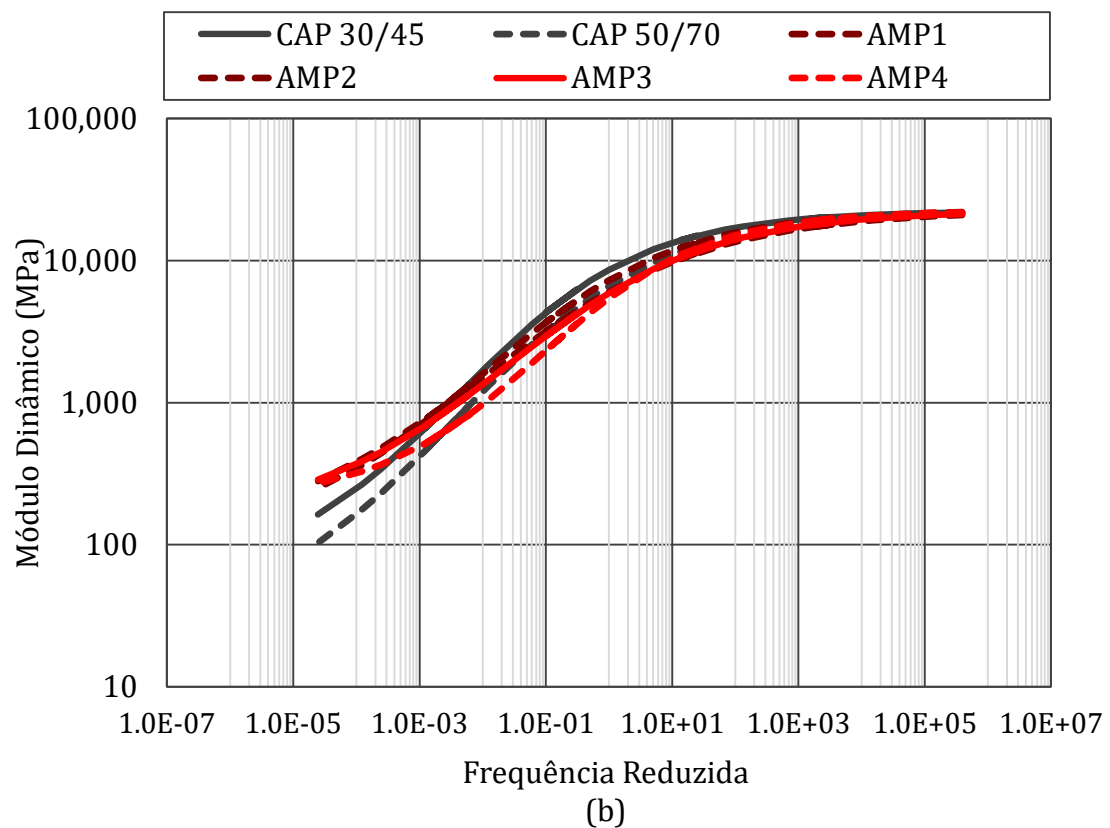
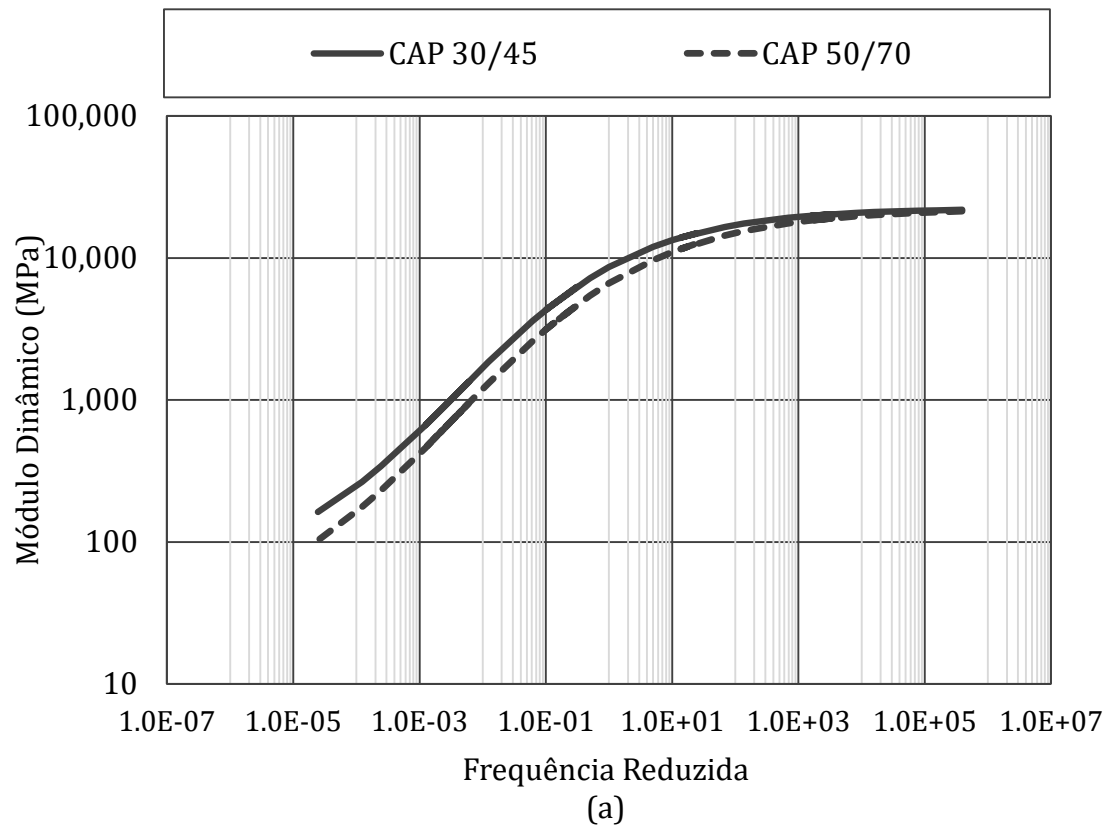


Figura 5.38: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos (RJ)

(a) Com CAP 30/45 e CAP 50/70; (b) Com ligantes asfálticos modificados por polímero

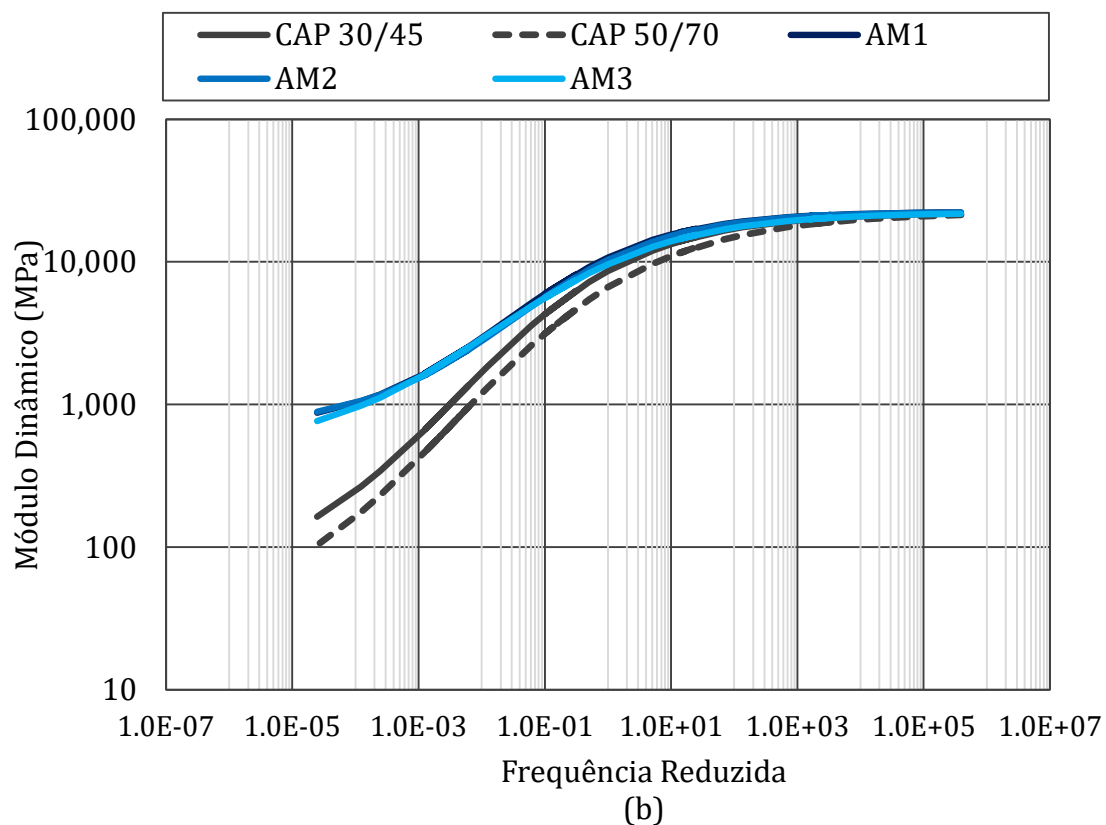
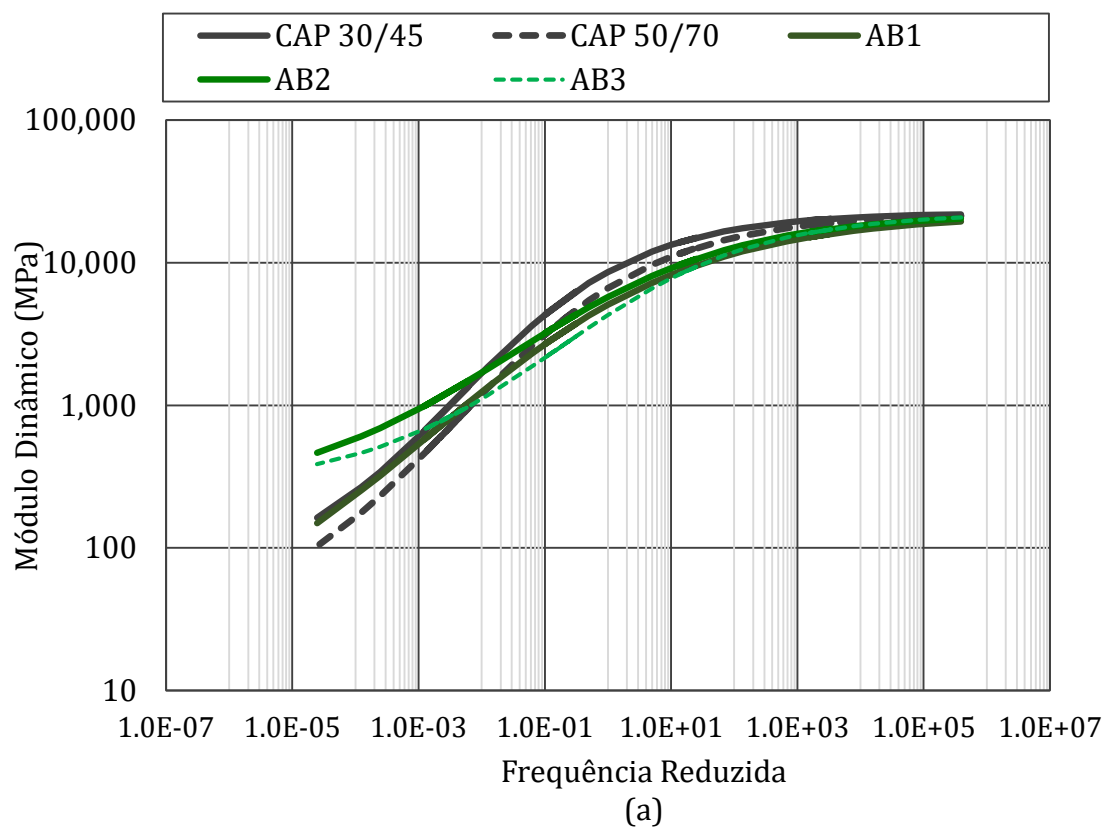


Figura 5.39: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos (RJ)

(a) Com ligante asfáltico modificado por borracha; (b) Com ligantes asfálticos de alto módulo



Tabela 5.30: Resultados de Módulo Dinâmico ( $E^*$ ) e frequência reduzida para construção das curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica        | 109         | 110         | 111         | 112         | 113         | 114         | 115         | 116         | 117         | 118         | 119         | 120         |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ligante Asfáltico        | CAP 30/45   | CAP 50/70   | AMP1        | AMP2        | AMP3        | AMP4        | AB1         | AB2         | AB3         | AM1         | AM2         | AM3         |
| Frequência Reduzida (Hz) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) |
| 3,92E+05                 | 20.981      | 20.903      | 20.607      | 20.929      | 20.550      | 20.584      | 19.337      | 19.273      | 19.210      | 20.540      | 20.563      | 20.731      |
| 1,57E+05                 | 20.904      | 20.836      | 20.462      | 20.826      | 20.346      | 20.459      | 19.028      | 18.966      | 18.904      | 20.381      | 20.469      | 20.654      |
| 7,84E+04                 | 20.827      | 20.766      | 20.317      | 20.722      | 20.150      | 20.335      | 18.740      | 18.679      | 18.618      | 20.230      | 20.376      | 20.576      |
| 1,57E+04                 | 20.549      | 20.500      | 19.818      | 20.348      | 19.506      | 19.912      | 17.842      | 17.782      | 17.723      | 19.741      | 20.048      | 20.307      |
| 7,84E+03                 | 20.370      | 20.320      | 19.507      | 20.107      | 19.123      | 19.650      | 17.335      | 17.276      | 17.217      | 19.453      | 19.842      | 20.138      |
| 1,57E+03                 | 19.743      | 19.650      | 18.461      | 19.260      | 17.902      | 18.776      | 15.817      | 15.757      | 15.697      | 18.538      | 19.132      | 19.556      |
| 3,42E+03                 | 20.090      | 20.027      | 19.032      | 19.728      | 18.558      | 19.253      | 16.615      | 16.556      | 16.497      | 19.029      | 19.522      | 19.876      |
| 1,37E+03                 | 19.672      | 19.571      | 18.347      | 19.164      | 17.773      | 18.681      | 15.664      | 15.603      | 15.543      | 18.442      | 19.053      | 19.491      |
| 6,84E+02                 | 19.260      | 19.104      | 17.694      | 18.609      | 17.051      | 18.135      | 14.827      | 14.766      | 14.704      | 17.898      | 18.596      | 19.117      |
| 1,37E+02                 | 17.874      | 17.452      | 15.638      | 16.771      | 14.891      | 16.405      | 12.501      | 12.437      | 12.372      | 16.243      | 17.098      | 17.880      |
| 6,84E+01                 | 17.048      | 16.429      | 14.500      | 15.698      | 13.747      | 15.430      | 11.358      | 11.292      | 11.227      | 15.340      | 16.226      | 17.152      |
| 1,37E+01                 | 14.504      | 13.203      | 11.332      | 12.532      | 10.684      | 12.626      | 8.527       | 8.465       | 8.402       | 12.781      | 13.613      | 14.926      |
| 2,50E+01                 | 15.563      | 14.551      | 12.592      | 13.822      | 11.886      | 13.761      | 9.601       | 9.537       | 9.472       | 13.813      | 14.688      | 15.851      |
| 1,00E+01                 | 13.908      | 12.446      | 10.655      | 11.823      | 10.046      | 12.004      | 7.973       | 7.912       | 7.852       | 12.215      | 13.014      | 14.403      |
| 5,00E+00                 | 12.487      | 10.662      | 9.132       | 10.188      | 8.622       | 10.568      | 6.776       | 6.720       | 6.665       | 10.899      | 11.603      | 13.153      |
| 1,00E+00                 | 8.882       | 6.412       | 5.784       | 6.418       | 5.510       | 7.172       | 4.314       | 4.278       | 4.241       | 7.684       | 8.118       | 9.902       |
| 5,00E-01                 | 7.354       | 4.805       | 4.566       | 4.998       | 4.367       | 5.825       | 3.452       | 3.425       | 3.398       | 6.336       | 6.676       | 8.467       |
| 1,00E-01                 | 4.344       | 2.151       | 2.479       | 2.554       | 2.362       | 3.307       | 1.964       | 1.958       | 1.952       | 3.630       | 3.885       | 5.460       |
| 3,10E-01                 | 6.364       | 3.850       | 3.835       | 4.141       | 3.674       | 4.978       | 2.936       | 2.915       | 2.895       | 5.458       | 5.752       | 7.510       |
| 1,24E-01                 | 4.688       | 2.414       | 2.697       | 2.808       | 2.577       | 3.586       | 2.123       | 2.114       | 2.106       | 3.946       | 4.201       | 5.821       |
| 6,20E-02                 | 3.652       | 1.658       | 2.053       | 2.064       | 1.942       | 2.751       | 1.651       | 1.649       | 1.648       | 2.987       | 3.252       | 4.717       |
| 1,24E-02                 | 2.011       | 705         | 1.119       | 1.026       | 999         | 1.462       | 927         | 937         | 946         | 1.422       | 1.760       | 2.823       |
| 6,20E-03                 | 1.576       | 508         | 886         | 782         | 760         | 1.127       | 734         | 746         | 758         | 1.002       | 1.366       | 2.273       |
| 1,24E-03                 | 966         | 278         | 566         | 465         | 432         | 660         | 452         | 467         | 482         | 435         | 815         | 1.448       |
| 6,15E-03                 | 1.571       | 507         | 884         | 780         | 758         | 1.123       | 732         | 744         | 756         | 998         | 1.362       | 2.267       |
| 2,46E-03                 | 1.171       | 349         | 673         | 569         | 541         | 817         | 549         | 563         | 578         | 620         | 1.001       | 1.735       |
| 1,23E-03                 | 964         | 277         | 564         | 464         | 430         | 658         | 451         | 466         | 481         | 433         | 814         | 1.445       |
| 2,46E-04                 | 676         | 188         | 413         | 326         | 277         | 438         | 308         | 323         | 338         | 197         | 554         | 1.023       |
| 1,23E-04                 | 604         | 168         | 374         | 292         | 239         | 383         | 269         | 285         | 300         | 145         | 489         | 912         |
| 2,46E-05                 | 500         | 141         | 317         | 245         | 183         | 304         | 211         | 226         | 241         | 79          | 395         | 749         |

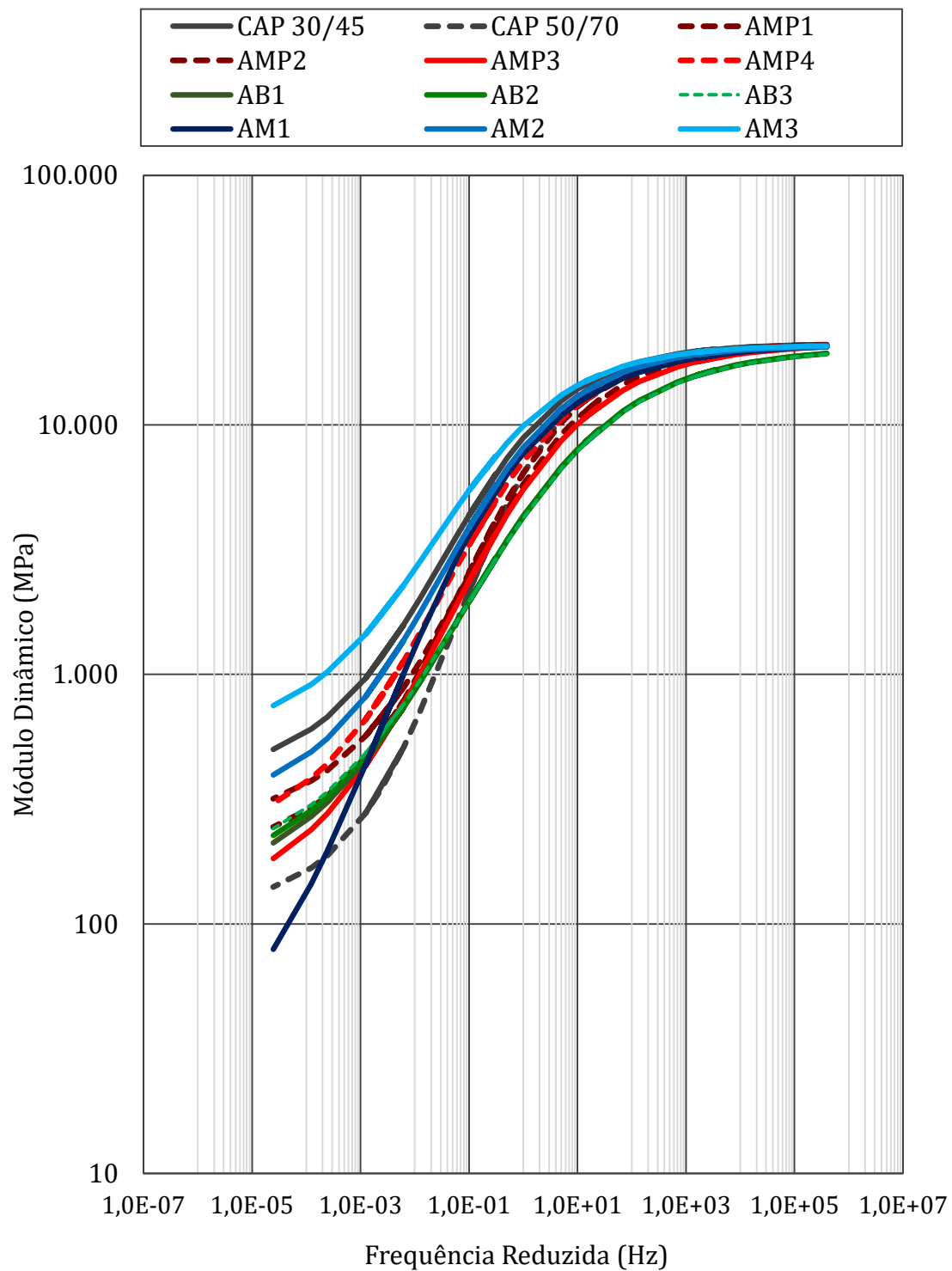


Figura 5.40: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo e os ligantes asfálticos estudados

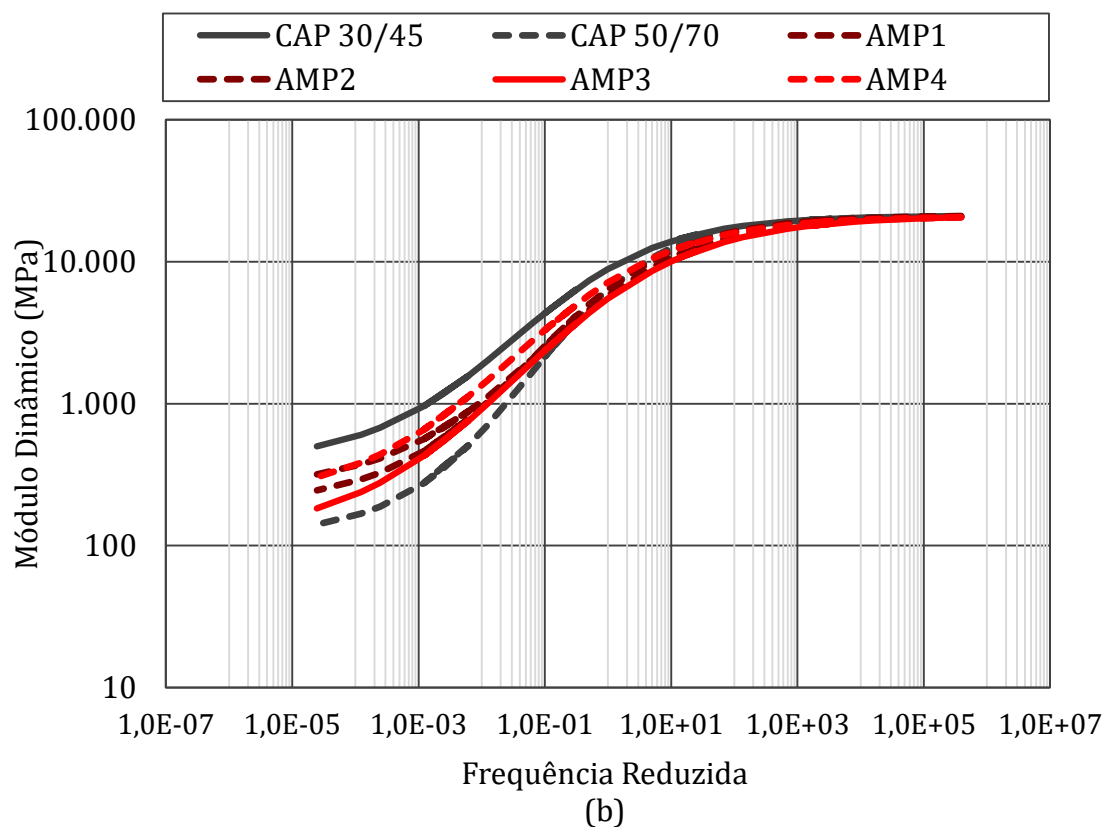
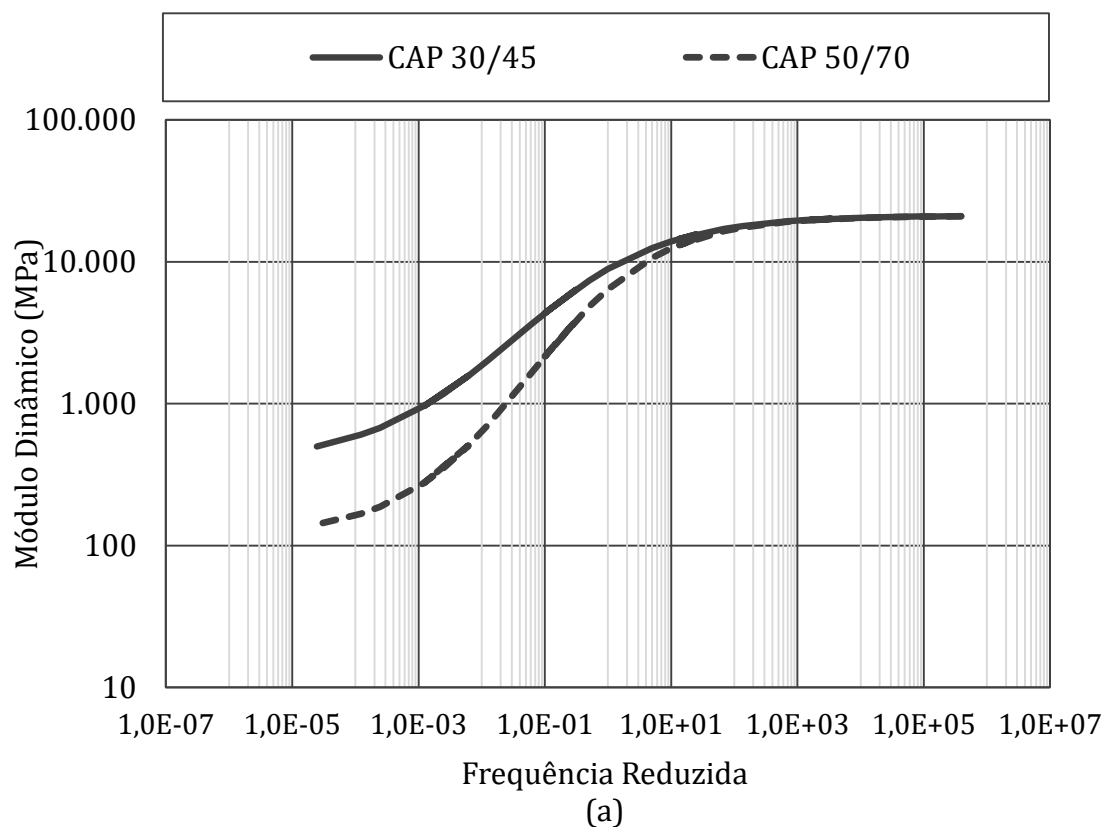


Figura 5.41: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados basálticos (SP)

(a) Com CAP 30/45 e CAP 50/70; (b) Com ligantes asfálticos modificados por polímero

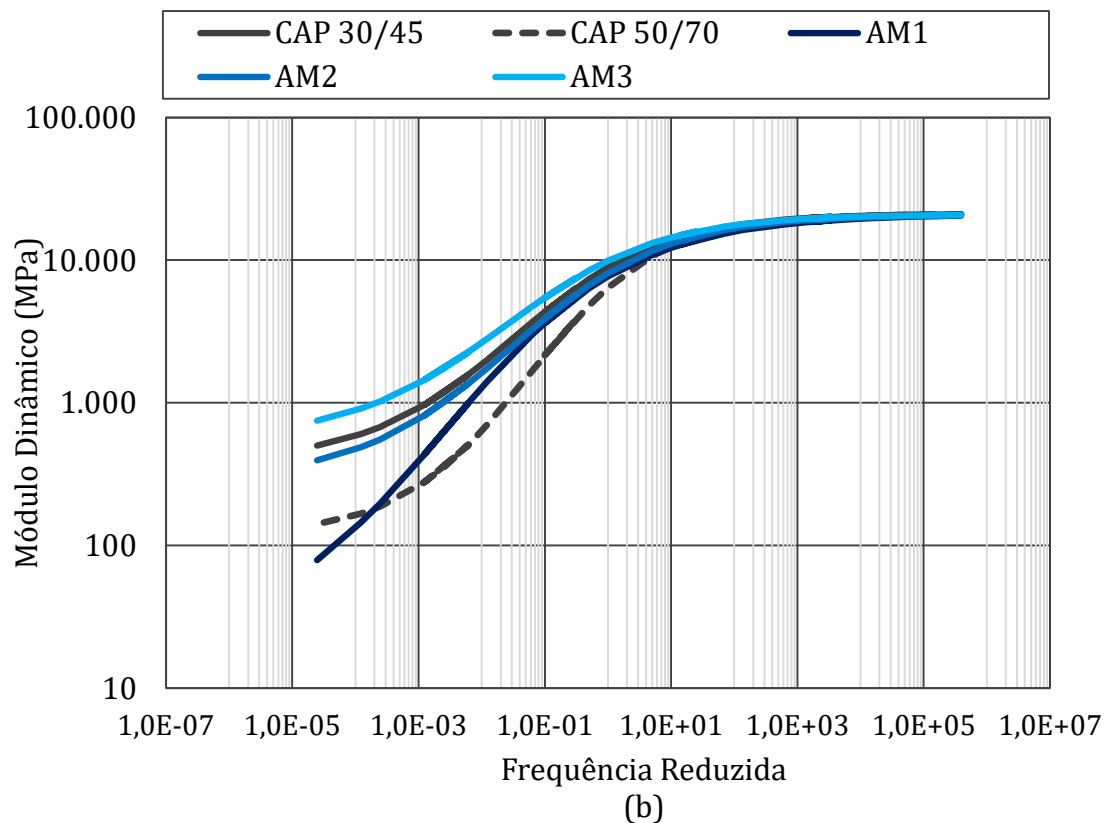
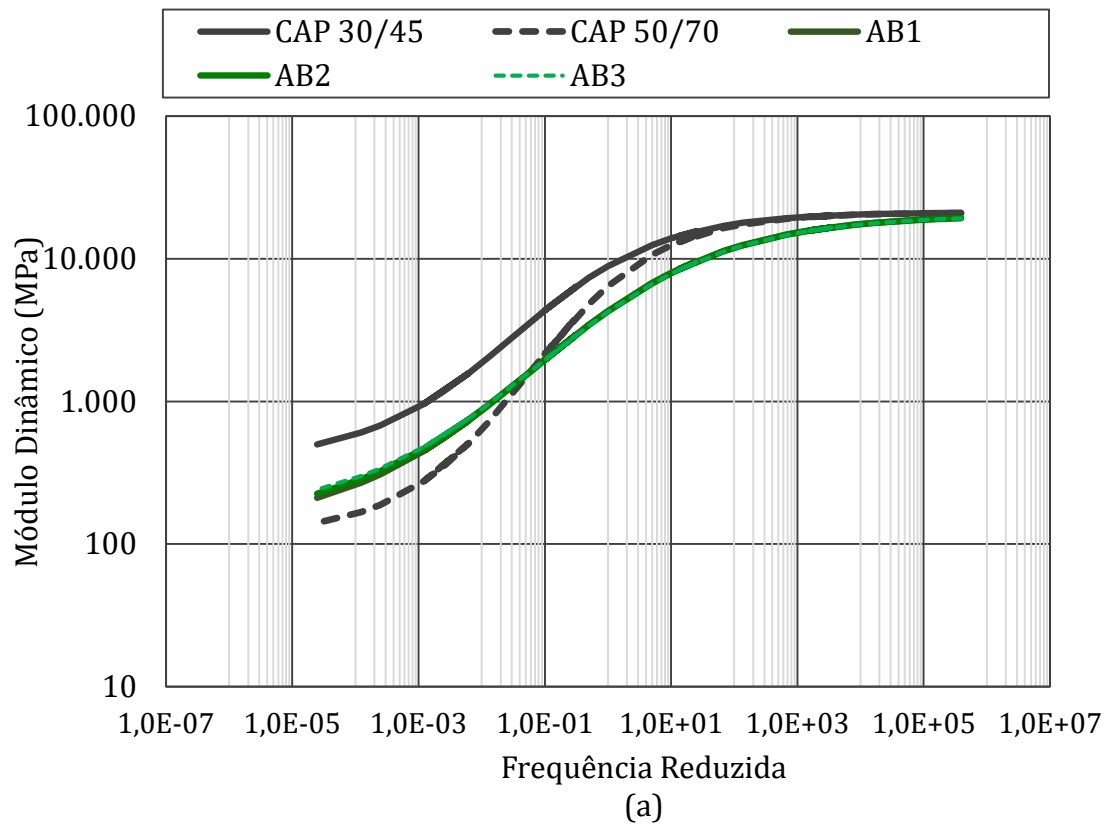


Figura 5.42: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados basálticos (SP)  
(a) Com ligante asfáltico modificado por borracha; (b) Com ligantes asfálticos de alto módulo

### 3.2.3. Faixa Granulométrica EGL 9,5mm

A Tabela 5.31 apresenta os resultados de  $E^*$  na frequência reduzida das misturas asfálticas com granulometria EGL 9,5mm, agregados graníticos do Estado de São Paulo e com os doze tipos de ligantes asfálticos utilizados neste estudo. Esses dados foram utilizados para construir as curvas mestres apresentadas nas Figuras 5.43 a 5.45.

Na Tabela 5.32 apresentam-se os resultados de módulo dinâmico na frequência reduzida das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro e as respectivas curvas mestres são mostradas na Figura 5.46 a 5.48.

Na Tabela 5.33 apresentam-se os resultados de módulo dinâmico na frequência reduzida das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo e as respectivas curvas mestres são mostradas na Figura 5.49 a 5.51.

Tabela 5.31: Resultados de Módulo Dinâmico ( $E^*$ ) e frequência reduzida para construção das curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica        | 25          | 26          | 27          | 28          | 29          | 30          | 31          | 32          | 33          | 34          | 35          | 36          |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ligante Asfáltico        | CAP 30/45   | CAP 50/70   | AMP1        | AMP2        | AMP3        | AMP4        | AB1         | AB2         | AB3         | AM1         | AM2         | AM3         |
| Frequência Reduzida (Hz) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) |
| 3,92E+05                 | 21.582      | 21.731      | 19.367      | 20.360      | 21.073      | 21.491      | 18.458      | 20.399      | 20.022      | 21.209      | 21.280      | 21.400      |
| 1,57E+05                 | 21.349      | 21.483      | 18.862      | 19.938      | 20.789      | 21.289      | 17.962      | 20.051      | 19.618      | 20.981      | 21.068      | 21.162      |
| 7,84E+04                 | 21.131      | 21.249      | 18.429      | 19.562      | 20.522      | 21.098      | 17.550      | 19.737      | 19.258      | 20.766      | 20.870      | 20.944      |
| 1,57E+04                 | 20.450      | 20.506      | 17.231      | 18.460      | 19.686      | 20.488      | 16.460      | 18.808      | 18.203      | 20.074      | 20.251      | 20.281      |
| 7,84E+03                 | 20.063      | 20.079      | 16.627      | 17.875      | 19.210      | 20.134      | 15.931      | 18.307      | 17.642      | 19.671      | 19.898      | 19.914      |
| 1,57E+03                 | 18.879      | 18.757      | 15.007      | 16.220      | 17.765      | 19.033      | 14.561      | 16.868      | 16.060      | 18.418      | 18.817      | 18.822      |
| 3,42E+03                 | 19.506      | 19.460      | 15.830      | 17.074      | 18.529      | 19.620      | 15.249      | 17.615      | 16.877      | 19.086      | 19.391      | 19.396      |
| 1,37E+03                 | 18.757      | 18.621      | 14.856      | 16.059      | 17.618      | 18.918      | 14.436      | 16.726      | 15.906      | 18.288      | 18.705      | 18.712      |
| 6,84E+02                 | 18.084      | 17.863      | 14.055      | 15.198      | 16.807      | 18.280      | 13.780      | 15.963      | 15.084      | 17.564      | 18.087      | 18.106      |
| 1,37E+02                 | 16.128      | 15.647      | 12.006      | 12.904      | 14.498      | 16.393      | 12.133      | 13.891      | 12.902      | 15.437      | 16.274      | 16.380      |
| 6,84E+01                 | 15.108      | 14.493      | 11.058      | 11.809      | 13.330      | 15.395      | 11.379      | 12.881      | 11.865      | 14.326      | 15.319      | 15.492      |
| 1,37E+01                 | 12.369      | 11.419      | 8.780       | 9.132       | 10.331      | 12.685      | 9.558       | 10.354      | 9.338       | 11.368      | 12.712      | 13.117      |
| 2,50E+01                 | 13.450      | 12.625      | 9.640       | 10.147      | 11.489      | 13.758      | 10.249      | 11.323      | 10.295      | 12.528      | 13.749      | 14.055      |
| 1,00E+01                 | 11.788      | 10.776      | 8.336       | 8.607       | 9.723       | 12.106      | 9.197       | 9.847       | 8.844       | 10.751      | 12.151      | 12.611      |
| 5,00E+00                 | 10.469      | 9.331       | 7.362       | 7.460       | 8.384       | 10.789      | 8.398       | 8.726       | 7.765       | 9.367       | 10.863      | 11.456      |
| 1,00E+00                 | 7.400       | 6.093       | 5.240       | 5.012       | 5.497       | 7.719       | 6.580       | 6.253       | 5.456       | 6.276       | 7.790       | 8.691       |
| 5,00E-01                 | 6.165       | 4.858       | 4.419       | 4.103       | 4.435       | 6.485       | 5.832       | 5.298       | 4.591       | 5.100       | 6.519       | 7.528       |
| 1,00E-01                 | 3.739       | 2.600       | 2.809       | 2.418       | 2.529       | 4.067       | 4.236       | 3.446       | 2.957       | 2.935       | 3.954       | 5.088       |
| 3,10E-01                 | 5.372       | 4.092       | 3.896       | 3.538       | 3.785       | 5.694       | 5.335       | 4.691       | 4.049       | 4.369       | 5.691       | 6.758       |
| 1,24E-01                 | 4.021       | 2.848       | 2.998       | 2.607       | 2.737       | 4.348       | 4.436       | 3.662       | 3.144       | 3.175       | 4.257       | 5.386       |
| 6,20E-02                 | 3.163       | 2.108       | 2.418       | 2.036       | 2.114       | 3.494       | 3.810       | 3.004       | 2.575       | 2.456       | 3.331       | 4.463       |
| 1,24E-02                 | 1.724       | 985         | 1.390       | 1.101       | 1.143       | 2.052       | 2.561       | 1.859       | 1.600       | 1.324       | 1.755       | 2.757       |
| 6,20E-03                 | 1.312       | 700         | 1.072       | 836         | 882         | 1.632       | 2.117       | 1.509       | 1.305       | 1.019       | 1.302       | 2.211       |
| 1,24E-03                 | 703         | 324         | 567         | 444         | 507         | 991         | 1.303       | 947         | 833         | 581         | 641         | 1.314       |
| 6,15E-03                 | 1.308       | 698         | 1.069       | 834         | 880         | 1.627       | 2.113       | 1.506       | 1.302       | 1.016       | 1.298       | 2.206       |
| 2,46E-03                 | 913         | 447         | 747         | 580         | 635         | 1.216       | 1.614       | 1.149       | 1.003       | 730         | 866         | 1.639       |
| 1,23E-03                 | 701         | 322         | 565         | 442         | 506         | 989         | 1.299       | 944         | 831         | 580         | 638         | 1.311       |
| 2,46E-04                 | 398         | 162         | 291         | 245         | 320         | 650         | 754         | 622         | 560         | 366         | 325         | 798         |
| 1,23E-04                 | 321         | 126         | 218         | 194         | 272         | 559         | 588         | 531         | 482         | 311         | 249         | 655         |
| 2,46E-05                 | 211         | 77          | 114         | 120         | 200         | 421         | 319         | 387         | 359         | 230         | 145         | 437         |

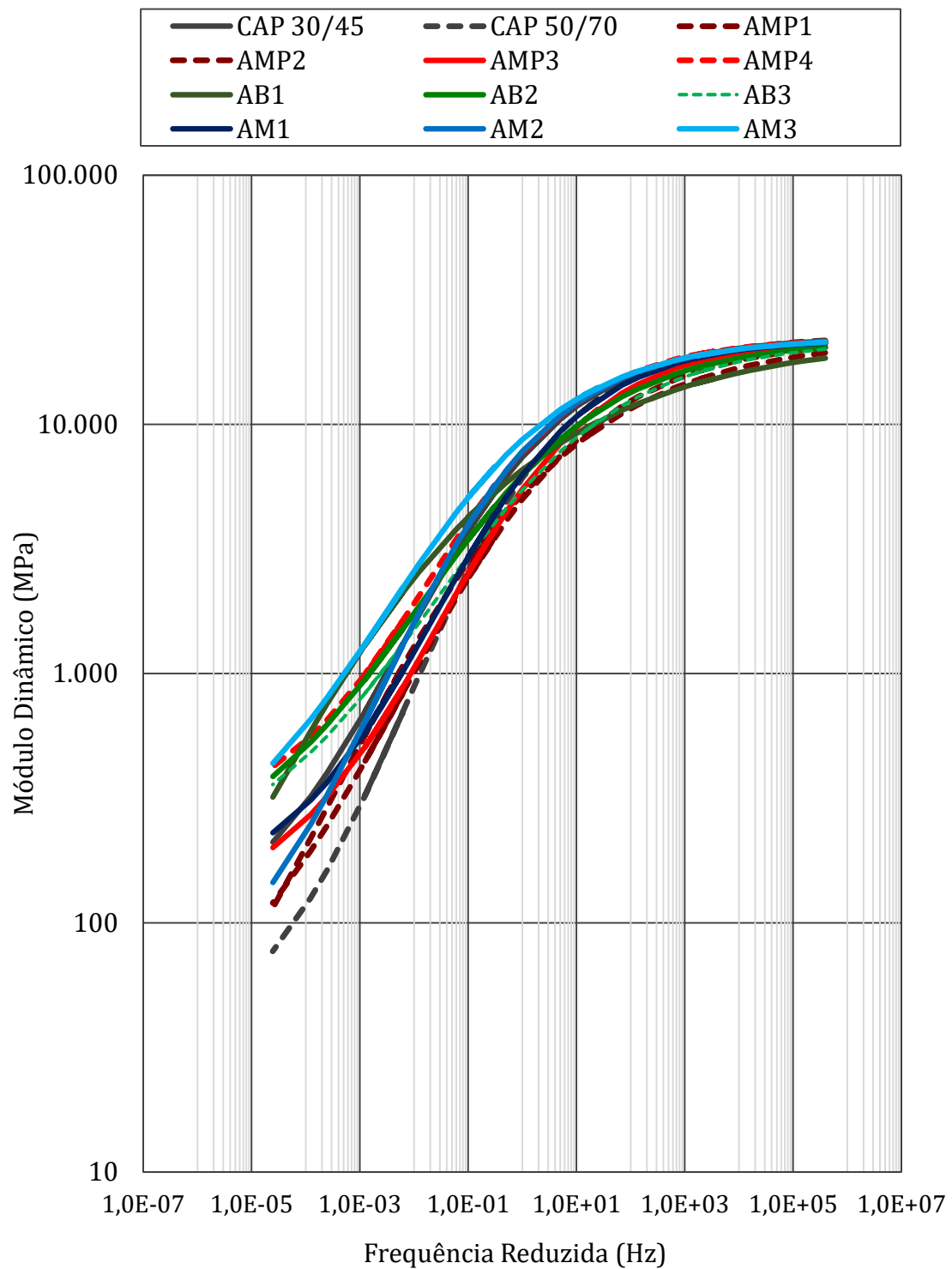


Figura 5.43: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo e os ligantes asfálticos estudados

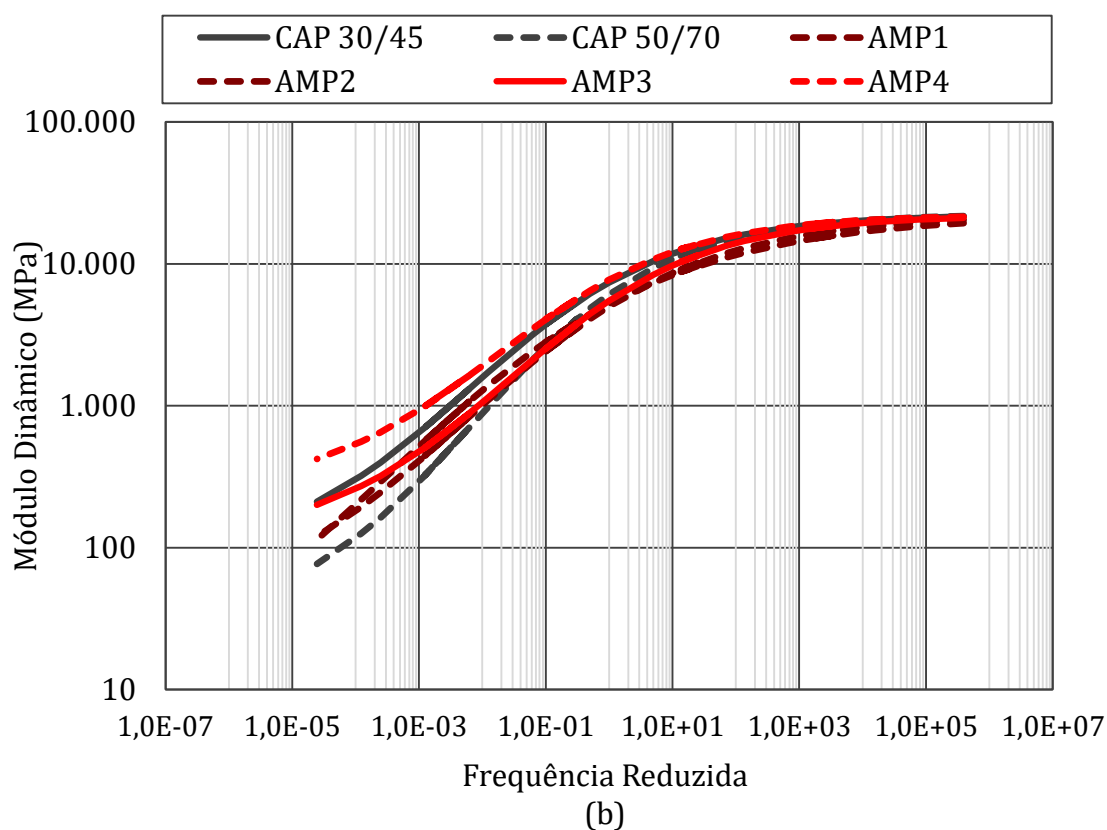
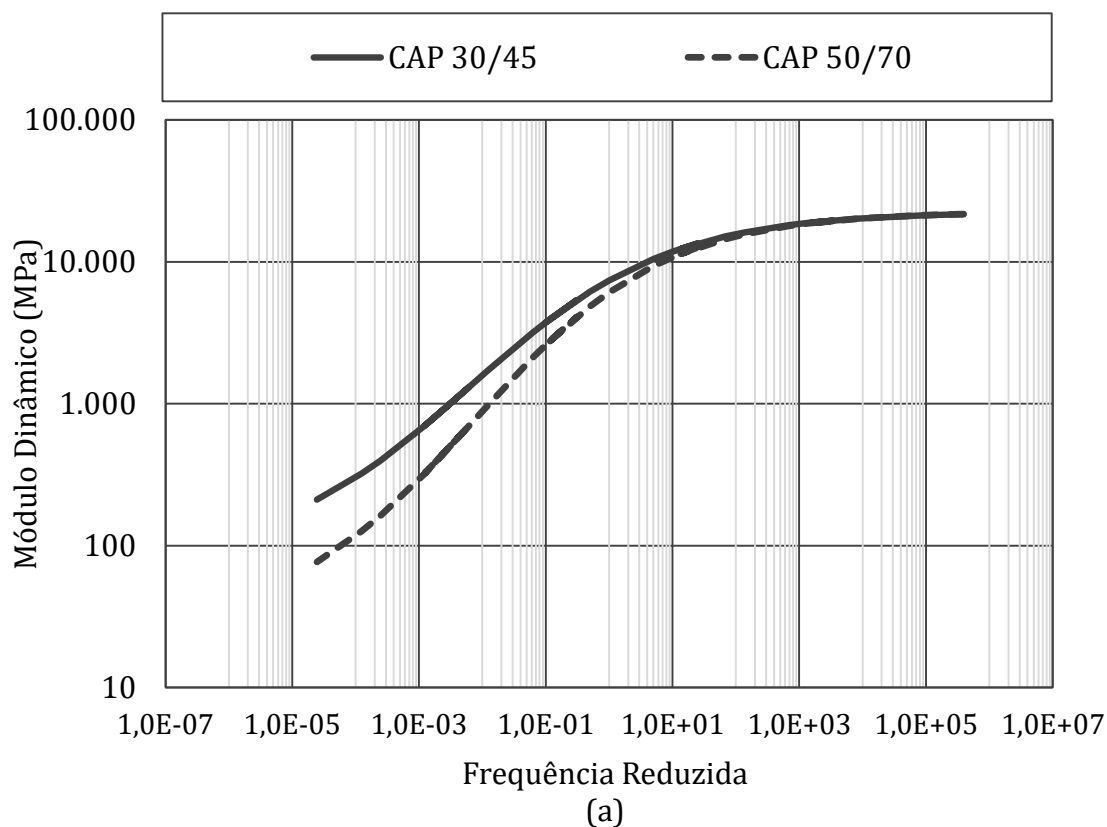


Figura 5.44: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos (SP)

(a) Com CAP 30/45 e CAP 50/70; (b) Com ligantes asfálticos modificados por polímero



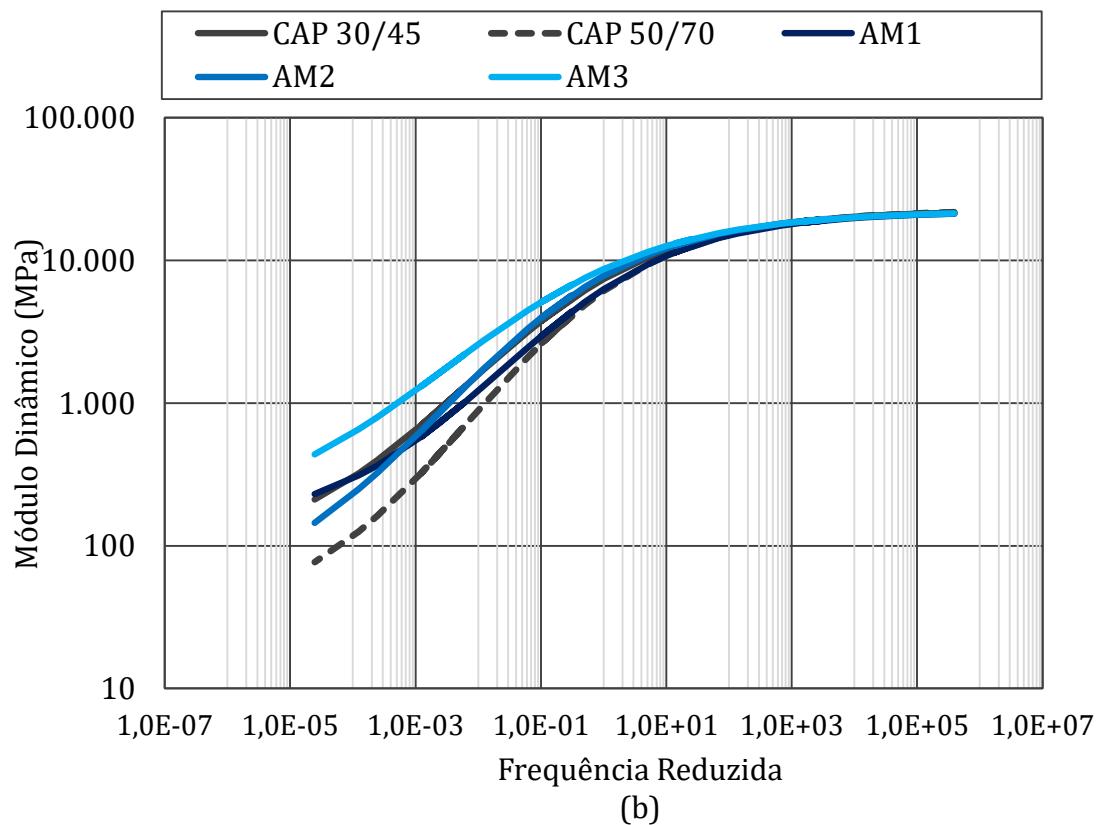
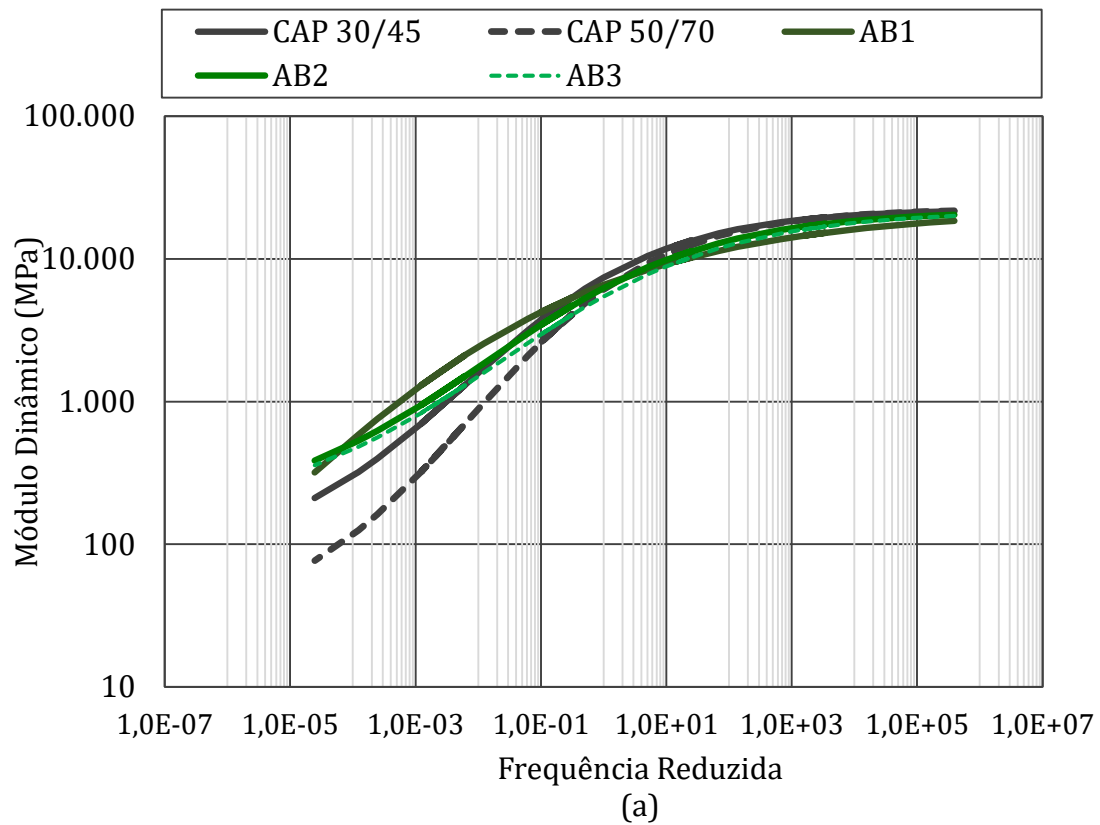


Figura 5.45: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos (SP)

(a) Com ligante asfáltico modificado por borracha; (b) Com ligantes asfálticos de alto módulo

Tabela 5.32: Resultados de Módulo Dinâmico ( $E^*$ ) e frequência reduzida para construção das curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| Mistura Asfáltica        | 73          | 74          | 75          | 76          | 77          | 78          | 79          | 80          | 81          | 82          | 83          | 84          |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ligante Asfáltico        | CAP 30/45   | CAP 50/70   | AMP1        | AMP2        | AMP3        | AMP4        | AB1         | AB2         | AB3         | AM1         | AM2         | AM3         |
| Frequência Reduzida (Hz) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) |
| 3.92E+05                 | 19,281      | 20,194      | 19,017      | 19,710      | 20,419      | 19,490      | 19,819      | 20,084      | 19,514      | 21,011      | 21,647      | 21,697      |
| 1.57E+05                 | 18,896      | 19,850      | 18,483      | 19,265      | 20,025      | 19,026      | 19,361      | 19,710      | 19,032      | 20,768      | 21,508      | 21,598      |
| 7.84E+04                 | 18,567      | 19,536      | 18,017      | 18,866      | 19,668      | 18,616      | 18,955      | 19,373      | 18,608      | 20,540      | 21,375      | 21,503      |
| 1.57E+04                 | 17,668      | 18,582      | 16,700      | 17,696      | 18,607      | 17,437      | 17,792      | 18,368      | 17,398      | 19,817      | 20,935      | 21,198      |
| 7.84E+03                 | 17,216      | 18,056      | 16,024      | 17,074      | 18,034      | 16,822      | 17,184      | 17,824      | 16,770      | 19,401      | 20,672      | 21,017      |
| 1.57E+03                 | 15,997      | 16,512      | 14,194      | 15,323      | 16,389      | 15,123      | 15,507      | 16,262      | 15,046      | 18,121      | 19,822      | 20,440      |
| 3.42E+03                 | 16,617      | 17,319      | 15,125      | 16,226      | 17,242      | 15,994      | 16,366      | 17,073      | 15,928      | 18,801      | 20,280      | 20,751      |
| 1.37E+03                 | 15,882      | 16,358      | 14,022      | 15,154      | 16,227      | 14,961      | 15,347      | 16,108      | 14,882      | 17,989      | 19,732      | 20,378      |
| 6.84E+02                 | 15,271      | 15,523      | 13,117      | 14,250      | 15,359      | 14,101      | 14,497      | 15,282      | 14,014      | 17,257      | 19,219      | 20,030      |
| 1.37E+02                 | 13,670      | 13,222      | 10,827      | 11,878      | 13,023      | 11,876      | 12,296      | 13,052      | 11,777      | 15,131      | 17,634      | 18,946      |
| 6.84E+01                 | 12,903      | 12,092      | 9,791       | 10,768      | 11,901      | 10,845      | 11,275      | 11,977      | 10,745      | 14,029      | 16,758      | 18,335      |
| 1.37E+01                 | 10,968      | 9,266       | 7,398       | 8,127       | 9,156       | 8,403       | 8,847       | 9,332       | 8,306       | 11,112      | 14,254      | 16,519      |
| 2.50E+01                 | 11,717      | 10,346      | 8,283       | 9,115       | 10,196      | 9,317       | 9,757       | 10,337      | 9,218       | 12,254      | 15,268      | 17,269      |
| 1.00E+01                 | 10,571      | 8,704       | 6,950       | 7,622       | 8,619       | 7,936       | 8,381       | 8,811       | 7,840       | 10,505      | 13,697      | 16,096      |
| 5.00E+00                 | 9,673       | 7,474       | 5,995       | 6,538       | 7,450       | 6,929       | 7,373       | 7,673       | 6,835       | 9,146       | 12,397      | 15,079      |
| 1.00E+00                 | 7,541       | 4,855       | 4,049       | 4,311       | 4,982       | 4,825       | 5,250       | 5,245       | 4,736       | 6,106       | 9,198       | 12,331      |
| 5.00E-01                 | 6,632       | 3,896       | 3,355       | 3,517       | 4,078       | 4,054       | 4,464       | 4,344       | 3,966       | 4,946       | 7,845       | 11,025      |
| 1.00E-01                 | 4,636       | 2,175       | 2,093       | 2,097       | 2,430       | 2,620       | 2,980       | 2,674       | 2,534       | 2,802       | 5,072       | 7,941       |
| 3.10E-01                 | 6,018       | 3,310       | 2,929       | 3,034       | 3,522       | 3,576       | 3,972       | 3,785       | 3,489       | 4,224       | 6,956       | 10,105      |
| 1.24E-01                 | 4,889       | 2,364       | 2,235       | 2,254       | 2,614       | 2,783       | 3,150       | 2,862       | 2,697       | 3,041       | 5,402       | 8,346       |
| 6.20E-02                 | 4,093       | 1,800       | 1,808       | 1,784       | 2,062       | 2,288       | 2,631       | 2,293       | 2,203       | 2,326       | 4,391       | 7,067       |
| 1.24E-02                 | 2,504       | 922         | 1,097       | 1,026       | 1,165       | 1,443       | 1,728       | 1,349       | 1,362       | 1,204       | 2,635       | 4,486       |
| 6.20E-03                 | 1,950       | 688         | 887         | 811         | 912         | 1,188       | 1,448       | 1,075       | 1,109       | 904         | 2,113       | 3,599       |
| 1.24E-03                 | 986         | 357         | 555         | 486         | 530         | 775         | 986         | 652         | 702         | 481         | 1,310       | 2,089       |
| 6.15E-03                 | 1,945       | 686         | 885         | 809         | 909         | 1,185       | 1,445       | 1,072       | 1,106       | 901         | 2,108       | 3,589       |
| 2.46E-03                 | 1,343       | 469         | 674         | 600         | 664         | 925         | 1,155       | 802         | 849         | 624         | 1,593       | 2,642       |
| 1.23E-03                 | 982         | 356         | 554         | 485         | 529         | 774         | 985         | 651         | 701         | 480         | 1,307       | 2,083       |
| 2.46E-04                 | 422         | 199         | 366         | 311         | 329         | 533         | 706         | 421         | 467         | 280         | 880         | 1,213       |
| 1.23E-04                 | 278         | 160         | 312         | 264         | 275         | 463         | 623         | 358         | 399         | 230         | 765         | 976         |
| 2.46E-05                 | 92          | 104         | 227         | 191         | 194         | 350         | 487         | 260         | 292         | 158         | 592         | 625         |

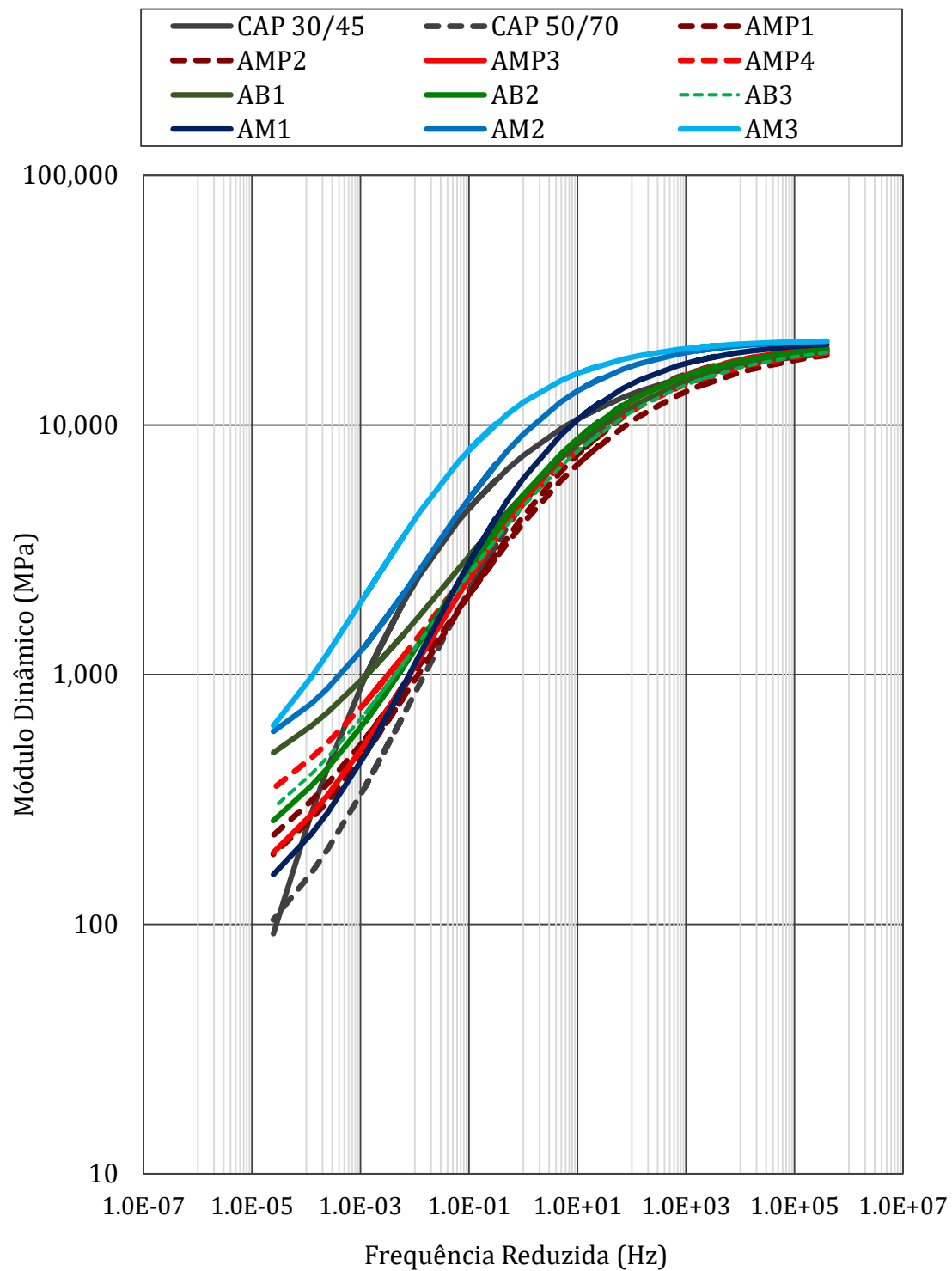


Figura 5.46: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro e os ligantes asfálticos estudados

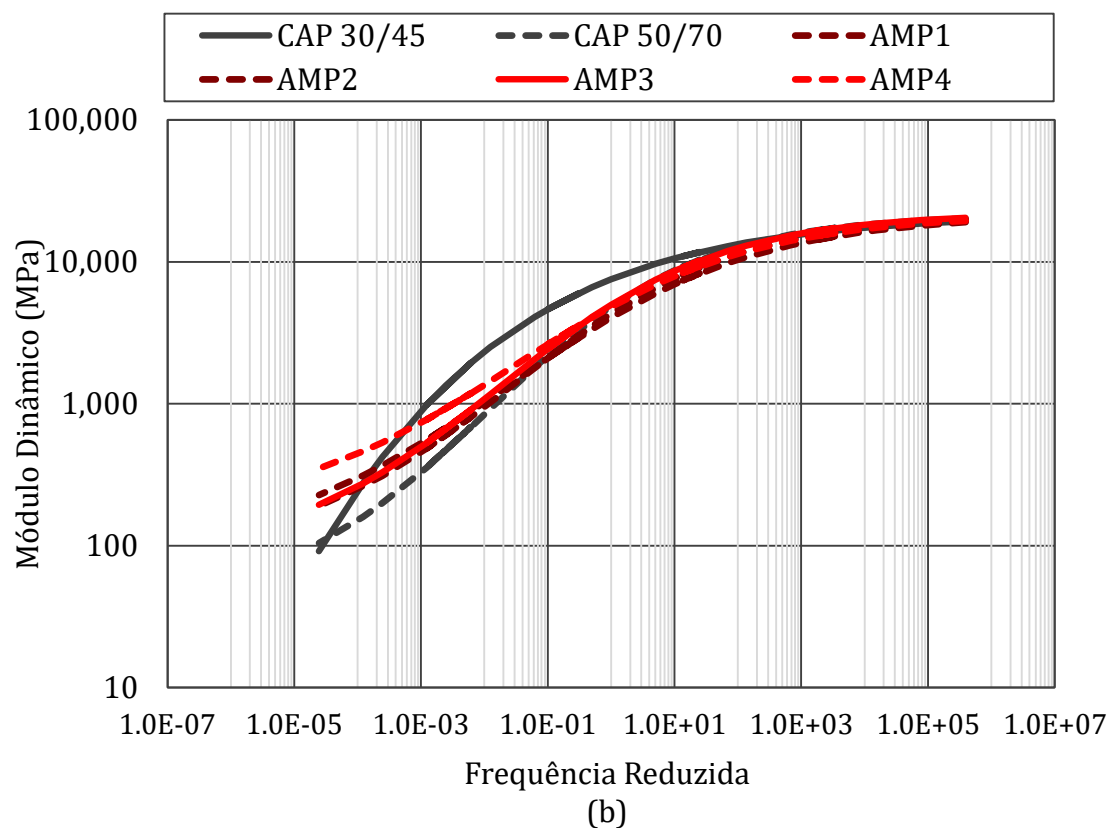
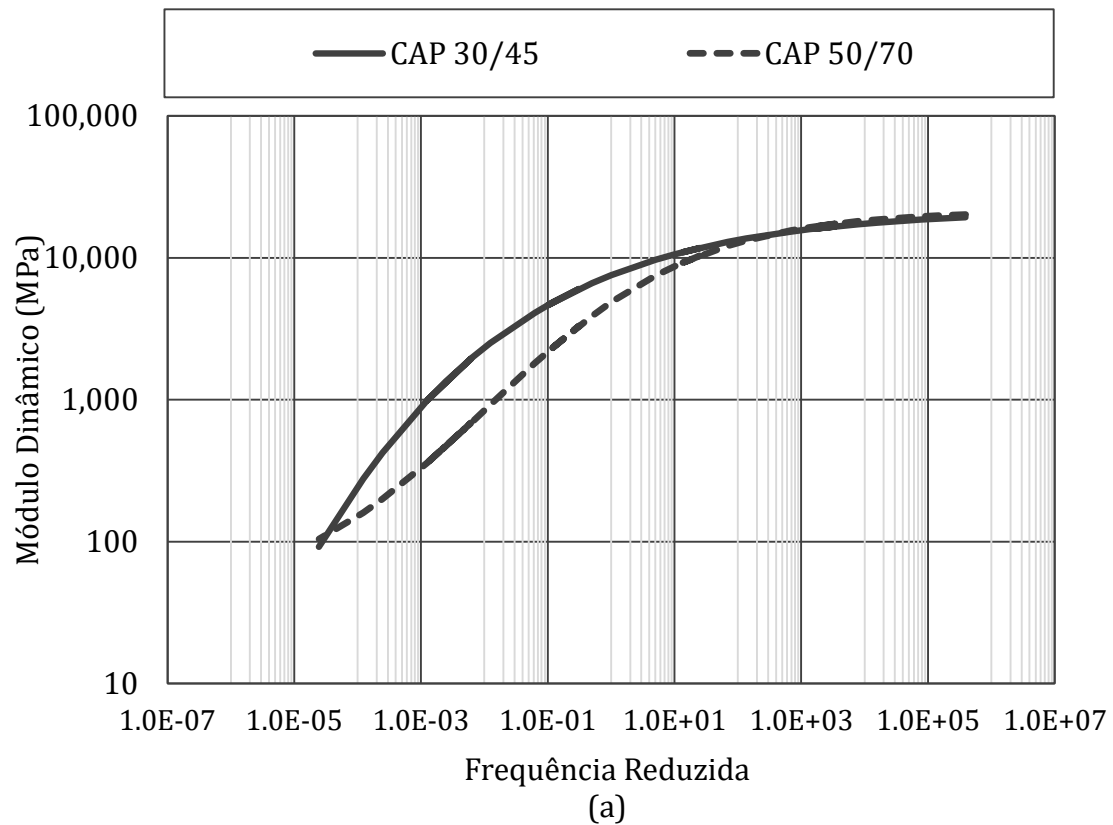


Figura 5.47: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos (RJ)

(a) Com CAP 30/45 e CAP 50/70; (b) Com ligantes asfálticos modificados por polímero

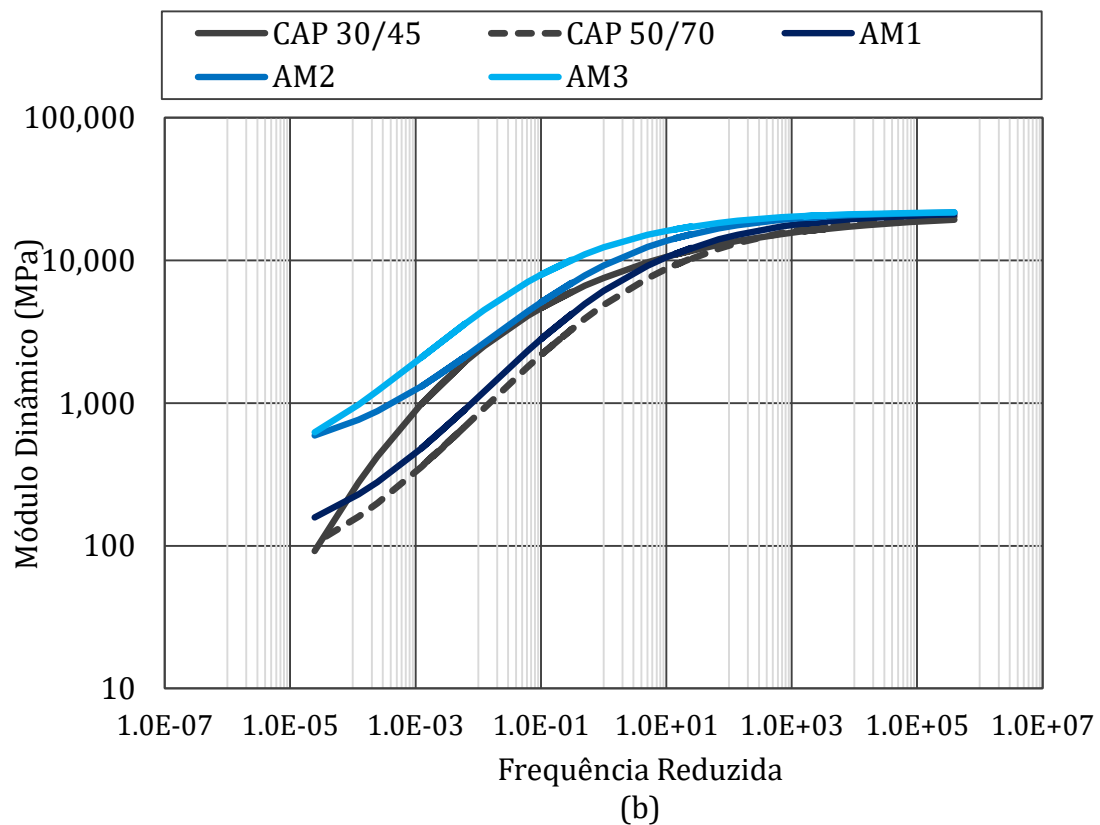
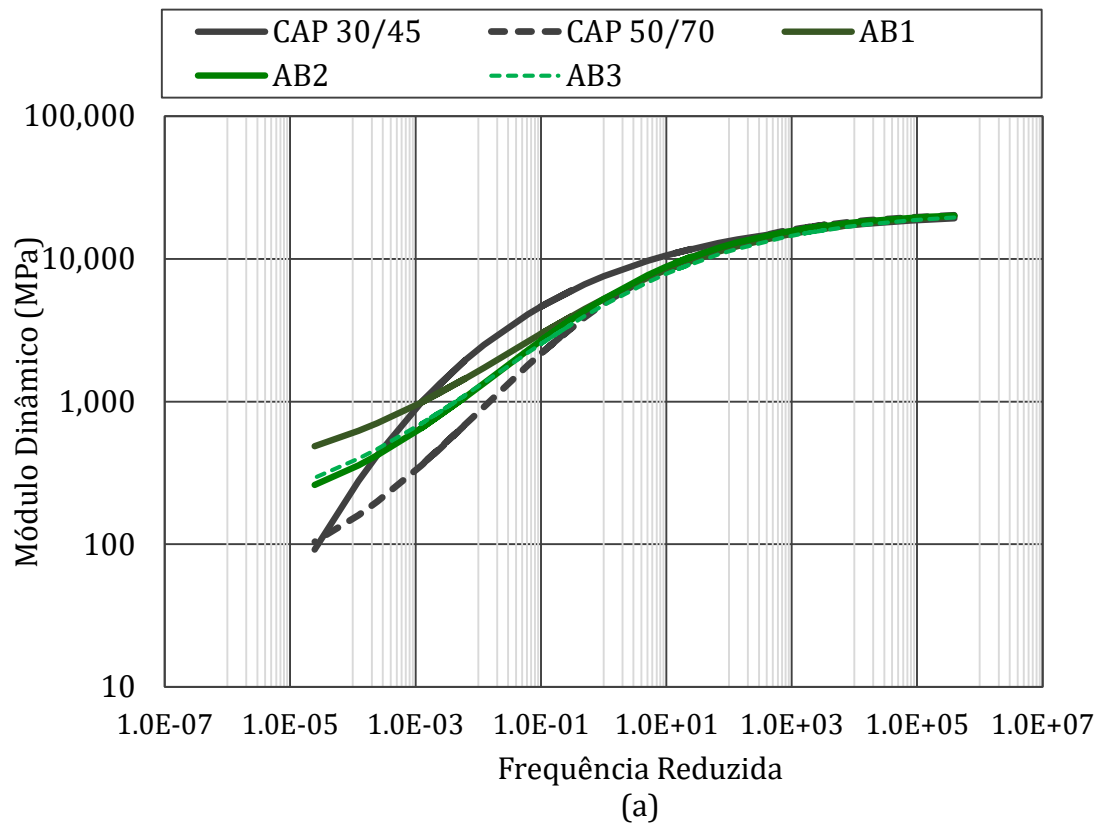


Figura 5.48: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos (RJ)

(a) Com ligante asfáltico modificado por borracha; (b) Com ligantes asfálticos de alto módulo

Tabela 5.33: Resultados de Módulo Dinâmico ( $E^*$ ) e frequência reduzida para construção das curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica        | 121         | 122         | 123         | 124         | 125         | 126         | 127         | 128         | 129         | 130         | 131         | 132         |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ligante Asfáltico        | CAP 30/45   | CAP 50/70   | AMP1        | AMP2        | AMP3        | AMP4        | AB1         | AB2         | AB3         | AM1         | AM2         | AM3         |
| Frequência Reduzida (Hz) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) |
| 3,92E+05                 | 20.145      | 20.200      | 19.784      | 19.631      | 19.341      | 18.994      | 17.950      | 18.467      | 18.984      | 19.550      | 19.314      | 20.142      |
| 1,57E+05                 | 20.013      | 20.083      | 19.563      | 19.430      | 19.027      | 18.717      | 17.523      | 18.079      | 18.635      | 19.331      | 19.117      | 20.058      |
| 7,84E+04                 | 19.884      | 19.965      | 19.353      | 19.235      | 18.737      | 18.459      | 17.141      | 17.727      | 18.314      | 19.125      | 18.934      | 19.976      |
| 1,57E+04                 | 19.454      | 19.549      | 18.678      | 18.594      | 17.840      | 17.650      | 16.027      | 16.679      | 17.332      | 18.472      | 18.361      | 19.696      |
| 7,84E+03                 | 19.193      | 19.283      | 18.286      | 18.212      | 17.338      | 17.192      | 15.437      | 16.112      | 16.788      | 18.096      | 18.035      | 19.521      |
| 1,57E+03                 | 18.337      | 18.369      | 17.066      | 16.993      | 15.842      | 15.807      | 13.785      | 14.491      | 15.196      | 16.937      | 17.037      | 18.935      |
| 3,42E+03                 | 18.801      | 18.872      | 17.716      | 17.647      | 16.628      | 16.538      | 14.635      | 15.331      | 16.027      | 17.553      | 17.566      | 19.256      |
| 1,37E+03                 | 18.245      | 18.267      | 16.939      | 16.864      | 15.692      | 15.666      | 13.626      | 14.332      | 15.038      | 16.817      | 16.934      | 18.871      |
| 6,84E+02                 | 17.721      | 17.678      | 16.236      | 16.144      | 14.871      | 14.894      | 12.780      | 13.481      | 14.181      | 16.152      | 16.364      | 18.500      |
| 1,37E+02                 | 16.078      | 15.765      | 14.181      | 13.997      | 12.592      | 12.717      | 10.575      | 11.216      | 11.856      | 14.208      | 14.695      | 17.300      |
| 6,84E+01                 | 15.162      | 14.669      | 13.115      | 12.867      | 11.466      | 11.628      | 9.553       | 10.145      | 10.737      | 13.194      | 13.817      | 16.606      |
| 1,37E+01                 | 12.525      | 11.501      | 10.309      | 9.875       | 8.658       | 8.872       | 7.142       | 7.584       | 8.026       | 10.486      | 11.422      | 14.514      |
| 2,50E+01                 | 13.593      | 12.782      | 11.403      | 11.042      | 9.729       | 9.929       | 8.040       | 8.543       | 9.046       | 11.550      | 12.374      | 15.379      |
| 1,00E+01                 | 11.937      | 10.803      | 9.729       | 9.258       | 8.104       | 8.321       | 6.686       | 7.095       | 7.503       | 9.917       | 10.906      | 14.029      |
| 5,00E+00                 | 10.571      | 9.209       | 8.439       | 7.892       | 6.896       | 7.117       | 5.710       | 6.046       | 6.381       | 8.637       | 9.725       | 12.873      |
| 1,00E+00                 | 7.269       | 5.609       | 5.608       | 4.964       | 4.373       | 4.574       | 3.728       | 3.913       | 4.098       | 5.741       | 6.908       | 9.883       |
| 5,00E-01                 | 5.917       | 4.283       | 4.550       | 3.913       | 3.473       | 3.659       | 3.029       | 3.165       | 3.301       | 4.624       | 5.747       | 8.560       |
| 1,00E-01                 | 3.303       | 2.055       | 2.635       | 2.106       | 1.905       | 2.052       | 1.792       | 1.856       | 1.919       | 2.548       | 3.413       | 5.748       |
| 3,10E-01                 | 5.052       | 3.492       | 3.900       | 3.283       | 2.931       | 3.106       | 2.607       | 2.715       | 2.823       | 3.925       | 4.992       | 7.673       |
| 1,24E-01                 | 3.599       | 2.282       | 2.846       | 2.297       | 2.074       | 2.225       | 1.928       | 1.998       | 2.068       | 2.779       | 3.688       | 6.090       |
| 6,20E-02                 | 2.708       | 1.621       | 2.216       | 1.735       | 1.574       | 1.709       | 1.522       | 1.573       | 1.625       | 2.087       | 2.851       | 5.038       |
| 1,24E-02                 | 1.315       | 731         | 1.230       | 908         | 815         | 918         | 872         | 904         | 936         | 1.013       | 1.444       | 3.171       |
| 6,20E-03                 | 954         | 532         | 964         | 699         | 617         | 708         | 689         | 718         | 747         | 733         | 1.048       | 2.607       |
| 1,24E-03                 | 468         | 284         | 578         | 412         | 338         | 409         | 413         | 441         | 468         | 353         | 484         | 1.726       |
| 6,15E-03                 | 950         | 530         | 961         | 697         | 615         | 706         | 687         | 716         | 746         | 731         | 1.044       | 2.601       |
| 2,46E-03                 | 628         | 363         | 711         | 509         | 433         | 511         | 510         | 538         | 566         | 479         | 673         | 2.038       |
| 1,23E-03                 | 467         | 283         | 577         | 411         | 337         | 407         | 412         | 440         | 467         | 352         | 482         | 1.723       |
| 2,46E-04                 | 256         | 181         | 384         | 275         | 204         | 260         | 265         | 293         | 321         | 184         | 227         | 1.248       |
| 1,23E-04                 | 207         | 157         | 333         | 241         | 170         | 222         | 225         | 253         | 281         | 144         | 168         | 1.119       |
| 2,46E-05                 | 140         | 124         | 257         | 190         | 121         | 165         | 163         | 191         | 220         | 90          | 91          | 924         |

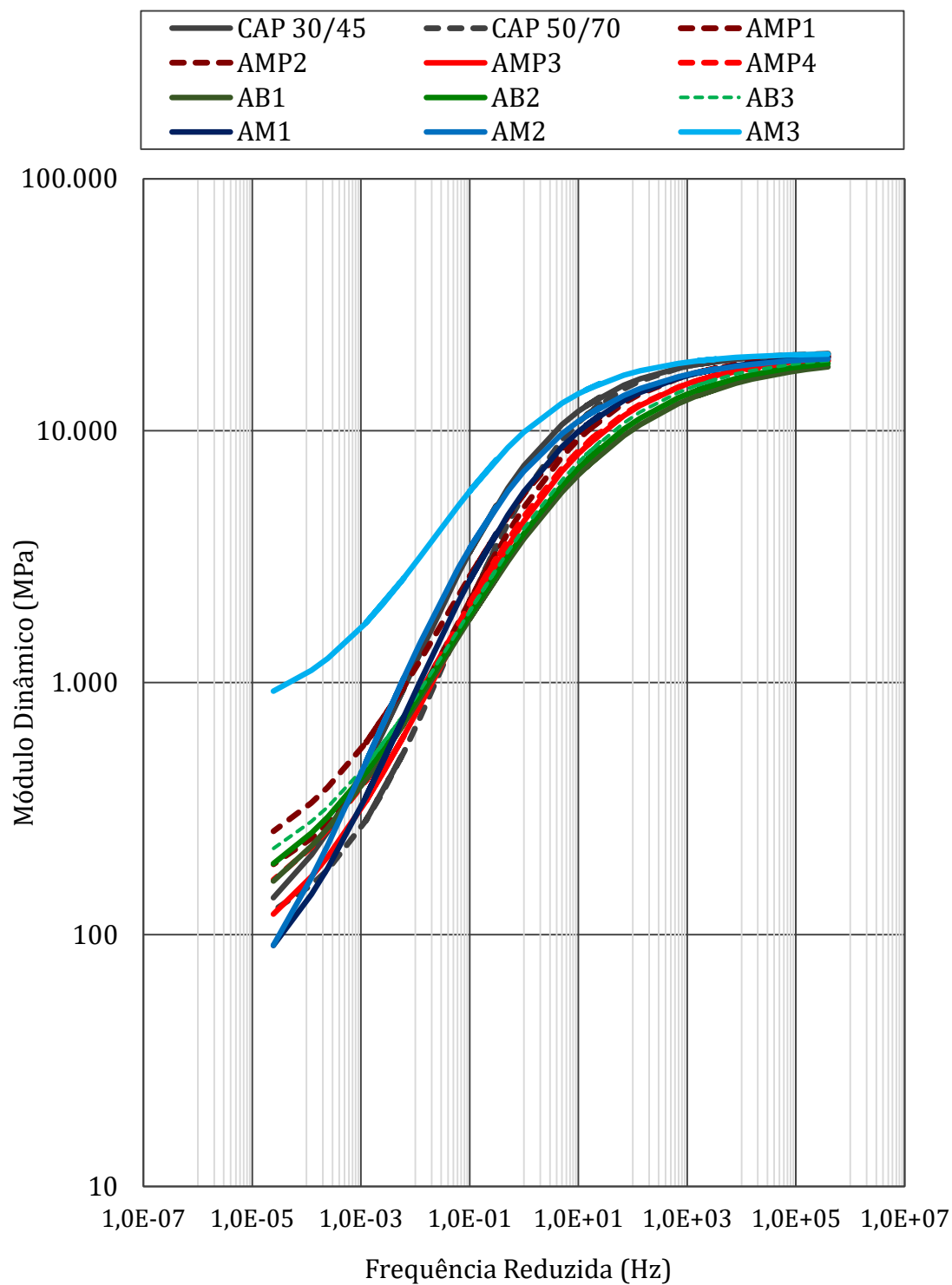


Figura 5.49: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo e os ligantes asfálticos estudados

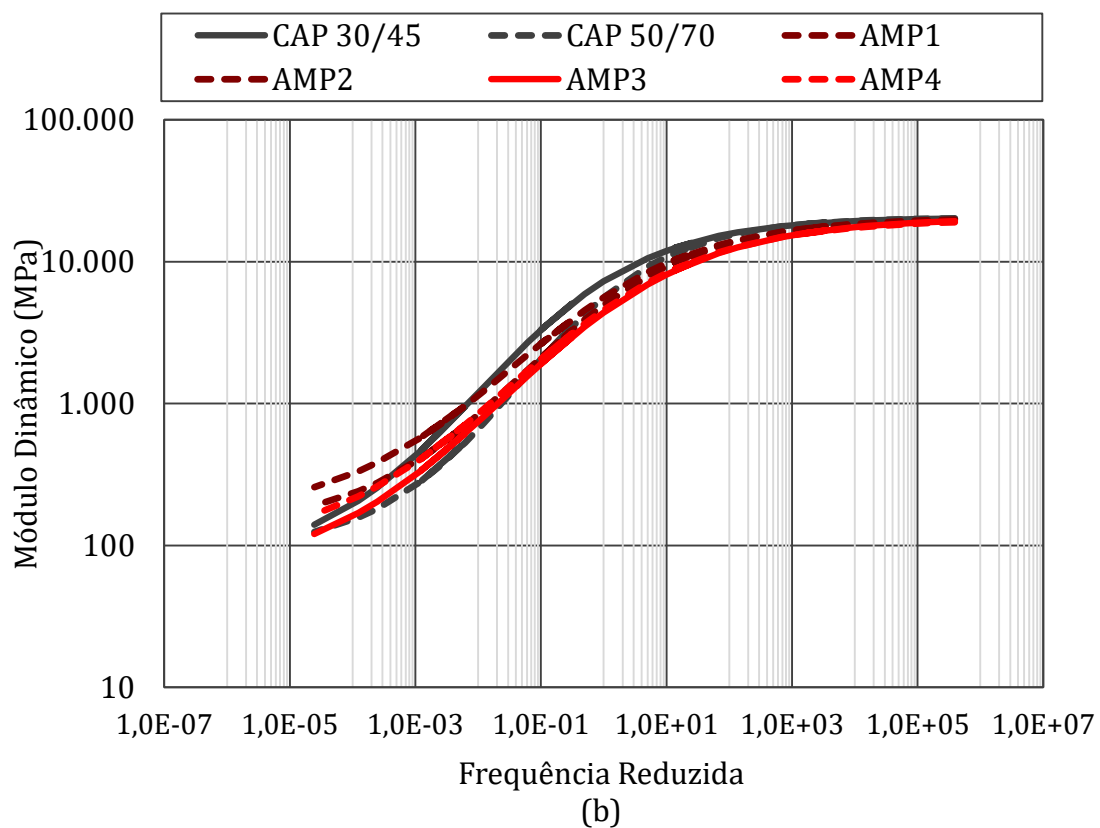
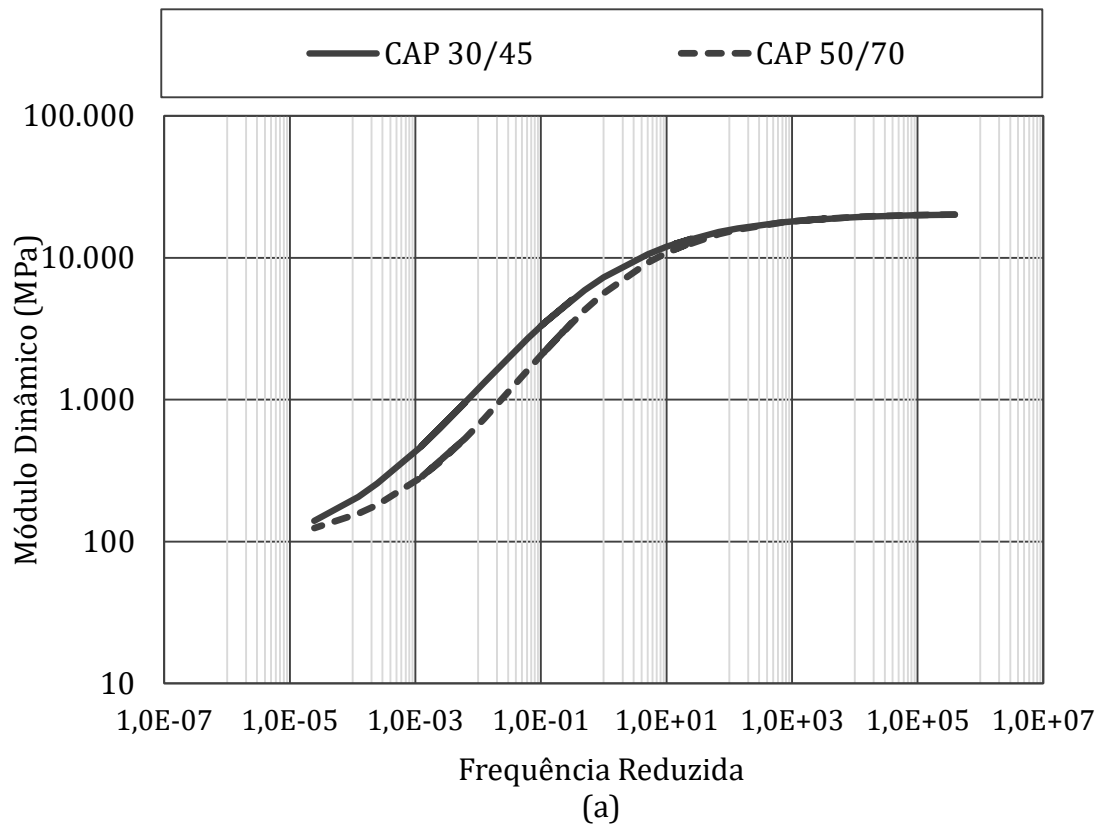


Figura 5.50: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados basálticos (SP)

(a) Com CAP 30/45 e CAP 50/70; (b) Com ligantes asfálticos modificados por polímero



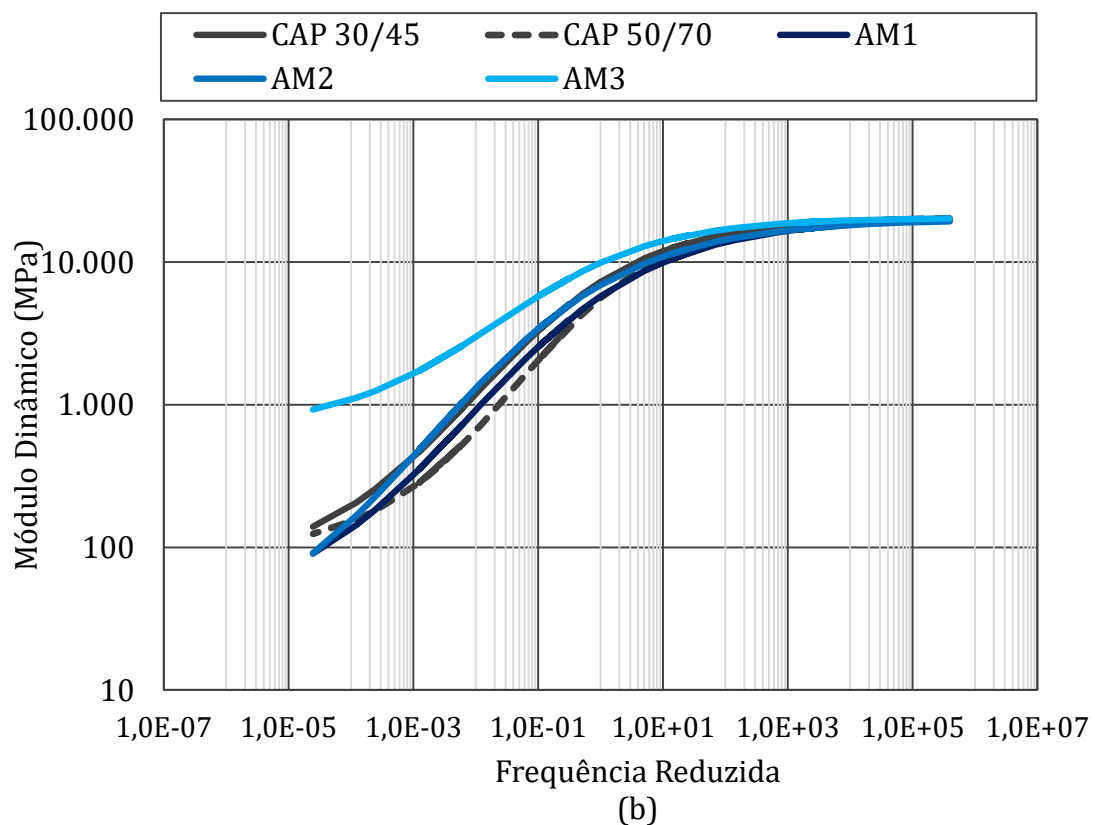
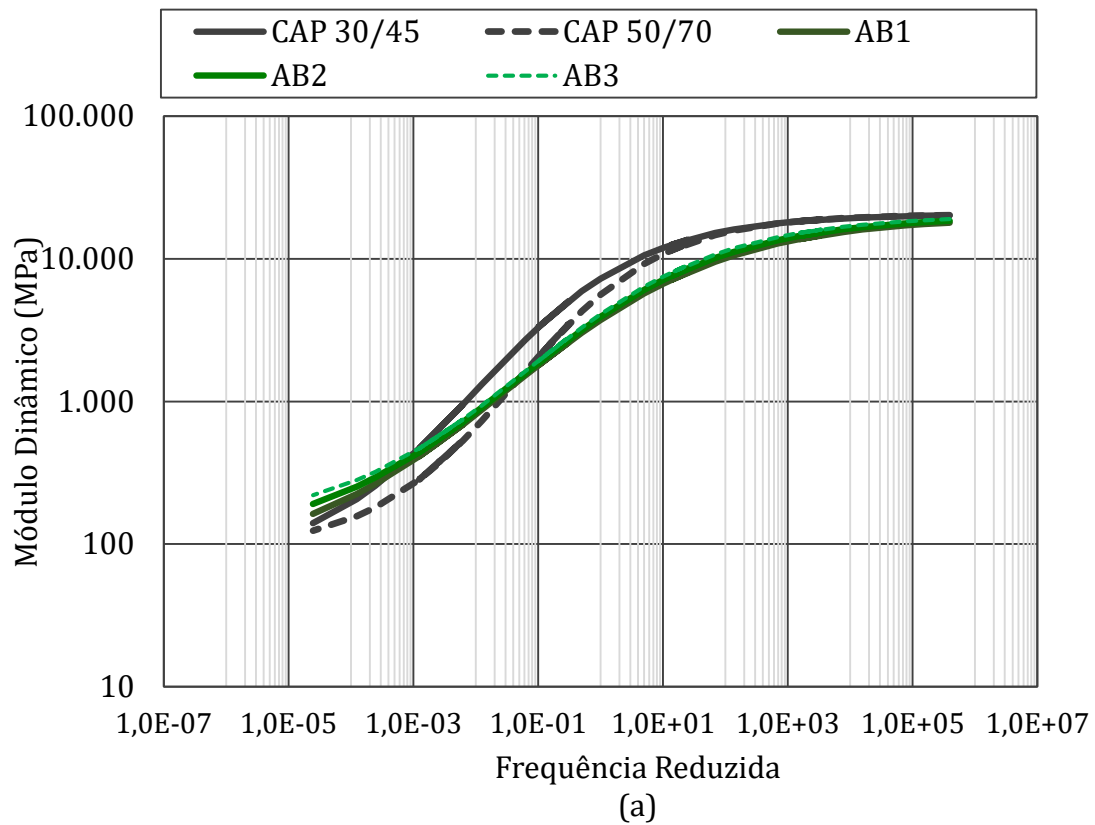


Figura 5.51: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados basálticos (SP)

(a) Com ligante asfáltico modificado por borracha; (b) Com ligantes asfálticos de alto módulo

### 3.2.4. Faixa Granulométrica *Gap Graded*

A Tabela 5.34 apresenta os resultados de  $E^*$  na frequência reduzida das misturas asfálticas com granulometria *Gap Graded*, agregados graníticos do Estado de São Paulo e com os doze tipos de ligantes asfálticos utilizados neste estudo. Esses dados foram utilizados para construir as curvas mestres apresentadas nas Figuras 5.52 a 5.54.

Na Tabela 5.35 apresentam-se os resultados de módulo dinâmico na frequência reduzida das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos do Estado do Rio de Janeiro até elaboração deste relatório parcial, e as respectivas curvas mestres desses resultados são mostradas nas Figuras 5.55 a 5.57.

Na Tabela 5.36 apresentam-se os resultados de módulo dinâmico na frequência reduzida das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos do Estado de São Paulo e as respectivas curvas mestres são mostradas nas Figuras 5.58 a 5.60.

Tabela 5.34: Resultados de Módulo Dinâmico ( $E^*$ ) e frequência reduzida para construção das curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica        | 37          | 38          | 39          | 40          | 41          | 42          | 43          | 44          | 45          | 46          | 47          | 48          |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ligante Asfáltico        | CAP 30/45   | CAP 50/70   | AMP1        | AMP2        | AMP3        | AMP4        | AB1         | AB2         | AB3         | AM1         | AM2         | AM3         |
| Frequência Reduzida (Hz) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) |
| 3,92E+05                 | 21.012      | 20.291      | 19.995      | 20.868      | 21.092      | 21.366      | 20.669      | 20.159      | 19.813      | 21.268      | 20.962      | 19.650      |
| 1,57E+05                 | 20.788      | 19.944      | 19.637      | 20.607      | 20.864      | 21.172      | 20.319      | 19.845      | 19.372      | 21.159      | 20.777      | 19.304      |
| 7,84E+04                 | 20.575      | 19.626      | 19.311      | 20.361      | 20.646      | 20.980      | 19.998      | 19.560      | 18.981      | 21.051      | 20.603      | 19.001      |
| 1,57E+04                 | 19.886      | 18.660      | 18.327      | 19.570      | 19.943      | 20.329      | 19.016      | 18.700      | 17.847      | 20.684      | 20.052      | 18.141      |
| 7,84E+03                 | 19.482      | 18.128      | 17.788      | 19.112      | 19.531      | 19.930      | 18.472      | 18.230      | 17.249      | 20.456      | 19.734      | 17.694      |
| 1,57E+03                 | 18.216      | 16.564      | 16.221      | 17.692      | 18.239      | 18.626      | 16.869      | 16.853      | 15.578      | 19.690      | 18.746      | 16.452      |
| 3,42E+03                 | 18.892      | 17.382      | 17.038      | 18.447      | 18.929      | 19.332      | 17.708      | 17.572      | 16.437      | 20.108      | 19.273      | 17.091      |
| 1,37E+03                 | 18.083      | 16.408      | 16.066      | 17.545      | 18.104      | 18.486      | 16.709      | 16.716      | 15.417      | 19.606      | 18.643      | 16.332      |
| 6,84E+02                 | 17.345      | 15.560      | 15.227      | 16.730      | 17.352      | 17.696      | 15.838      | 15.972      | 14.558      | 19.123      | 18.069      | 15.691      |
| 1,37E+02                 | 15.158      | 13.219      | 12.944      | 14.369      | 15.138      | 15.302      | 13.442      | 13.910      | 12.301      | 17.573      | 16.360      | 13.973      |
| 6,84E+01                 | 14.008      | 12.067      | 11.837      | 13.157      | 13.980      | 14.030      | 12.267      | 12.887      | 11.240      | 16.685      | 15.445      | 13.139      |
| 1,37E+01                 | 10.930      | 9.180       | 9.106       | 10.012      | 10.908      | 10.670      | 9.349       | 10.280      | 8.682       | 14.061      | 12.908      | 11.020      |
| 2,50E+01                 | 12.139      | 10.284      | 10.143      | 11.229      | 12.109      | 11.977      | 10.460      | 11.286      | 9.646       | 15.136      | 13.923      | 11.840      |
| 1,00E+01                 | 10.286      | 8.605       | 8.569       | 9.372       | 10.271      | 9.984       | 8.773       | 9.750       | 8.187       | 13.464      | 12.355      | 10.585      |
| 5,00E+00                 | 8.843       | 7.346       | 7.400       | 7.964       | 8.851       | 8.479       | 7.518       | 8.572       | 7.111       | 12.060      | 11.077      | 9.606       |
| 1,00E+00                 | 5.645       | 4.670       | 4.931       | 4.964       | 5.735       | 5.344       | 4.879       | 5.954       | 4.840       | 8.579       | 7.984       | 7.322       |
| 5,00E-01                 | 4.449       | 3.696       | 4.030       | 3.887       | 4.580       | 4.255       | 3.926       | 4.942       | 4.002       | 7.120       | 6.689       | 6.373       |
| 1,00E-01                 | 2.321       | 1.968       | 2.398       | 2.033       | 2.519       | 2.435       | 2.234       | 3.007       | 2.450       | 4.229       | 4.055       | 4.367       |
| 3,10E-01                 | 3.718       | 3.103       | 3.477       | 3.241       | 3.873       | 3.614       | 3.347       | 4.303       | 3.482       | 6.174       | 5.842       | 5.744       |
| 1,24E-01                 | 2.550       | 2.155       | 2.579       | 2.229       | 2.742       | 2.625       | 2.419       | 3.229       | 2.625       | 4.563       | 4.367       | 4.615       |
| 6,20E-02                 | 1.871       | 1.599       | 2.036       | 1.651       | 2.079       | 2.067       | 1.868       | 2.555       | 2.095       | 3.554       | 3.413       | 3.844       |
| 1,24E-02                 | 870         | 757         | 1.161       | 805         | 1.073       | 1.242       | 1.007       | 1.426       | 1.212       | 1.922       | 1.788       | 2.377       |
| 6,20E-03                 | 624         | 542         | 915         | 595         | 814         | 1.029       | 775         | 1.100       | 955         | 1.479       | 1.322       | 1.888       |
| 1,24E-03                 | 300         | 252         | 546         | 312         | 453         | 723         | 439         | 607         | 558         | 849         | 648         | 1.059       |
| 6,15E-03                 | 621         | 540         | 913         | 593         | 811         | 1.027       | 773         | 1.096       | 952         | 1.474       | 1.318       | 1.883       |
| 2,46E-03                 | 406         | 348         | 675         | 406         | 574         | 828         | 555         | 779         | 698         | 1.062       | 877         | 1.364       |
| 1,23E-03                 | 299         | 251         | 545         | 312         | 451         | 722         | 438         | 605         | 556         | 847         | 645         | 1.056       |
| 2,46E-04                 | 162         | 125         | 351         | 185         | 282         | 568         | 271         | 351         | 341         | 547         | 329         | 569         |
| 1,23E-04                 | 130         | 96          | 298         | 154         | 239         | 527         | 227         | 284         | 283         | 472         | 253         | 434         |
| 2,46E-05                 | 86          | 56          | 219         | 110         | 177         | 466         | 162         | 186         | 193         | 364         | 149         | 233         |

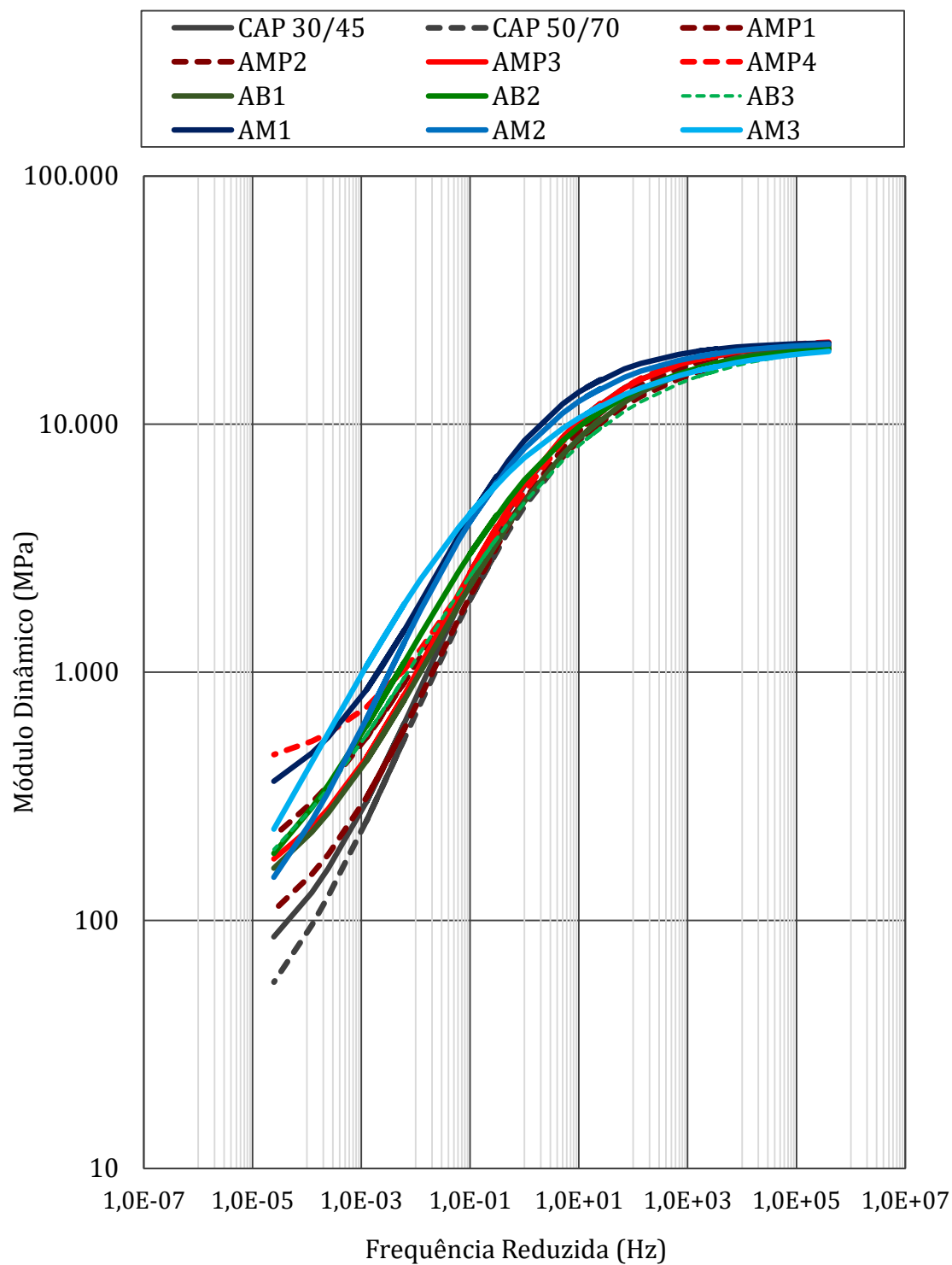


Figura 5.52: Curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado de São Paulo e os ligantes asfálticos estudados

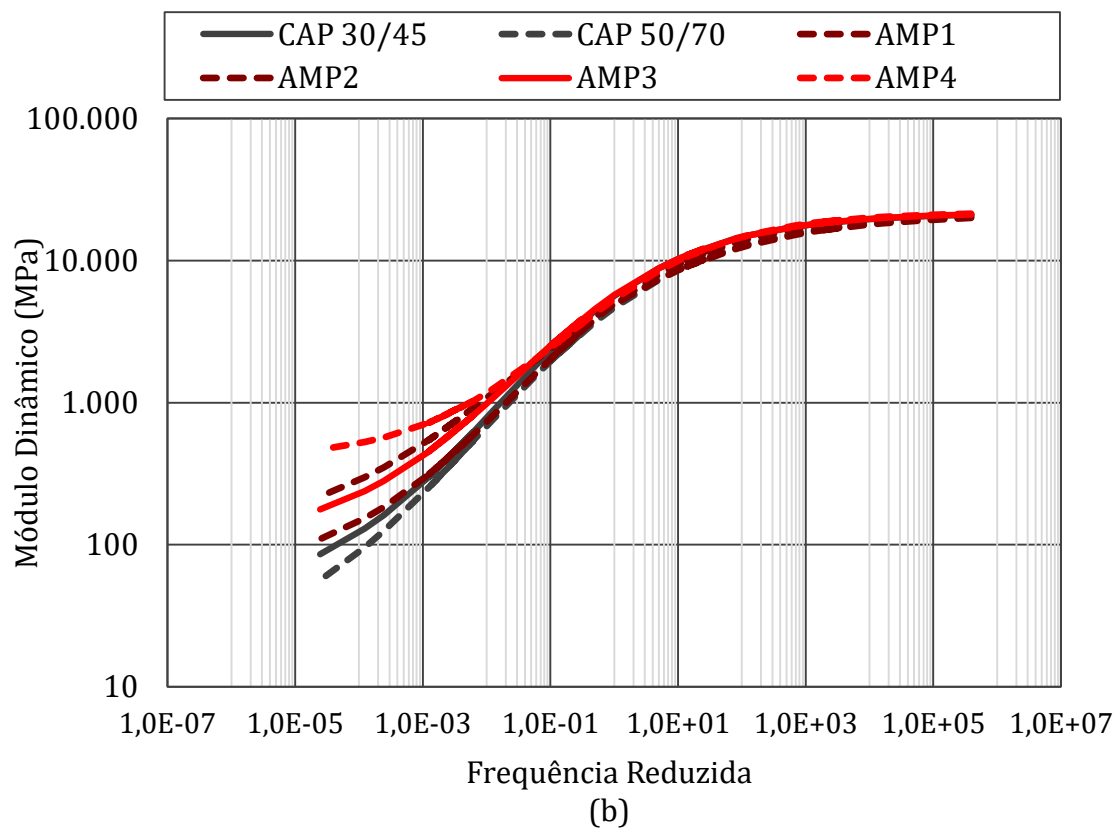
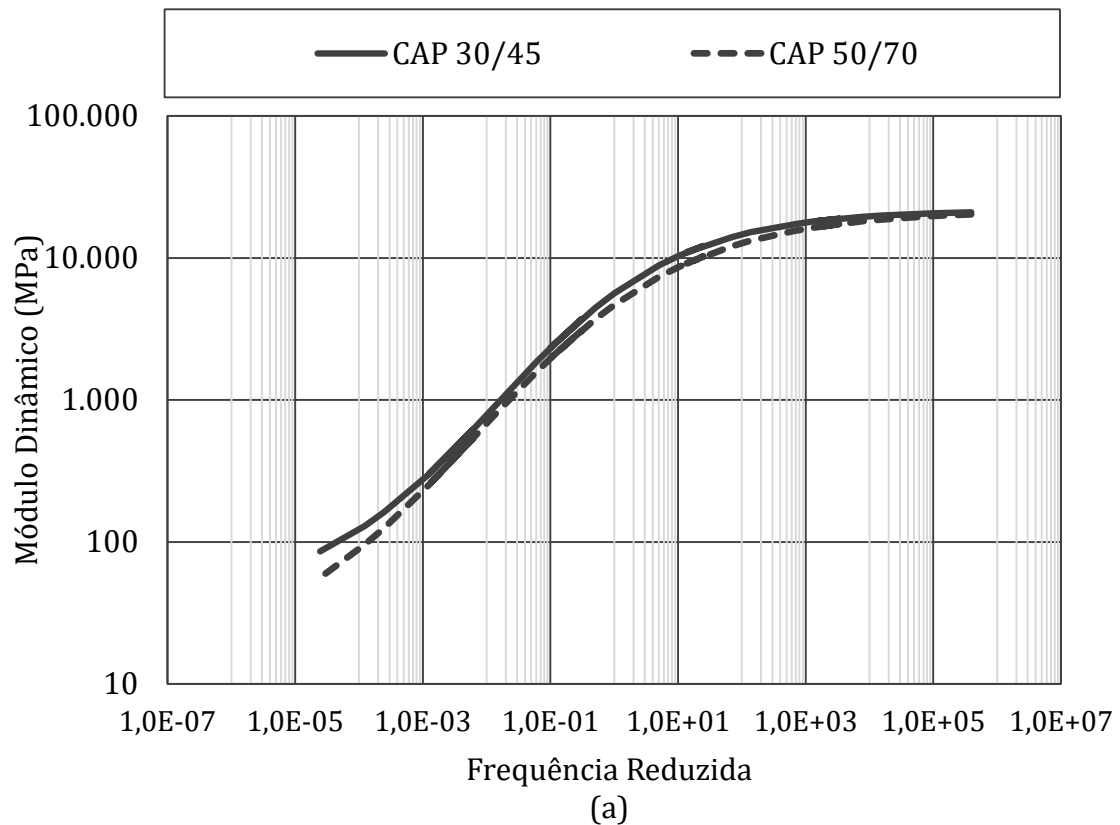


Figura 5.53: Curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos (SP)

(a) Com CAP 30/45 e CAP 50/70; (b) Com ligantes asfálticos modificados por polímero

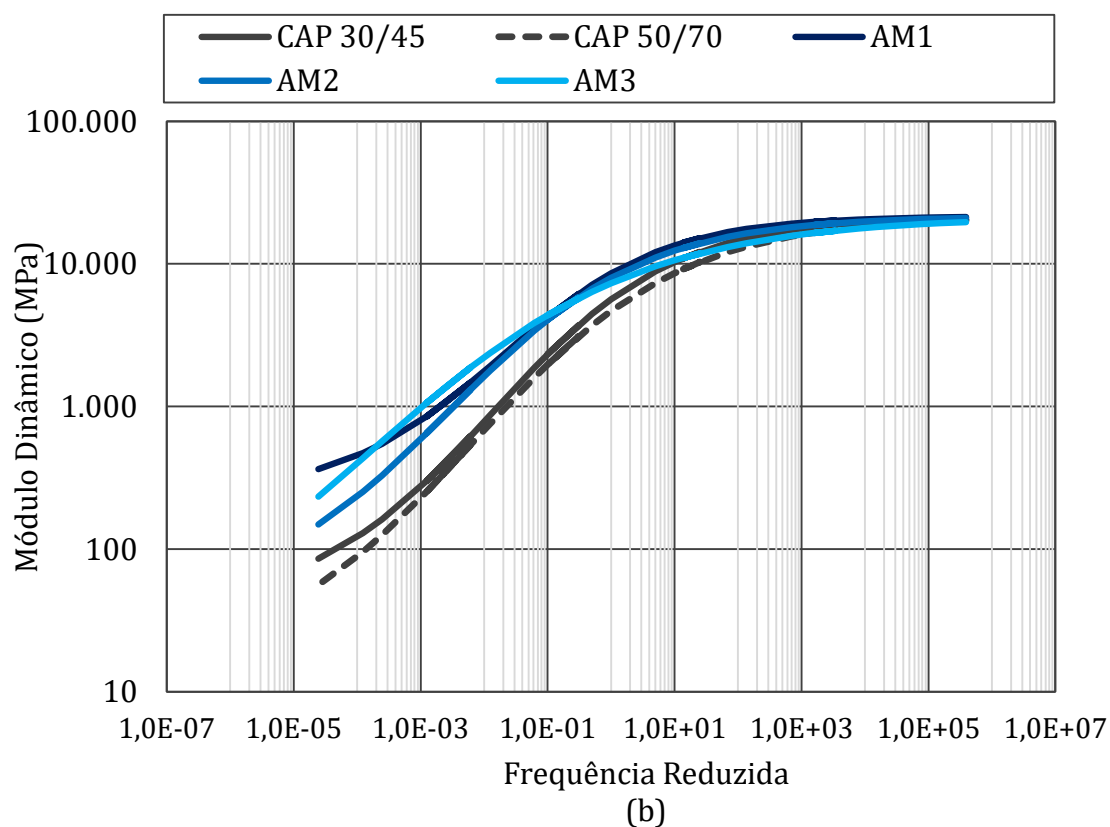
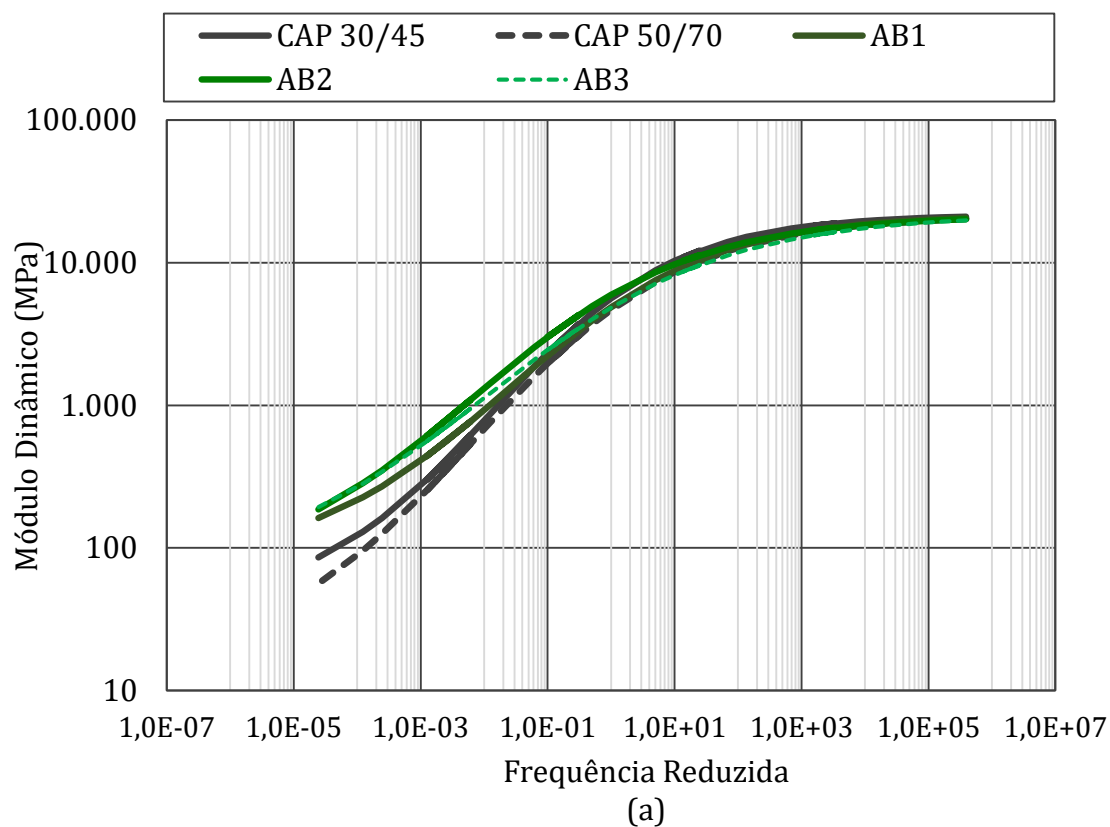


Figura 5.54: Curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos (SP)

(a) Com ligante asfáltico modificado por borracha; (b) Com ligantes asfálticos de alto módulo

Tabela 5.35: Resultados de Módulo Dinâmico ( $E^*$ ) e frequência reduzida para construção das curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| Mistura Asfáltica        | 85          | 86          | 87          | 88          | 89          | 90          | 91          | 92          | 93          | 94          | 95          | 96          |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ligante Asfáltico        | CAP 30/45   | CAP 50/70   | AMP1        | AMP2        | AMP3        | AMP4        | AB1         | AB2         | AB3         | AM1         | AM2         | AM3         |
| Frequência Reduzida (Hz) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) |
| 3.92E+05                 | 21,243      | 21,678      | 20,496      | 21,432      | 21,081      | 22,051      | 20,434      | 20,795      | 19,712      | 21,910      | 21,556      | 22,321      |
| 1.57E+05                 | 20,939      | 21,444      | 20,122      | 21,163      | 20,729      | 21,840      | 20,006      | 20,424      | 19,218      | 21,780      | 21,361      | 22,258      |
| 7.84E+04                 | 20,662      | 21,224      | 19,792      | 20,920      | 20,408      | 21,635      | 19,623      | 20,082      | 18,785      | 21,653      | 21,179      | 22,194      |
| 1.57E+04                 | 19,820      | 20,532      | 18,844      | 20,198      | 19,449      | 20,957      | 18,505      | 19,038      | 17,553      | 21,228      | 20,603      | 21,964      |
| 7.84E+03                 | 19,356      | 20,135      | 18,345      | 19,804      | 18,926      | 20,551      | 17,911      | 18,460      | 16,917      | 20,970      | 20,271      | 21,814      |
| 1.57E+03                 | 17,987      | 18,913      | 16,951      | 18,657      | 17,410      | 19,249      | 16,234      | 16,759      | 15,175      | 20,121      | 19,247      | 21,281      |
| 3.42E+03                 | 18,704      | 19,562      | 17,670      | 19,256      | 18,200      | 19,949      | 17,099      | 17,648      | 16,065      | 20,582      | 19,792      | 21,577      |
| 1.37E+03                 | 17,850      | 18,787      | 16,816      | 18,543      | 17,260      | 19,111      | 16,072      | 16,589      | 15,010      | 20,029      | 19,141      | 21,220      |
| 6.84E+02                 | 17,102      | 18,088      | 16,093      | 17,920      | 16,447      | 18,337      | 15,203      | 15,670      | 14,135      | 19,506      | 18,552      | 20,864      |
| 1.37E+02                 | 15,011      | 16,042      | 14,158      | 16,174      | 14,221      | 16,017      | 12,902      | 13,159      | 11,886      | 17,860      | 16,811      | 19,640      |
| 6.84E+01                 | 13,962      | 14,972      | 13,222      | 15,290      | 13,130      | 14,788      | 11,813      | 11,942      | 10,849      | 16,933      | 15,890      | 18,893      |
| 1.37E+01                 | 11,256      | 12,090      | 10,871      | 12,955      | 10,388      | 11,508      | 9,173       | 8,964       | 8,397       | 14,234      | 13,371      | 16,517      |
| 2.50E+01                 | 12,306      | 13,227      | 11,776      | 13,872      | 11,440      | 12,792      | 10,170      | 10,090      | 9,314       | 15,334      | 14,373      | 17,519      |
| 1.00E+01                 | 10,700      | 11,480      | 10,395      | 12,462      | 9,838       | 10,827      | 8,659       | 8,385       | 7,928       | 13,626      | 12,828      | 15,944      |
| 5.00E+00                 | 9,457       | 10,096      | 9,334       | 11,340      | 8,625       | 9,314       | 7,542       | 7,136       | 6,916       | 12,200      | 11,582      | 14,551      |
| 1.00E+00                 | 6,658       | 6,904       | 6,924       | 8,662       | 5,971       | 6,032       | 5,178       | 4,567       | 4,795       | 8,669       | 8,605       | 10,837      |
| 5.00E-01                 | 5,561       | 5,641       | 5,955       | 7,534       | 4,962       | 4,835       | 4,304       | 3,661       | 4,014       | 7,182       | 7,370       | 9,173       |
| 1.00E-01                 | 3,433       | 3,221       | 3,986       | 5,147       | 3,054       | 2,739       | 2,680       | 2,086       | 2,555       | 4,206       | 4,850       | 5,699       |
| 3.10E-01                 | 4,863       | 4,839       | 5,326       | 6,785       | 4,329       | 4,111       | 3,761       | 3,117       | 3,528       | 6,214       | 6,563       | 8,062       |
| 1.24E-01                 | 3,680       | 3,497       | 4,223       | 5,441       | 3,272       | 2,964       | 2,863       | 2,255       | 2,721       | 4,552       | 5,151       | 6,112       |
| 6.20E-02                 | 2,930       | 2,667       | 3,492       | 4,528       | 2,612       | 2,297       | 2,307       | 1,750       | 2,217       | 3,504       | 4,226       | 4,856       |
| 1.24E-02                 | 1,660       | 1,334       | 2,153       | 2,815       | 1,506       | 1,288       | 1,375       | 969         | 1,356       | 1,795       | 2,589       | 2,771       |
| 6.20E-03                 | 1,288       | 975         | 1,724       | 2,255       | 1,185       | 1,024       | 1,101       | 759         | 1,097       | 1,332       | 2,088       | 2,193       |
| 1.24E-03                 | 721         | 473         | 1,013       | 1,322       | 691         | 648         | 672         | 452         | 681         | 686         | 1,293       | 1,364       |
| 6.15E-03                 | 1,285       | 971         | 1,720       | 2,249       | 1,181       | 1,021       | 1,098       | 757         | 1,094       | 1,328       | 2,083       | 2,188       |
| 2.46E-03                 | 920         | 641         | 1,272       | 1,662       | 865         | 776         | 825         | 558         | 831         | 902         | 1,577       | 1,647       |
| 1.23E-03                 | 719         | 471         | 1,010       | 1,318       | 689         | 646         | 671         | 451         | 680         | 684         | 1,291       | 1,362       |
| 2.46E-04                 | 423         | 244         | 596         | 775         | 426         | 460         | 433         | 295         | 442         | 389         | 851         | 962         |
| 1.23E-04                 | 345         | 190         | 480         | 624         | 354         | 411         | 367         | 253         | 374         | 318         | 729         | 861         |
| 2.46E-05                 | 229         | 116         | 300         | 392         | 247         | 338         | 264         | 190         | 267         | 220         | 543         | 716         |

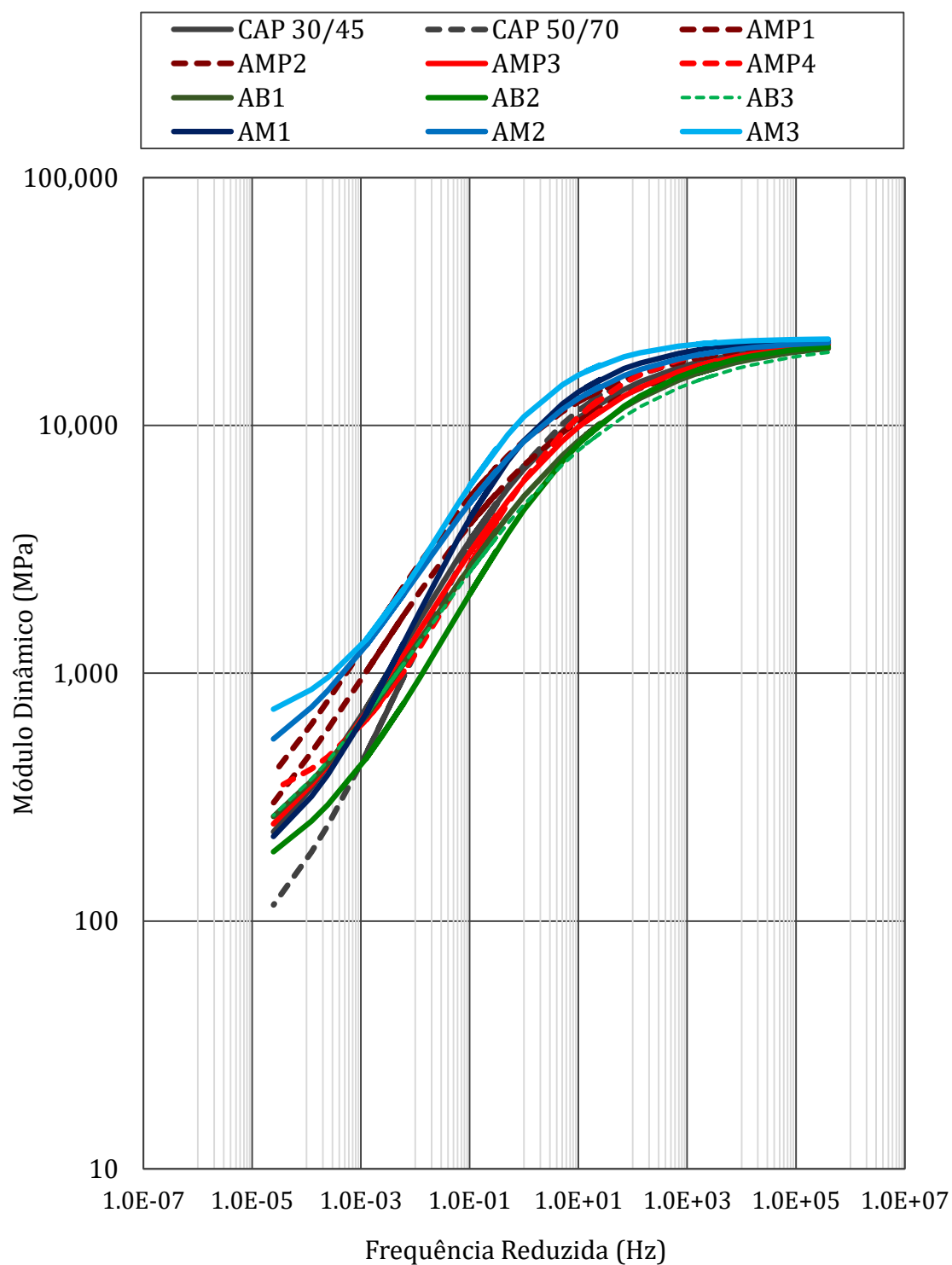


Figura 5.55: Curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Rio de Janeiro e os ligantes asfálticos estudados



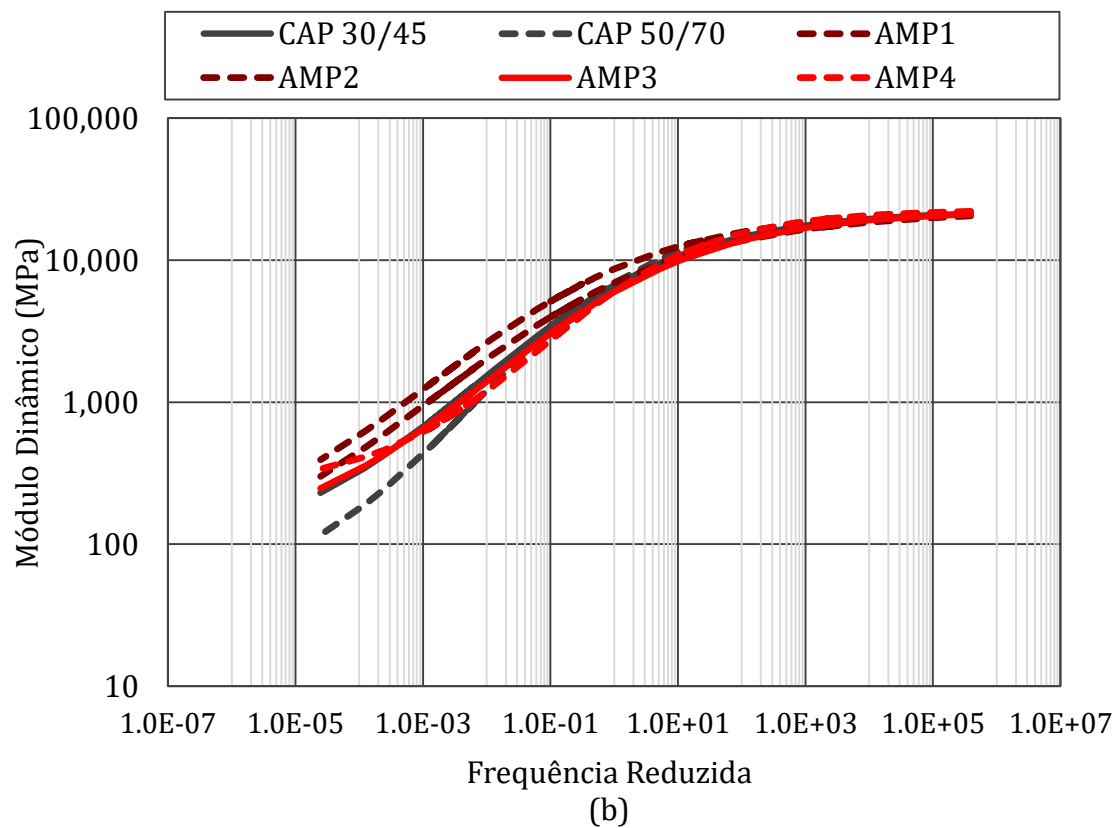
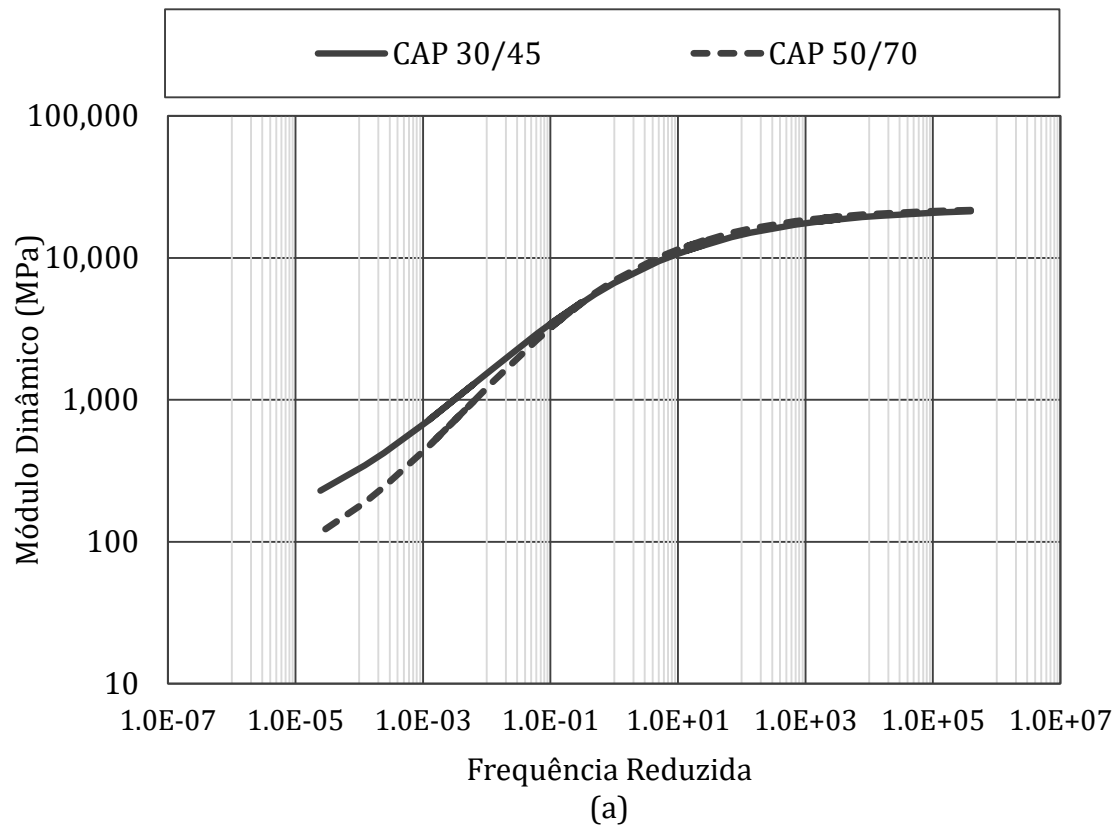


Figura 5.56: Curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos (RJ)

(a) Com CAP 30/45 e CAP 50/70; (b) Com ligantes asfálticos modificados por polímero

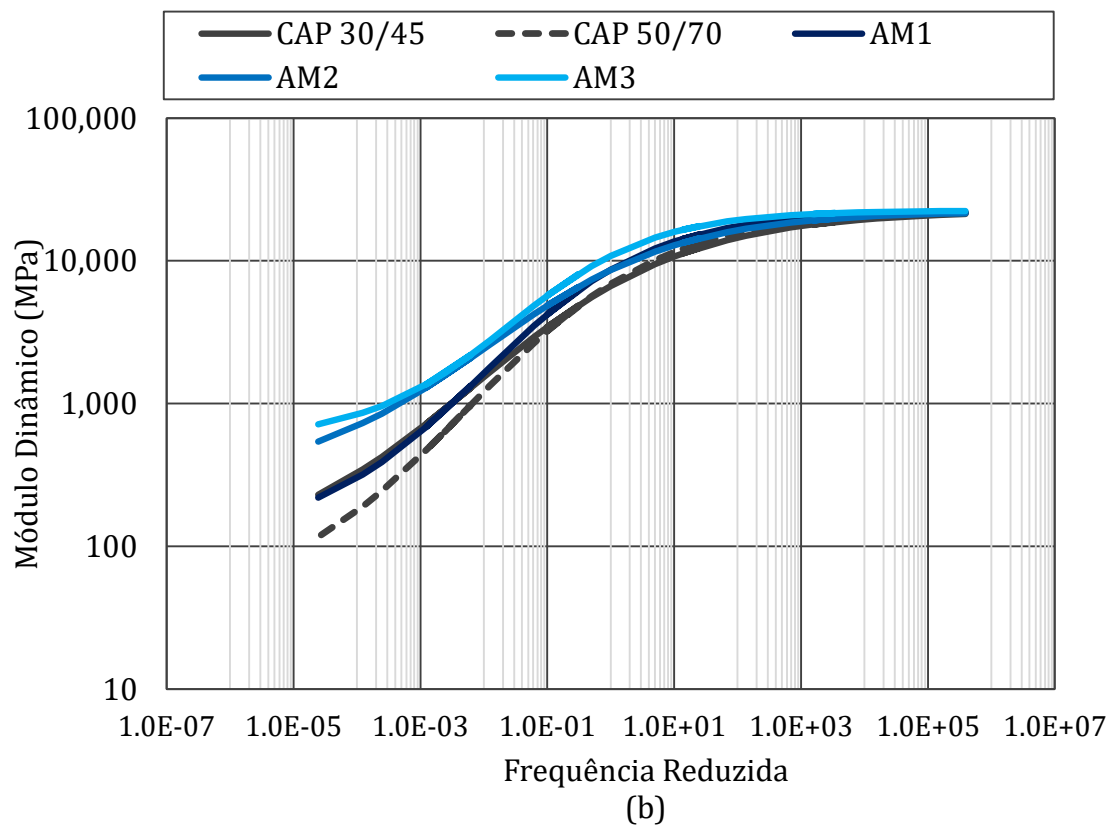
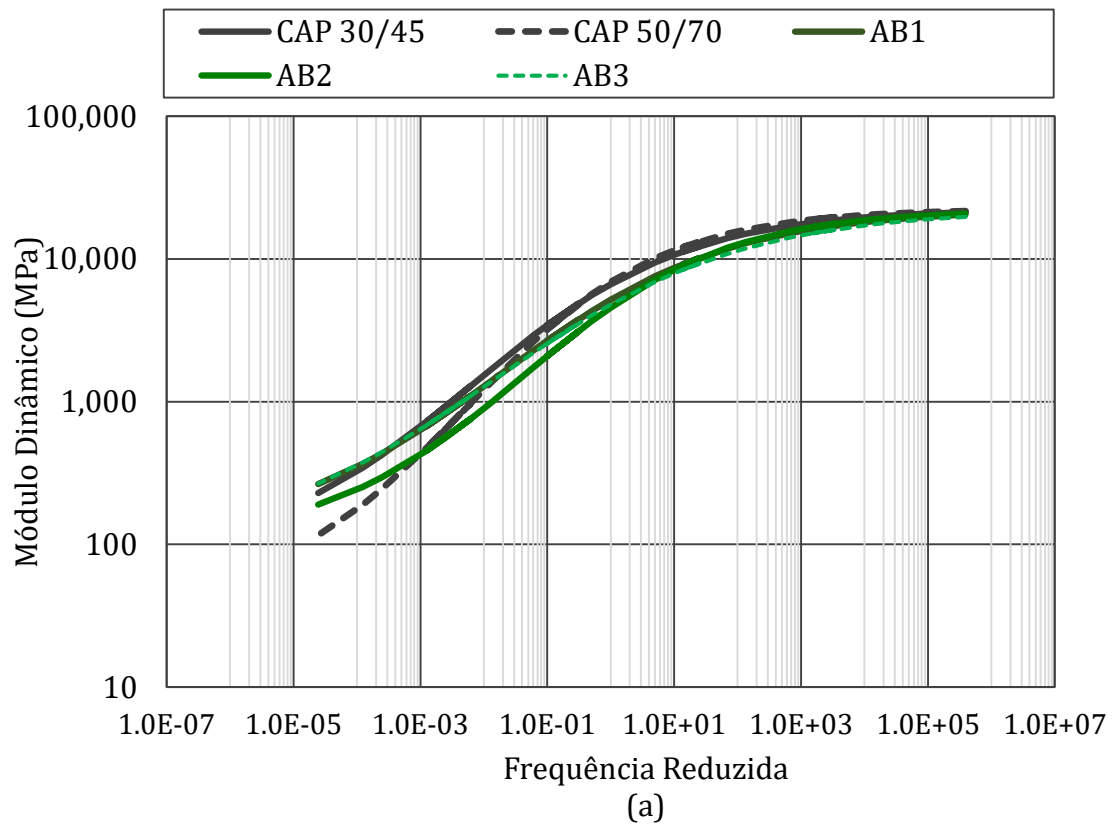


Figura 5.57: Curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos (RJ)  
(a) Com ligante asfáltico modificado por borracha; (b) Com ligantes asfálticos de alto módulo

Tabela 5.36: Resultados de Módulo Dinâmico ( $E^*$ ) e frequência reduzida para construção das curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica        | 133         | 134         | 135         | 136         | 137         | 138         | 139         | 140         | 141         | 142         | 143         | 144         |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ligante Asfáltico        | CAP 30/45   | CAP 50/70   | AMP1        | AMP2        | AMP3        | AMP4        | AB1         | AB2         | AB3         | AM1         | AM2         | AM3         |
| Frequência Reduzida (Hz) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) | $E^*$ (MPa) |
| 3,92E+05                 | 19.230      | 18.550      | 19.766      | 19.514      | 19.004      | 19.337      | 17.322      | 17.354      | 17.386      | 19.542      | 19.372      | 19.717      |
| 1,57E+05                 | 19.007      | 18.191      | 19.586      | 19.337      | 18.623      | 19.064      | 16.827      | 16.860      | 16.893      | 19.323      | 19.197      | 19.583      |
| 7,84E+04                 | 18.798      | 17.860      | 19.412      | 19.166      | 18.271      | 18.808      | 16.388      | 16.425      | 16.462      | 19.120      | 19.027      | 19.454      |
| 1,57E+04                 | 18.136      | 16.846      | 18.841      | 18.603      | 17.184      | 18.002      | 15.125      | 15.185      | 15.246      | 18.487      | 18.469      | 19.029      |
| 7,84E+03                 | 17.755      | 16.285      | 18.501      | 18.268      | 16.580      | 17.542      | 14.467      | 14.544      | 14.622      | 18.129      | 18.137      | 18.775      |
| 1,57E+03                 | 16.583      | 14.640      | 17.411      | 17.194      | 14.806      | 16.141      | 12.662      | 12.798      | 12.933      | 17.041      | 17.072      | 17.957      |
| 3,42E+03                 | 17.205      | 15.499      | 17.997      | 17.772      | 15.732      | 16.882      | 13.584      | 13.688      | 13.792      | 17.617      | 17.645      | 18.399      |
| 1,37E+03                 | 16.462      | 14.477      | 17.296      | 17.080      | 14.630      | 15.998      | 12.492      | 12.633      | 12.775      | 16.930      | 16.959      | 17.870      |
| 6,84E+02                 | 15.792      | 13.593      | 16.647      | 16.441      | 13.679      | 15.211      | 11.590      | 11.765      | 11.939      | 16.315      | 16.325      | 17.377      |
| 1,37E+02                 | 13.843      | 11.200      | 14.683      | 14.506      | 11.125      | 12.975      | 9.312       | 9.569       | 9.827       | 14.533      | 14.406      | 15.856      |
| 6,84E+01                 | 12.830      | 10.054      | 13.629      | 13.466      | 9.917       | 11.849      | 8.288       | 8.580       | 8.872       | 13.607      | 13.375      | 15.019      |
| 1,37E+01                 | 10.144      | 7.300       | 10.748      | 10.625      | 7.075       | 8.985       | 5.967       | 6.316       | 6.665       | 11.120      | 10.556      | 12.633      |
| 2,50E+01                 | 11.196      | 8.331       | 11.889      | 11.751      | 8.129       | 10.085      | 6.816       | 7.149       | 7.481       | 12.101      | 11.673      | 13.597      |
| 1,00E+01                 | 9.583       | 6.775       | 10.135      | 10.021      | 6.544       | 8.411       | 5.542       | 5.897       | 6.251       | 10.592      | 9.956       | 12.104      |
| 5,00E+00                 | 8.325       | 5.655       | 8.751       | 8.655       | 5.427       | 7.156       | 4.651       | 5.011       | 5.371       | 9.393       | 8.601       | 10.875      |
| 1,00E+00                 | 5.505       | 3.428       | 5.637       | 5.581       | 3.268       | 4.511       | 2.919       | 3.251       | 3.584       | 6.593       | 5.549       | 7.880       |
| 5,00E-01                 | 4.426       | 2.674       | 4.458       | 4.416       | 2.560       | 3.566       | 2.335       | 2.641       | 2.947       | 5.463       | 4.392       | 6.629       |
| 1,00E-01                 | 2.439       | 1.421       | 2.346       | 2.327       | 1.405       | 1.929       | 1.342       | 1.571       | 1.800       | 3.237       | 2.316       | 4.110       |
| 3,10E-01                 | 3.755       | 2.232       | 3.734       | 3.700       | 2.149       | 2.998       | 1.990       | 2.274       | 2.559       | 4.736       | 3.681       | 5.814       |
| 1,24E-01                 | 2.659       | 1.552       | 2.574       | 2.553       | 1.524       | 2.103       | 1.448       | 1.688       | 1.928       | 3.496       | 2.541       | 4.406       |
| 6,20E-02                 | 2.001       | 1.167       | 1.898       | 1.884       | 1.173       | 1.586       | 1.132       | 1.337       | 1.543       | 2.710       | 1.876       | 3.505       |
| 1,24E-02                 | 982         | 601         | 900         | 894         | 655         | 812         | 640         | 774         | 908         | 1.400       | 891         | 1.982       |
| 6,20E-03                 | 716         | 457         | 653         | 649         | 520         | 614         | 506         | 614         | 723         | 1.032       | 647         | 1.545       |
| 1,24E-03                 | 353         | 256         | 327         | 326         | 327         | 338         | 305         | 370         | 436         | 503         | 325         | 896         |
| 6,15E-03                 | 714         | 456         | 650         | 647         | 519         | 612         | 504         | 613         | 721         | 1.028       | 645         | 1.541       |
| 2,46E-03                 | 473         | 324         | 434         | 432         | 394         | 431         | 375         | 456         | 538         | 682         | 431         | 1.121       |
| 1,23E-03                 | 352         | 256         | 326         | 325         | 326         | 337         | 304         | 369         | 435         | 501         | 324         | 893         |
| 2,46E-04                 | 189         | 160         | 185         | 185         | 228         | 207         | 198         | 237         | 276         | 254         | 185         | 566         |
| 1,23E-04                 | 150         | 135         | 152         | 152         | 202         | 174         | 169         | 200         | 232         | 194         | 152         | 481         |
| 2,46E-05                 | 97          | 99          | 106         | 106         | 162         | 127         | 124         | 143         | 163         | 113         | 106         | 356         |

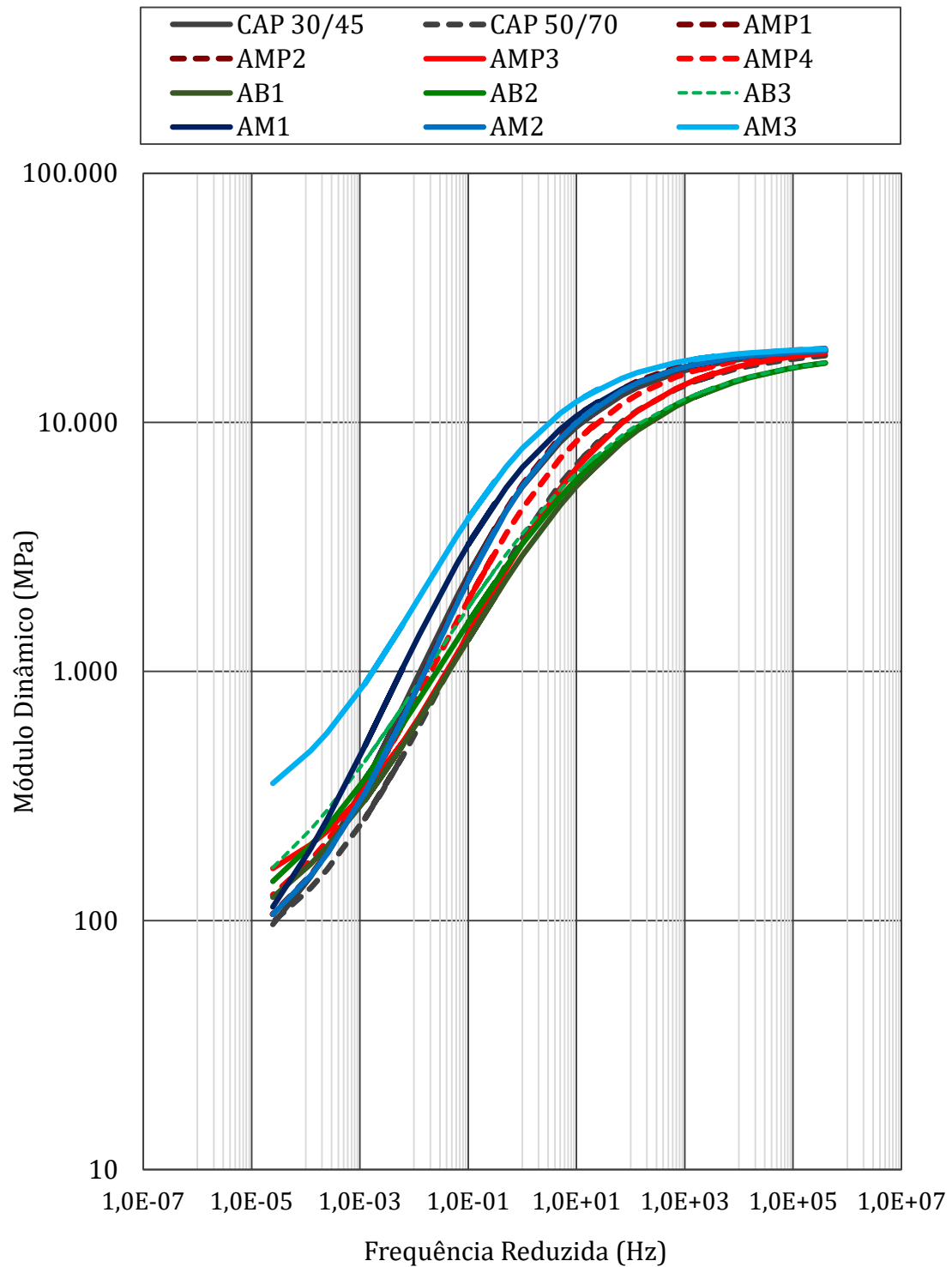


Figura 5.58: Curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos do Estado de São Paulo e os ligantes asfálticos estudados

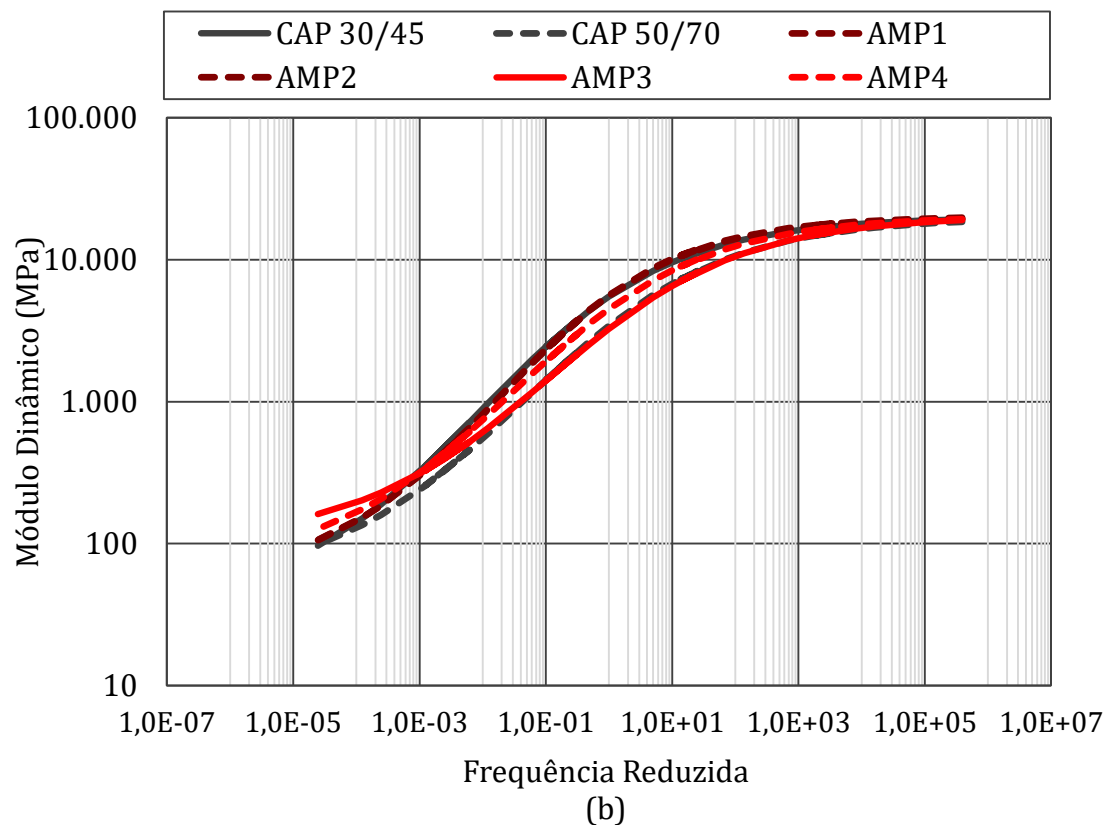
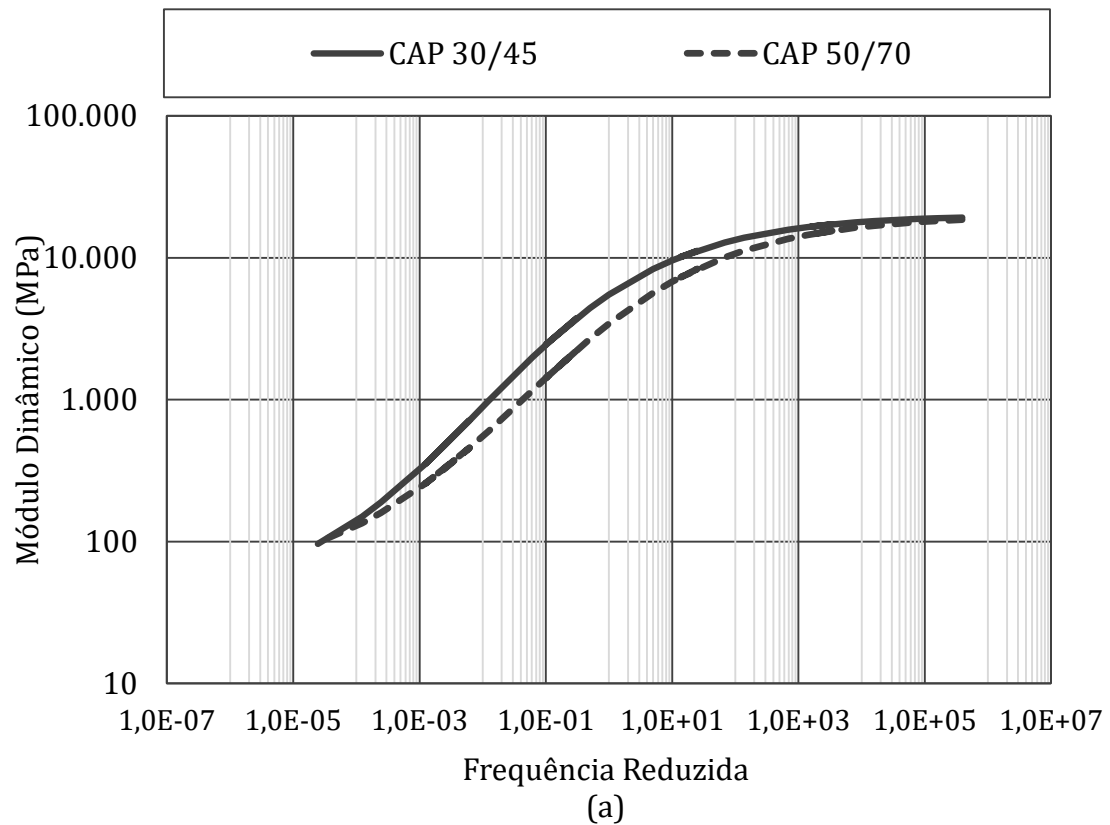


Figura 5.59: Curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos (SP)

(a) Com CAP 30/45 e CAP 50/70; (b) Com ligantes asfálticos modificados por polímero

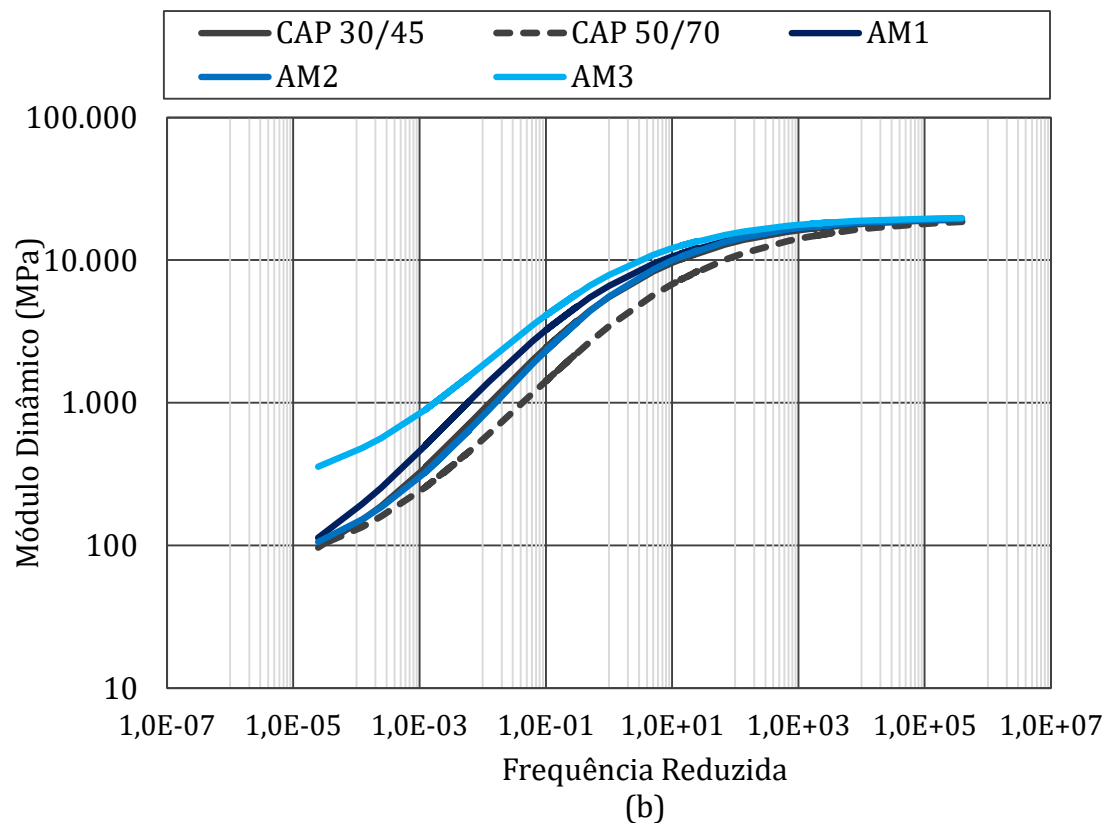
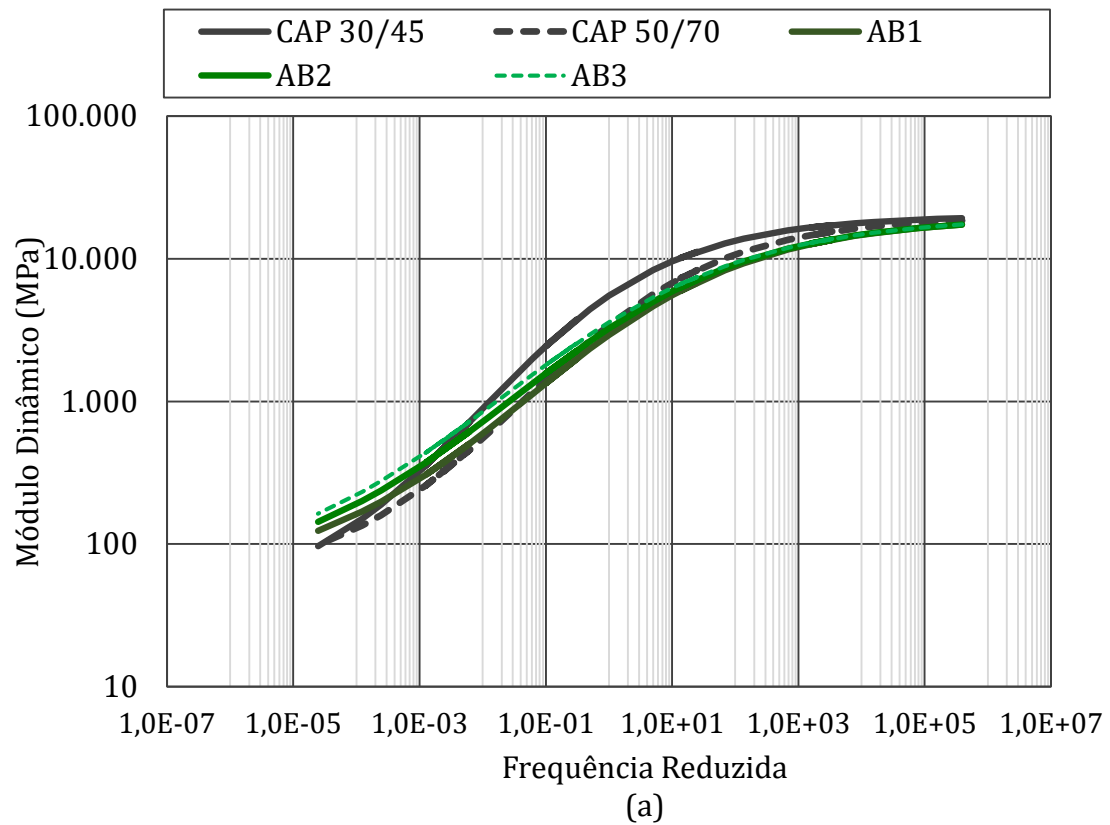


Figura 5.60: Curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos (SP)

(a) Com ligante asfáltico modificado por borracha; (b) Com ligantes asfálticos de alto módulo

### 5.3. RESULTADOS DE *FLOW NUMBER*

Os ensaios de *flow number* foram executados na temperatura de 54,4°C com tensão desvio de 600kPa e sem confinamento. Estes ensaios foram realizados logo após conclusão do ensaio de módulo dinâmico. Nos itens seguintes são apresentados os resultados para cada faixa granulométrica e cada fonte de agregados.

#### 5.3.1. Faixa Granulométrica Faixa III-DERSA

Na Tabela 5.37 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de *flow number* nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo. Nessa Tabela apresenta-se o valor médio e o desvio padrão (obtido de três corpos de prova) do número de ciclos necessário para atingir o ponto de fluência na mistura asfáltica. Esses resultados também são apresentados na Figura 5.61.

Com relação às misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro, os resultados são apresentados na Tabela 5.38 e na Figura 5.62.

Com relação às misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos do Estado de São Paulo, os resultados são apresentados na Tabela 5.39 e na Figura 5.63.

Tabela 5.37: Resultados do ensaio de *flow number* nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| Mistura<br>Asfáltica | Faixa<br>Granulométrica | Ligante<br>Asfáltico | Ponto de Fluência<br>(Ciclos) |                  | Ciclos até obter 5%<br>de deformação |                  |
|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|
|                      |                         |                      | Valor<br>Médio                | Desvio<br>Padrão | Valor<br>Médio                       | Desvio<br>Padrão |
| 1                    | Faixa III-DERSA         | CAP 30/45            | 98                            | 8                | 334                                  | 37               |
| 2                    | Faixa III-DERSA         | CAP 50/70            | 81                            | 17               | 316                                  | 66               |
| 3                    | Faixa III-DERSA         | AMP1                 | 2,390                         | 140              | 10,000                               | 0                |
| 4                    | Faixa III-DERSA         | AMP2                 | 915                           | 228              | 3,777                                | 1,003            |
| 5                    | Faixa III-DERSA         | AMP3                 | 394                           | 94               | 1,153                                | 245              |
| 6                    | Faixa III-DERSA         | AMP4                 | 1,582                         | 272              | 5,778                                | 1,390            |
| 7                    | Faixa III-DERSA         | AB1                  | 5,034                         | 1,494            | 8,971                                | 1,783            |
| 8                    | Faixa III-DERSA         | AB2                  | 2,125                         | 460              | 6,096                                | 778              |
| 9                    | Faixa III-DERSA         | AB3                  | 1,931                         | 493              | 5,796                                | 1,066            |
| 10                   | Faixa III-DERSA         | AM1                  | 399                           | 67               | 1,173                                | 176              |
| 11                   | Faixa III-DERSA         | AM2                  | 284                           | 12               | 563                                  | 41               |
| 12                   | Faixa III-DERSA         | AM3                  | 7,030                         | 2,198            | 10,000                               | 0                |



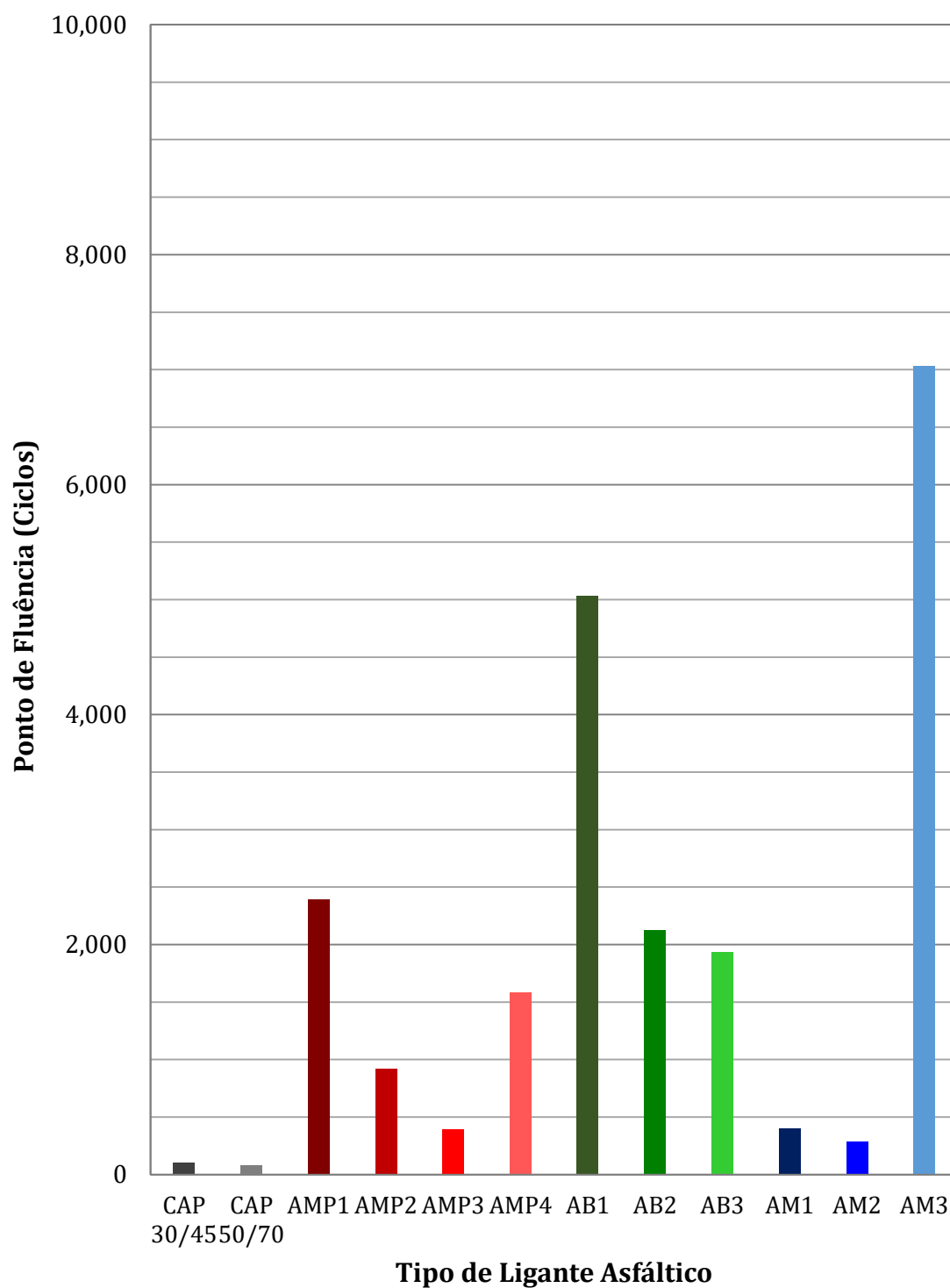


Figura 5.61: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo

Tabela 5.38: Resultados do ensaio de *flow number* nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| Mistura<br>Asfáltica | Faixa<br>Granulométrica | Ligante<br>Asfáltico | Ponto de Fluência<br>(Ciclos) |                  | Ciclos até obter 5%<br>de deformação |                  |
|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|
|                      |                         |                      | Valor<br>Médio                | Desvio<br>Padrão | Valor<br>Médio                       | Desvio<br>Padrão |
| 49                   | Faixa III-DERSA         | CAP 30/45            | 87                            | 12               | 302                                  | 69               |
| 50                   | Faixa III-DERSA         | CAP 50/70            | 48                            | 8                | 90                                   | 4                |
| 51                   | Faixa III-DERSA         | AMP1                 | 312                           | 162              | 954                                  | 239              |
| 52                   | Faixa III-DERSA         | AMP2                 | 115                           | 7                | 355                                  | 26               |
| 53                   | Faixa III-DERSA         | AMP3                 | 496                           | 113              | 1,766                                | 298              |
| 54                   | Faixa III-DERSA         | AMP4                 | 297                           | 81               | 1,068                                | 197              |
| 55                   | Faixa III-DERSA         | AB1                  | 3,516                         | 751              | 10,000                               | 0                |
| 56                   | Faixa III-DERSA         | AB2                  | 340                           | 156              | 2,861                                | 238              |
| 57                   | Faixa III-DERSA         | AB3                  | 1,543                         | 5                | 5,061                                | 842              |
| 58                   | Faixa III-DERSA         | AM1                  | 362                           | 15               | 1,288                                | 28               |
| 59                   | Faixa III-DERSA         | AM2                  | 123                           | 16               | 453                                  | 50               |
| 60                   | Faixa III-DERSA         | AM3                  | 626                           | 29               | 1,910                                | 225              |

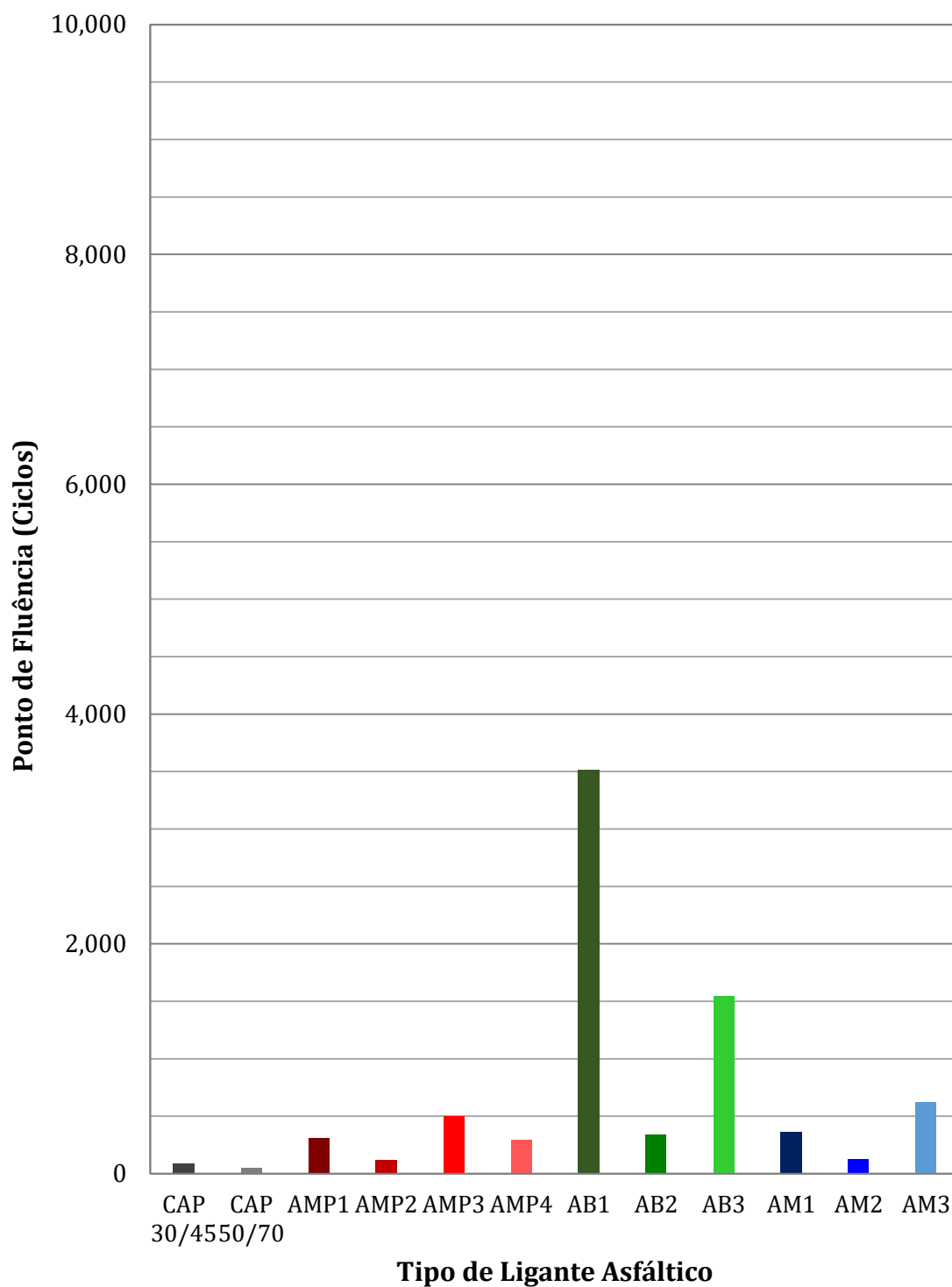


Figura 5.62: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

Tabela 5.39: Resultados do ensaio de *flow number* nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| Mistura<br>Asfáltica | Faixa<br>Granulométrica | Ligante<br>Asfáltico | Ponto de Fluência<br>(Ciclos) |                  | Ciclos até obter 5%<br>de deformação |                  |
|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|
|                      |                         |                      | Valor<br>Médio                | Desvio<br>Padrão | Valor<br>Médio                       | Desvio<br>Padrão |
| 97                   | Faixa III-DERSA         | CAP 30/45            | 252                           | 49               | 640                                  | 51               |
| 98                   | Faixa III-DERSA         | CAP 50/70            | 126                           | 18               | 354                                  | 15               |
| 99                   | Faixa III-DERSA         | AMP1                 | 6,885                         | 2,270            | 10,000                               | 0                |
| 100                  | Faixa III-DERSA         | AMP2                 | 8,630                         | 961              | 10,000                               | 0                |
| 101                  | Faixa III-DERSA         | AMP3                 | 6,627                         | 1,517            | 7,592                                | 1,941            |
| 102                  | Faixa III-DERSA         | AMP4                 | 3,445                         | 1,646            | 7,337                                | 1,234            |
| 103                  | Faixa III-DERSA         | AB1                  | 8,856                         | 858              | 10,000                               | 0                |
| 104                  | Faixa III-DERSA         | AB2                  | 5,554                         | 554              | 7,320                                | 26               |
| 105                  | Faixa III-DERSA         | AB3                  | 2,252                         | 249              | 4,640                                | 51               |
| 106                  | Faixa III-DERSA         | AM1                  | 846                           | 189              | 2,303                                | 594              |
| 107                  | Faixa III-DERSA         | AM2                  | 252                           | 49               | 640                                  | 51               |
| 108                  | Faixa III-DERSA         | AM3                  | 6,847                         | 363              | 10,000                               | 0                |

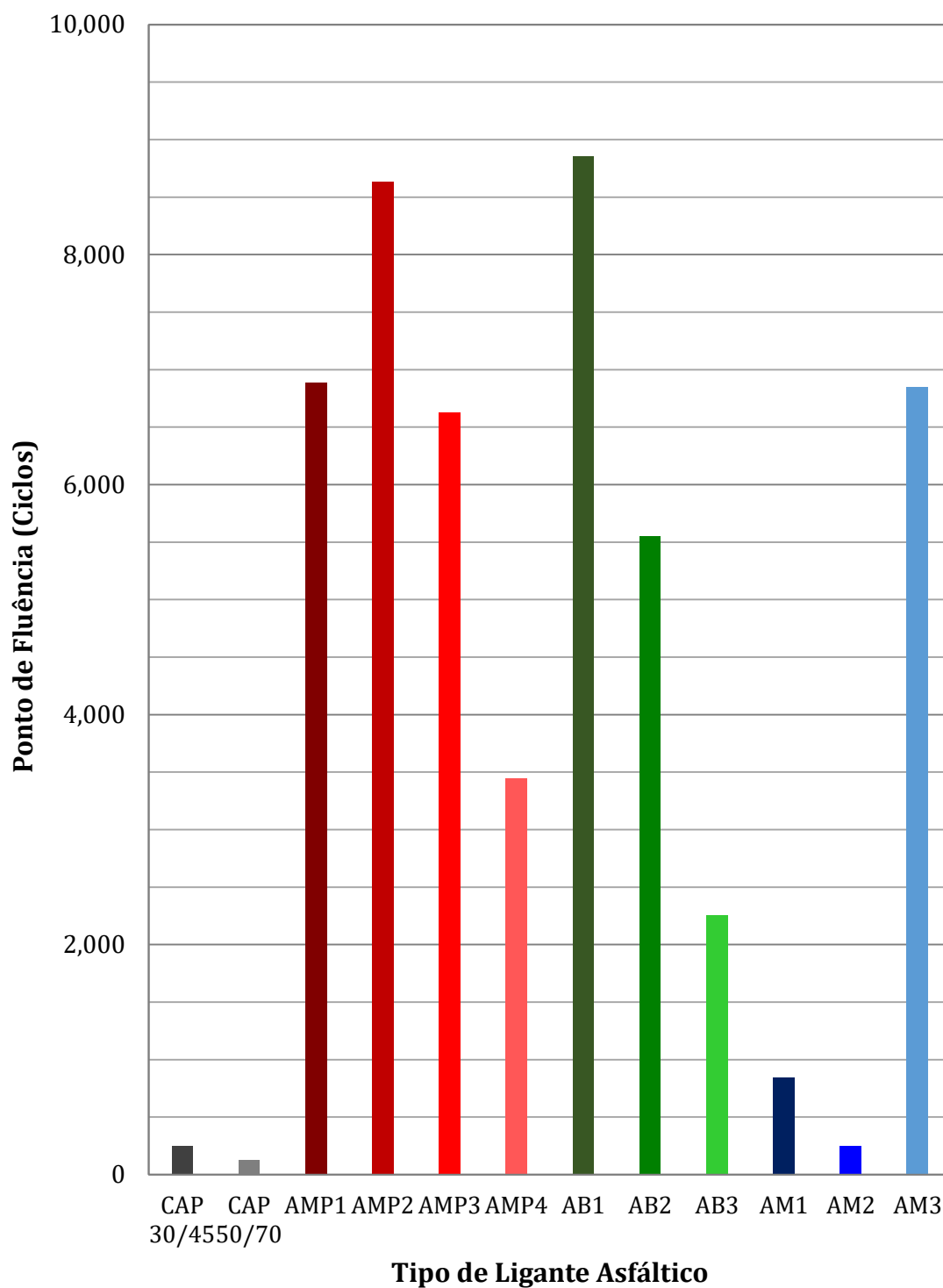


Figura 5.63: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos do Estado de São Paulo

### 3.3.2. Faixa Granulométrica EGL 19,0mm

Na Tabela 5.40 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de *flow number* nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo. Esses resultados também são apresentados na Figura 5.64.

A Tabela 5.41 apresenta os resultados deste ensaio nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro e estes resultados são apresentados também de forma gráfica na Figura 5.65.

Com relação às misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo, os resultados são apresentados na Tabela 5.42 e na Figura 5.66.

Tabela 5.40: Resultados do ensaio de *flow number* nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | Ponto de Fluência (Ciclos) |               | Ciclos até obter 5% de deformação |               |
|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|
|                   |                      |                   | Valor Médio                | Desvio Padrão | Valor Médio                       | Desvio Padrão |
| 13                | EGL 19mm             | CAP 30/45         | 193                        | 21            | 574                               | 47            |
| 14                | EGL 19mm             | CAP 50/70         | 184                        | 22            | 653                               | 182           |
| 15                | EGL 19mm             | AMP1              | 2,944                      | 1,102         | 8,864                             | 836           |
| 16                | EGL 19mm             | AMP2              | 512                        | 55            | 1,709                             | 283           |
| 17                | EGL 19mm             | AMP3              | 2,424                      | 103           | 7,196                             | 588           |
| 18                | EGL 19mm             | AMP4              | 1,978                      | 418           | 5,588                             | 684           |
| 19                | EGL 19mm             | AB1               | 6,286                      | 452           | 10,000                            | 0             |
| 20                | EGL 19mm             | AB2               | 2,576                      | 754           | 6,986                             | 1,957         |
| 21                | EGL 19mm             | AB3               | 2,123                      | 632           | 5,286                             | 600           |
| 22                | EGL 19mm             | AM1               | 1,120                      | 788           | 2,621                             | 101           |
| 23                | EGL 19mm             | AM2               | 583                        | 63            | 1,446                             | 538           |
| 24                | EGL 19mm             | AM3               | 7,818                      | 931           | 10,000                            | 0             |

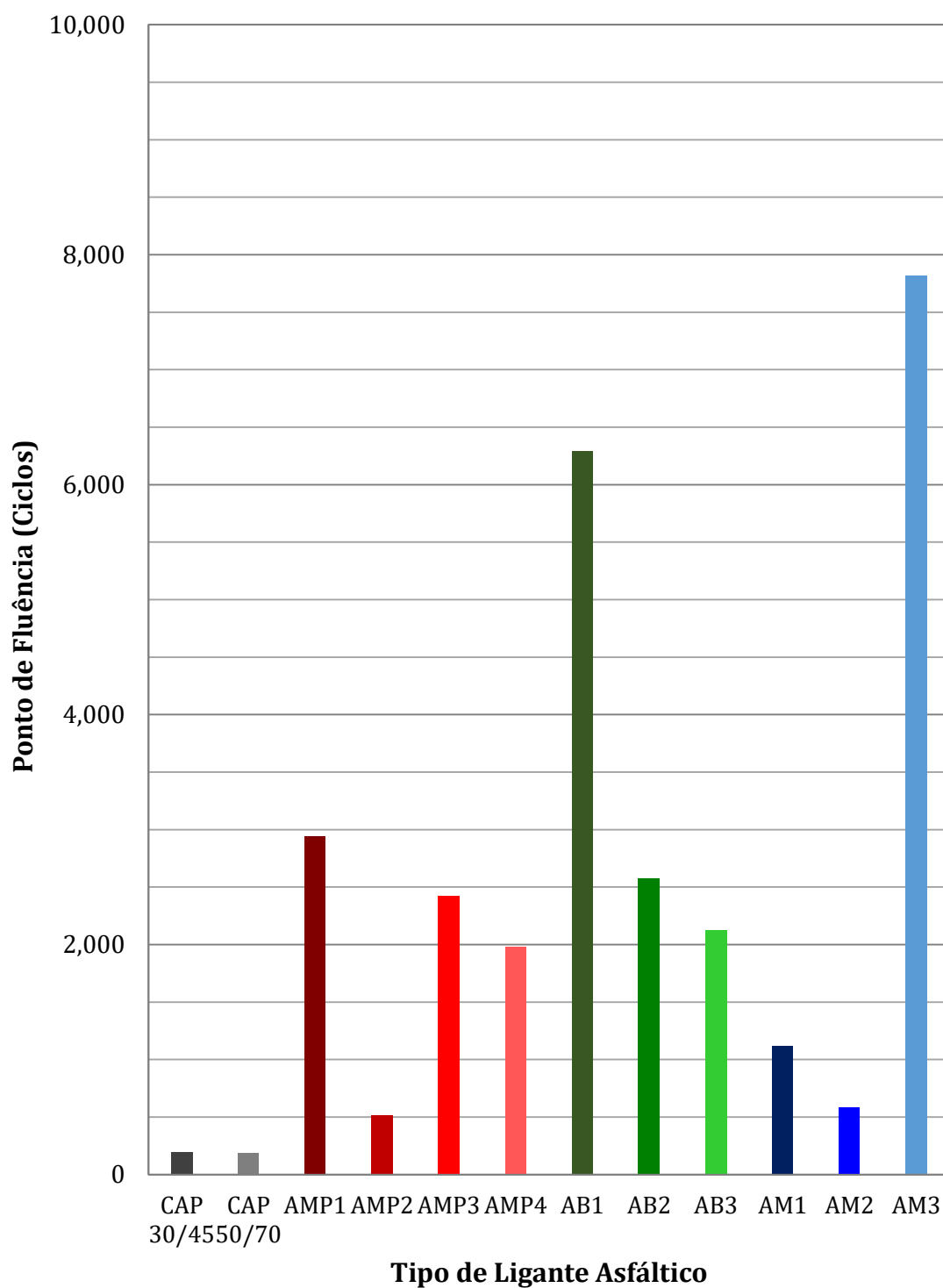


Figura 5.64: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo

Tabela 5.41: Resultados do ensaio de *flow number* nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| Mistura<br>Asfáltica | Faixa<br>Granulométrica | Ligante<br>Asfáltico | Ponto de Fluência<br>(Ciclos) |                  | Ciclos até obter 5%<br>de deformação |                  |
|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|
|                      |                         |                      | Valor<br>Médio                | Desvio<br>Padrão | Valor<br>Médio                       | Desvio<br>Padrão |
| 61                   | EGL 19mm                | CAP 30/45            | 173                           | 19               | 586                                  | 60               |
| 62                   | EGL 19mm                | CAP 50/70            | 68                            | 7                | 335                                  | 67               |
| 63                   | EGL 19mm                | AMP1                 | 1,704                         | 689              | 5,335                                | 1,511            |
| 64                   | EGL 19mm                | AMP2                 | 948                           | 211              | 3,973                                | 929              |
| 65                   | EGL 19mm                | AMP3                 | 584                           | 109              | 2,054                                | 623              |
| 66                   | EGL 19mm                | AMP4                 | 622                           | 114              | 1,803                                | 432              |
| 67                   | EGL 19mm                | AB1                  | 1,860                         | 336              | 6,335                                | 1,033            |
| 68                   | EGL 19mm                | AB2                  | 3,700                         | 595              | 8,102                                | 1,114            |
| 69                   | EGL 19mm                | AB3                  | 2,706                         | 543              | 7,413                                | 996              |
| 70                   | EGL 19mm                | AM1                  | 4,645                         | 1,491            | 8,716                                | 1,225            |
| 71                   | EGL 19mm                | AM2                  | 1,251                         | 352              | 4,476                                | 728              |
| 72                   | EGL 19mm                | AM3                  | 9,027                         | 335              | 9,567                                | 750              |



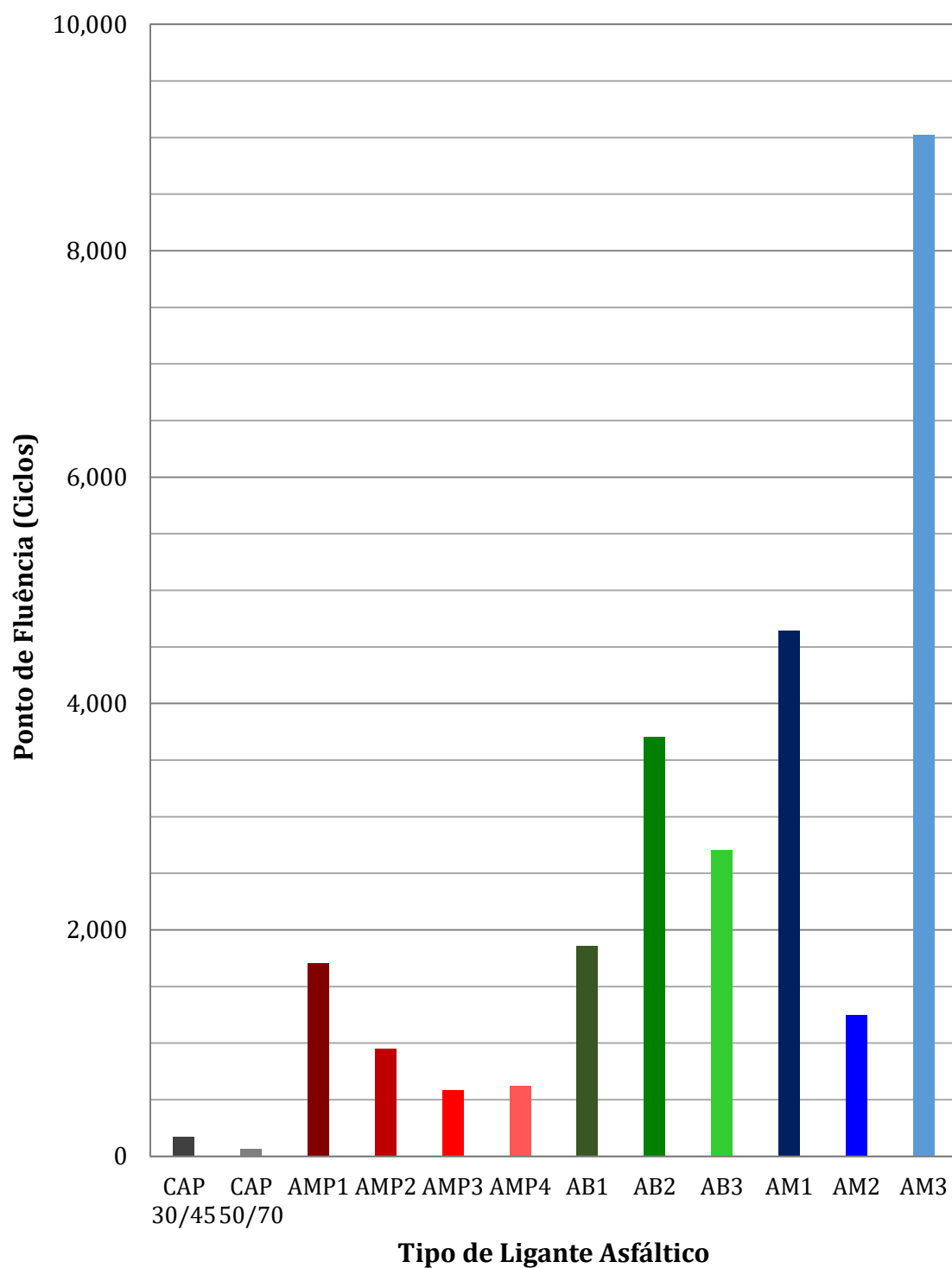


Figura 5.65: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

Tabela 5.42: Resultados do ensaio de *flow number* nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| Mistura<br>Asfáltica | Faixa<br>Granulométrica | Ligante<br>Asfáltico | Ponto de Fluência<br>(Ciclos) |                  | Ciclos até obter 5%<br>de deformação |                  |
|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|
|                      |                         |                      | Valor<br>Médio                | Desvio<br>Padrão | Valor<br>Médio                       | Desvio<br>Padrão |
| 109                  | EGL 19mm                | CAP 30/45            | 307                           | 8                | 908                                  | 107              |
| 110                  | EGL 19mm                | CAP 50/70            | 44                            | 7                | 139                                  | 15               |
| 111                  | EGL 19mm                | AMP1                 | 3,174                         | 338              | 6,958                                | 1,784            |
| 112                  | EGL 19mm                | AMP2                 | 2,027                         | 303              | 6,620                                | 1,047            |
| 113                  | EGL 19mm                | AMP3                 | 483                           | 163              | 1,542                                | 690              |
| 114                  | EGL 19mm                | AMP4                 | 1,478                         | 458              | 4,930                                | 1,299            |
| 115                  | EGL 19mm                | AB1                  | 921                           | 236              | 2,600                                | 791              |
| 116                  | EGL 19mm                | AB2                  | 876                           | 132              | 2,439                                | 438              |
| 117                  | EGL 19mm                | AB3                  | 831                           | 27               | 2,277                                | 85               |
| 118                  | EGL 19mm                | AM1                  | 595                           | 232              | 1,662                                | 662              |
| 119                  | EGL 19mm                | AM2                  | 863                           | 168              | 2,874                                | 380              |
| 120                  | EGL 19mm                | AM3                  | 8,658                         | 1,701            | 10,000                               | 0                |

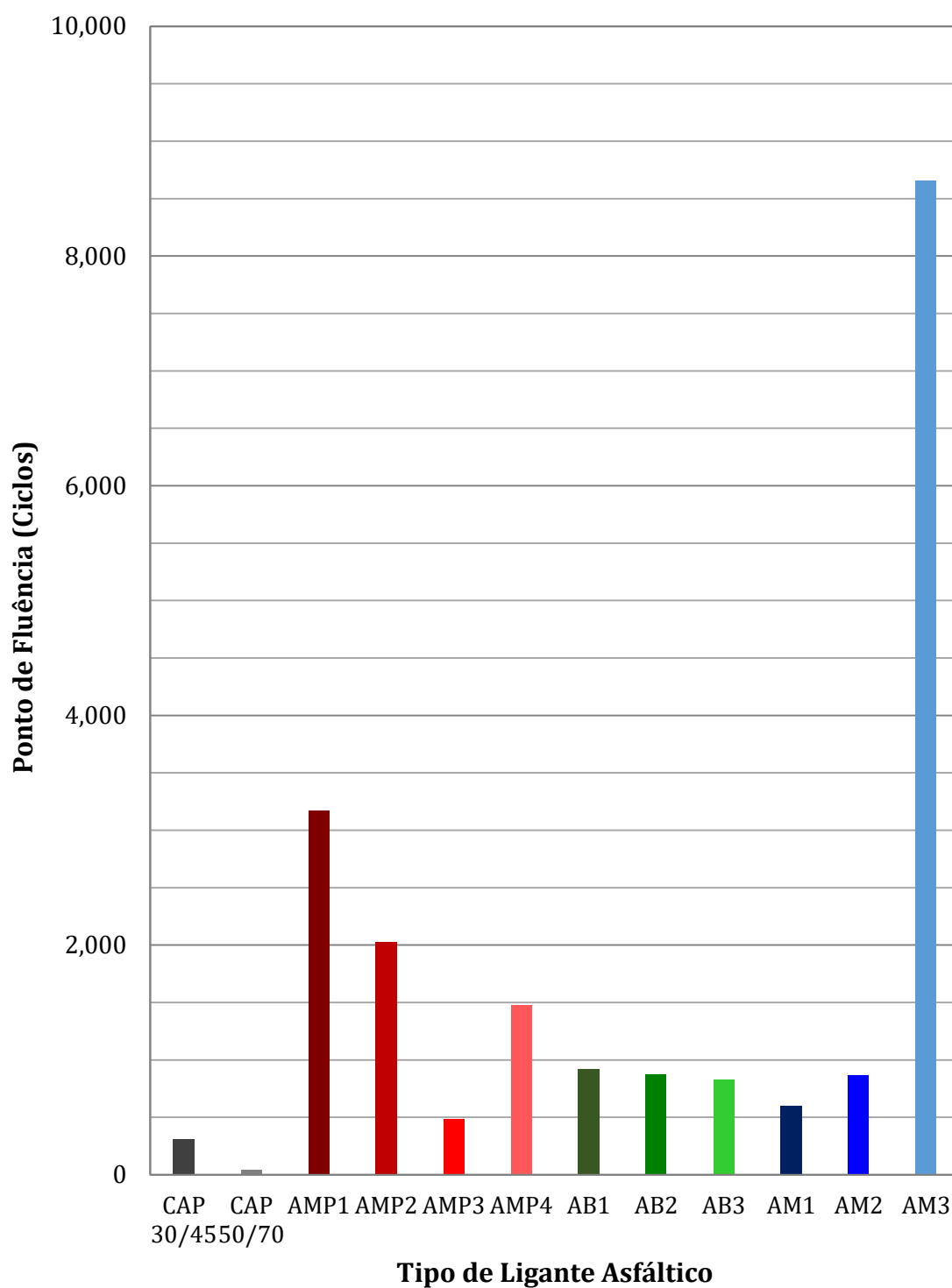


Figura 5.66: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo

### 5.3.1. Faixa Granulométrica EGL 9,5mm

Na Tabela 5.43 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de *flow number* nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo. Esses resultados também são apresentados nas Figuras 5.67.

A Tabela 5.44 apresenta os resultados deste ensaio nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro e estes resultados são apresentados também de forma gráfica na Figura 5.68.

Com relação às misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo, os resultados são apresentados na Tabela 5.45 e na Figura 5.69.

Tabela 5.43: Resultados do ensaio de *flow number* nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| Mistura Asfáltica | Faixa Granulométrica | Ligante Asfáltico | Ponto de Fluência (Ciclos) |               | Ciclos até obter 5% de deformação |               |
|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|
|                   |                      |                   | Valor Médio                | Desvio Padrão | Valor Médio                       | Desvio Padrão |
| 27                | EGL 9,5mm            | CAP 30/45         | 179                        | 10            | 742                               | 89            |
| 28                | EGL 9,5mm            | CAP 50/70         | 113                        | 31            | 416                               | 88            |
| 29                | EGL 9,5mm            | AMP1              | 1,621                      | 661           | 4,419                             | 1,261         |
| 30                | EGL 9,5mm            | AMP2              | 752                        | 45            | 1,083                             | 155           |
| 31                | EGL 9,5mm            | AMP3              | 3,169                      | 574           | 9,612                             | 499           |
| 32                | EGL 9,5mm            | AMP4              | 4,071                      | 1,313         | 9,631                             | 640           |
| 33                | EGL 9,5mm            | AB1               | 1,436                      | 375           | 5,274                             | 2,631         |
| 34                | EGL 9,5mm            | AB2               | 6,855                      | 1,609         | 10,000                            | 0             |
| 35                | EGL 9,5mm            | AB3               | 7,808                      | 106           | 10,000                            | 0             |
| 36                | EGL 9,5mm            | AM1               | 544                        | 54            | 1,529                             | 179           |
| 37                | EGL 9,5mm            | AM2               | 129                        | 14            | 597                               | 110           |
| 38                | EGL 9,5mm            | AM3               | 1,931                      | 493           | 5,796                             | 2,066         |

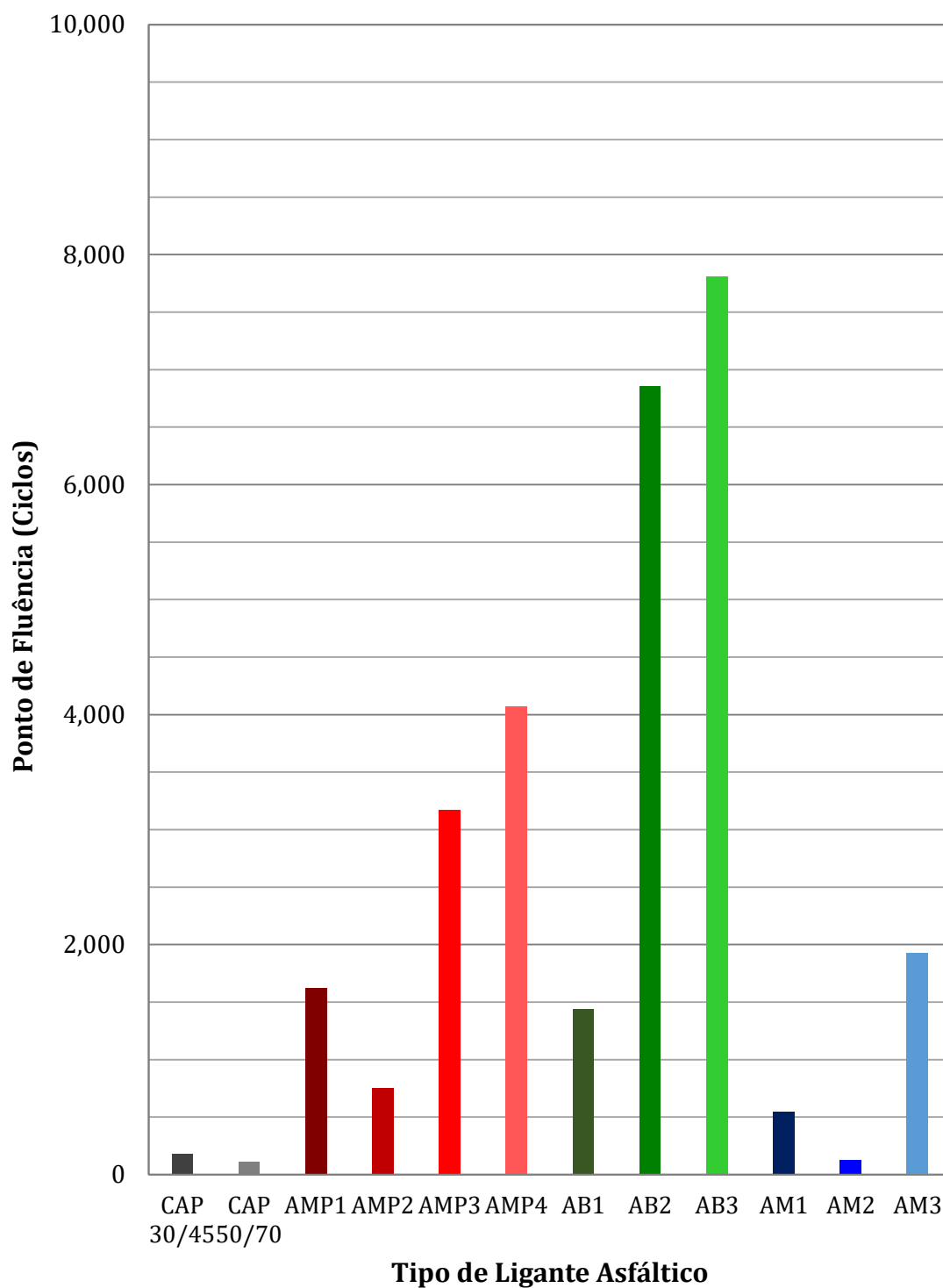


Figura 5.67: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo

Tabela 5.44: Resultados do ensaio de *flow number* nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| Mistura<br>Asfáltica | Faixa<br>Granulométrica | Ligante<br>Asfáltico | Ponto de Fluência<br>(Ciclos) |                  | Ciclos até obter 5%<br>de deformação |                  |
|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|
|                      |                         |                      | Valor<br>Médio                | Desvio<br>Padrão | Valor<br>Médio                       | Desvio<br>Padrão |
| 75                   | EGL 9,5mm               | CAP 30/45            | 81                            | 5                | 298                                  | 44               |
| 76                   | EGL 9,5mm               | CAP 50/70            | 62                            | 1                | 243                                  | 20               |
| 77                   | EGL 9,5mm               | AMP1                 | 1,502                         | 139              | 5,067                                | 644              |
| 78                   | EGL 9,5mm               | AMP2                 | 932                           | 284              | 2,884                                | 842              |
| 79                   | EGL 9,5mm               | AMP3                 | 1,197                         | 335              | 3,945                                | 1,156            |
| 80                   | EGL 9,5mm               | AMP4                 | 455                           | 36               | 880                                  | 90               |
| 81                   | EGL 9,5mm               | AB1                  | 146                           | 71               | 422                                  | 220              |
| 82                   | EGL 9,5mm               | AB2                  | 458                           | 159              | 1,370                                | 319              |
| 83                   | EGL 9,5mm               | AB3                  | 323                           | 83               | 1,067                                | 391              |
| 84                   | EGL 9,5mm               | AM1                  | 173                           | 19               | 586                                  | 60               |
| 85                   | EGL 9,5mm               | AM2                  | 466                           | 45               | 1,611                                | 210              |
| 86                   | EGL 9,5mm               | AM3                  | 6,915                         | 1,290            | 10,000                               | 0                |

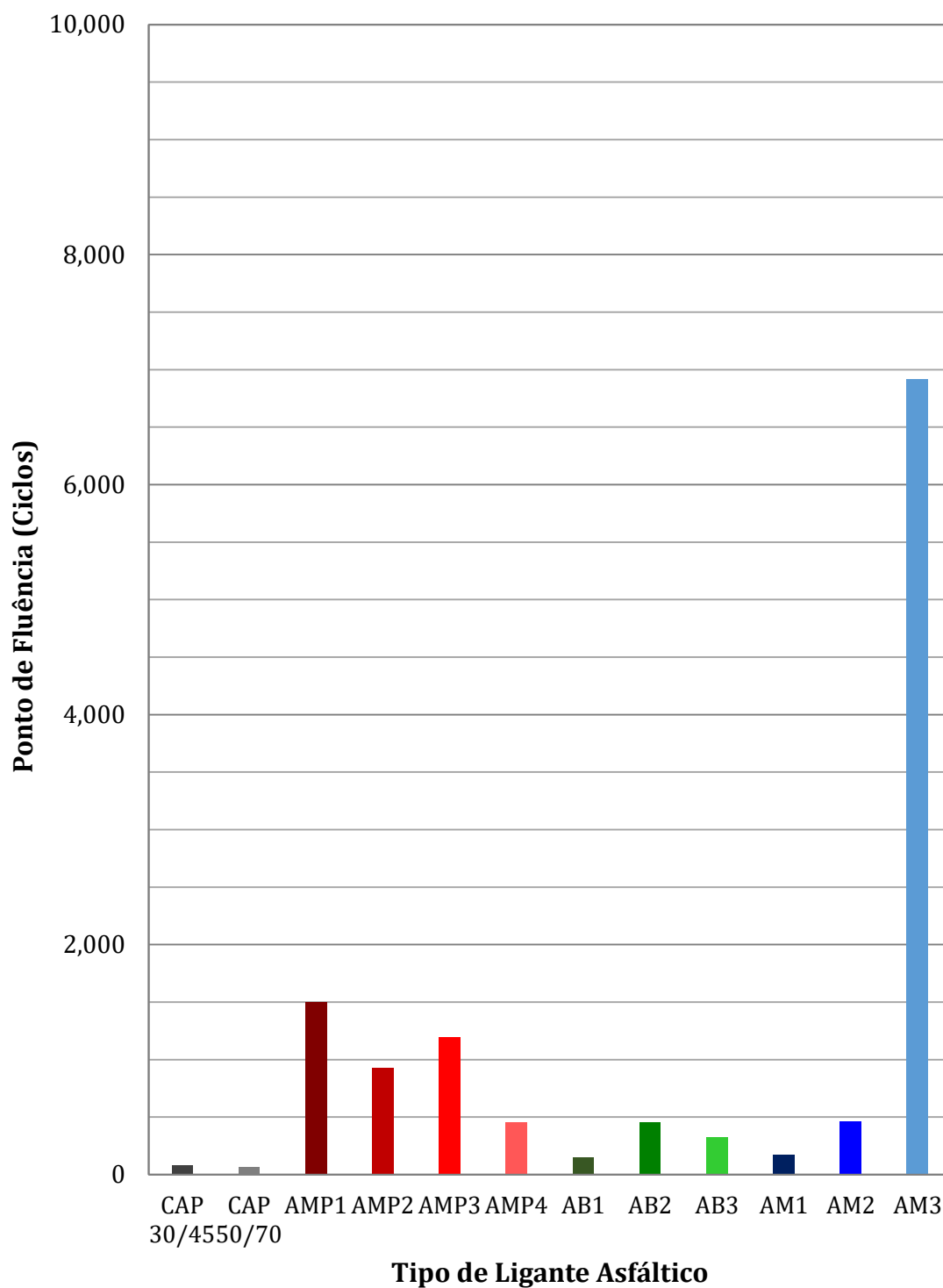


Figura 5.68: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

Tabela 5.45: Resultados do ensaio de *flow number* nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| Mistura<br>Asfáltica | Faixa<br>Granulométrica | Ligante<br>Asfáltico | Ponto de Fluência<br>(Ciclos) |                  | Ciclos até obter 5%<br>de deformação |                  |
|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|
|                      |                         |                      | Valor<br>Médio                | Desvio<br>Padrão | Valor<br>Médio                       | Desvio<br>Padrão |
| 123                  | EGL 9,5mm               | CAP 30/45            | 427                           | 27               | 1,261                                | 109              |
| 124                  | EGL 9,5mm               | CAP 50/70            | 170                           | 68               | 640                                  | 122              |
| 125                  | EGL 9,5mm               | AMP1                 | 2,856                         | 388              | 10,000                               | 0                |
| 126                  | EGL 9,5mm               | AMP2                 | 1,506                         | 375              | 4,279                                | 658              |
| 127                  | EGL 9,5mm               | AMP3                 | 2,309                         | 529              | 6,118                                | 649              |
| 128                  | EGL 9,5mm               | AMP4                 | 708                           | 268              | 1,843                                | 755              |
| 129                  | EGL 9,5mm               | AB1                  | 1,205                         | 190              | 3,286                                | 809              |
| 130                  | EGL 9,5mm               | AB2                  | 1,051                         | 206              | 2,972                                | 761              |
| 131                  | EGL 9,5mm               | AB3                  | 897                           | 223              | 2,659                                | 712              |
| 132                  | EGL 9,5mm               | AM1                  | 298                           | 111              | 861                                  | 332              |
| 133                  | EGL 9,5mm               | AM2                  | 463                           | 56               | 1,208                                | 56               |
| 134                  | EGL 9,5mm               | AM3                  | 8,178                         | 185              | 10,000                               | 0                |



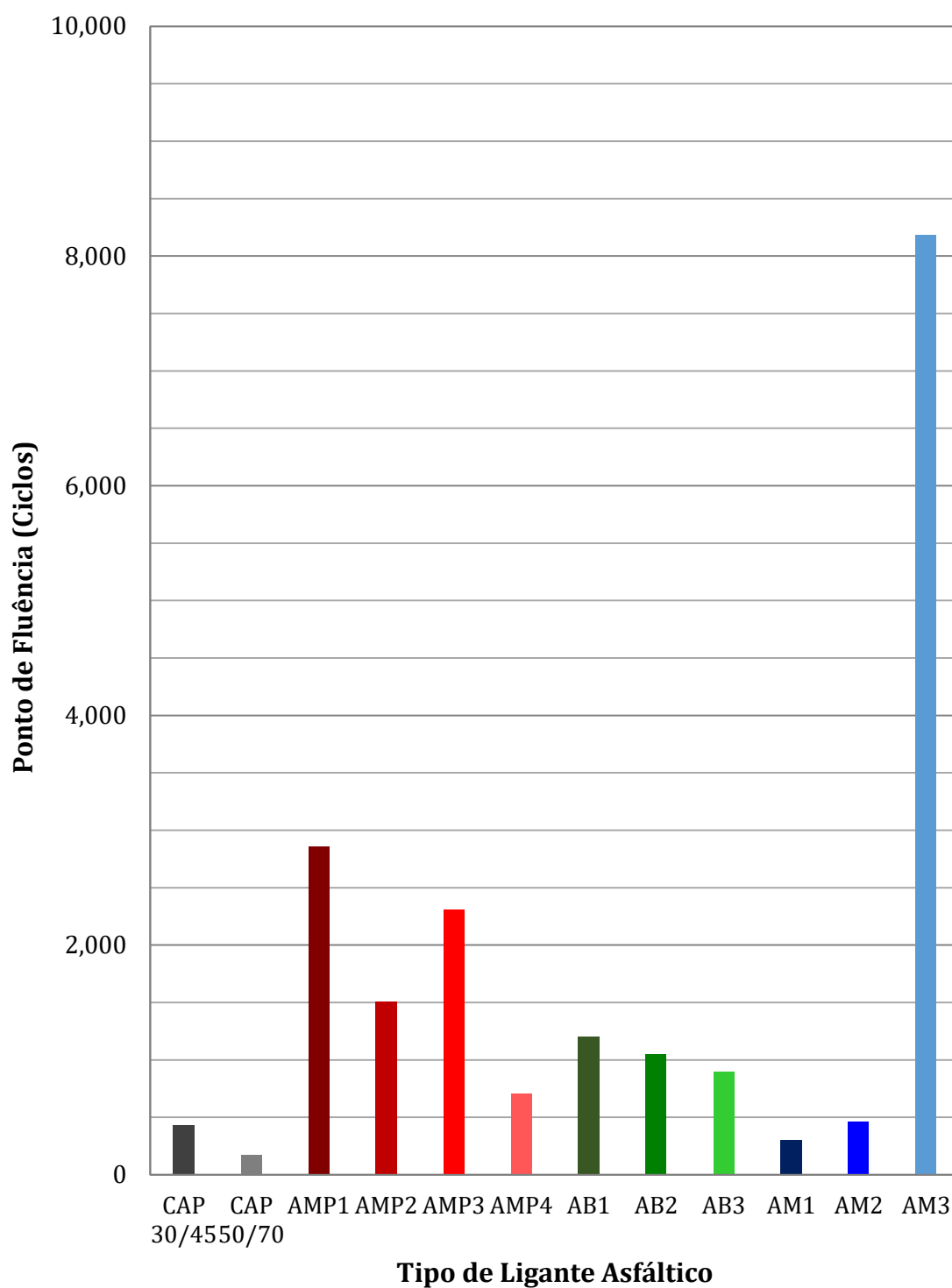


Figura 5.69: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo

### 5.3.4. Faixa Granulométrica *Gap Graded*

Na Tabela 5.46 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de *flow number* nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado de São Paulo. Esses resultados também são apresentados na Figura 5.70.

A Tabela 5.47 apresenta os resultados deste ensaio nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro, obtidos até elaboração deste relatório parcial, e estes resultados são apresentados também de forma gráfica na Figura 5.71.

Com relação às misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos do Estado de São Paulo, os resultados são apresentados na Tabela 5.48 e nas Figuras 5.72.

Tabela 5.46: Resultados do ensaio de *flow number* nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado de São Paulo

| Mistura<br>Asfáltica | Faixa<br>Granulométrica | Ligante<br>Asfáltico | Ponto de Fluência<br>(Ciclos) |                  | Ciclos até obter 5%<br>de deformação |                  |
|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|
|                      |                         |                      | Valor<br>Médio                | Desvio<br>Padrão | Valor<br>Médio                       | Desvio<br>Padrão |
| 37                   | Gap Graded              | CAP 30/45            | 215                           | 41               | 719                                  | 50               |
| 38                   | Gap Graded              | CAP 50/70            | 92                            | 42               | 243                                  | 102              |
| 39                   | Gap Graded              | AMP1                 | 2,816                         | 1,153            | 4,943                                | 1,047            |
| 40                   | Gap Graded              | AMP2                 | 608                           | 363              | 1,819                                | 755              |
| 41                   | Gap Graded              | AMP3                 | 1,077                         | 265              | 3,581                                | 229              |
| 42                   | Gap Graded              | AMP4                 | 1,416                         | 205              | 4,619                                | 271              |
| 43                   | Gap Graded              | AB1                  | 1,762                         | 111              | 6,273                                | 1,575            |
| 44                   | Gap Graded              | AB2                  | 1,617                         | 532              | 5,179                                | 1,261            |
| 45                   | Gap Graded              | AB3                  | 1,387                         | 506              | 4,547                                | 2,048            |
| 46                   | Gap Graded              | AM1                  | 1,140                         | 242              | 3,494                                | 498              |
| 47                   | Gap Graded              | AM2                  | 388                           | 105              | 1,427                                | 389              |
| 48                   | Gap Graded              | AM3                  | 1,931                         | 493              | 5,796                                | 2,066            |

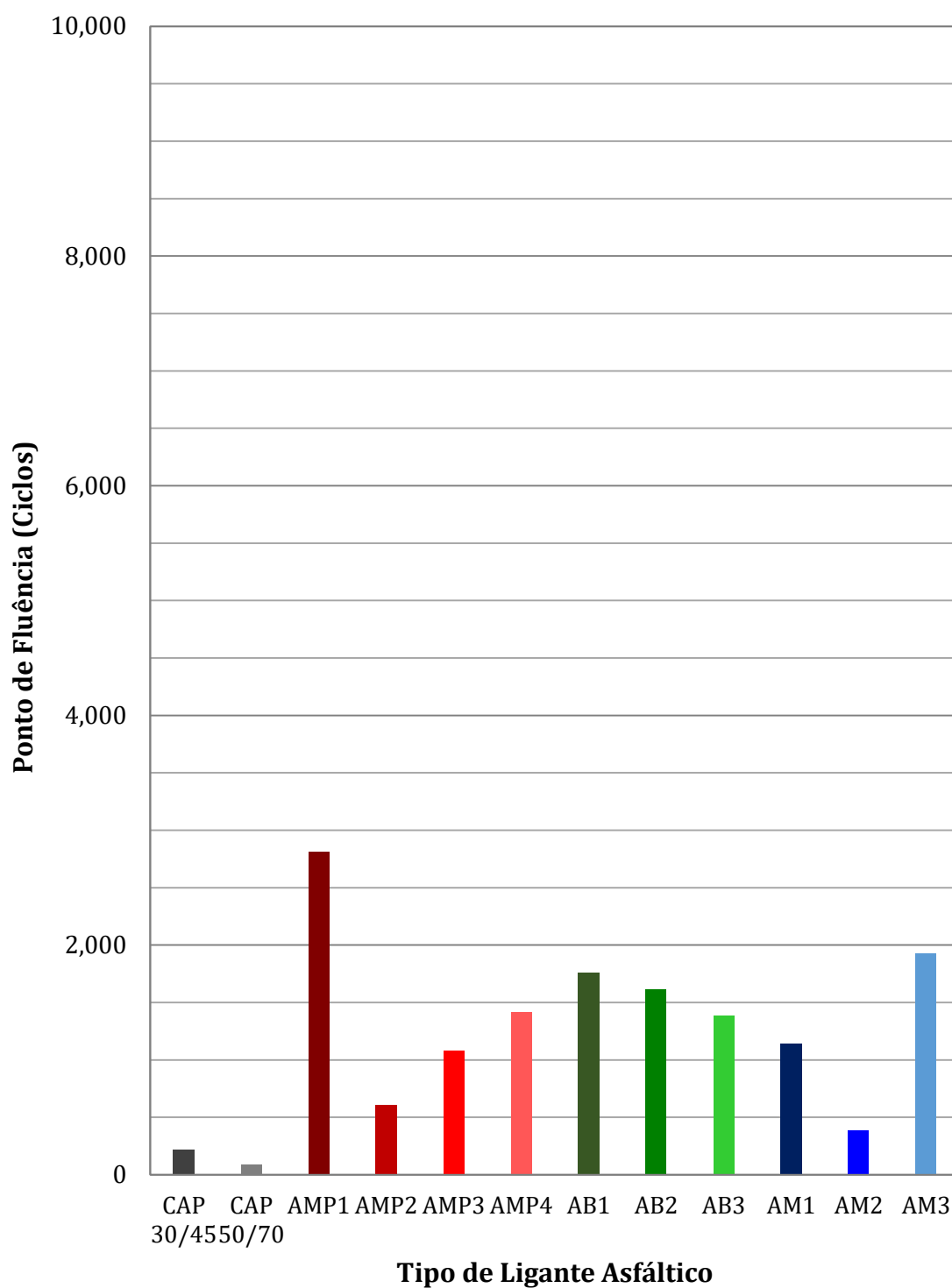


Figura 5.70: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado de São Paulo

Tabela 5.47: Resultados do ensaio de *flow number* nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

| Mistura<br>Asfáltica | Faixa<br>Granulométrica | Ligante<br>Asfáltico | Ponto de Fluência<br>(Ciclos) |                  | Ciclos até obter 5%<br>de deformação |                  |
|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|
|                      |                         |                      | Valor<br>Médio                | Desvio<br>Padrão | Valor<br>Médio                       | Desvio<br>Padrão |
| 85                   | Gap Graded              | CAP 30/45            | 214                           | 51               | 704                                  | 113              |
| 86                   | Gap Graded              | CAP 50/70            | 96                            | 16               | 364                                  | 47               |
| 87                   | Gap Graded              | AMP1                 | 4,622                         | 1,172            | 10,000                               | 0                |
| 88                   | Gap Graded              | AMP2                 | 2,744                         | 128              | 9,480                                | 901              |
| 89                   | Gap Graded              | AMP3                 | 567                           | 115              | 1,802                                | 539              |
| 90                   | Gap Graded              | AMP4                 | 1,058                         | 369              | 2,866                                | 874              |
| 91                   | Gap Graded              | AB1                  | 542                           | 80               | 1,865                                | 126              |
| 92                   | Gap Graded              | AB2                  | 272                           | 42               | 864                                  | 73               |
| 93                   | Gap Graded              | AB3                  | 269                           | 38               | 917                                  | 95               |
| 94                   | Gap Graded              | AM1                  | 228                           | 101              | 903                                  | 258              |
| 95                   | Gap Graded              | AM2                  | 401                           | 28               | 1,550                                | 486              |
| 96                   | Gap Graded              | AM3                  | 5,844                         | 1,700            | 5,040                                | 1,960            |

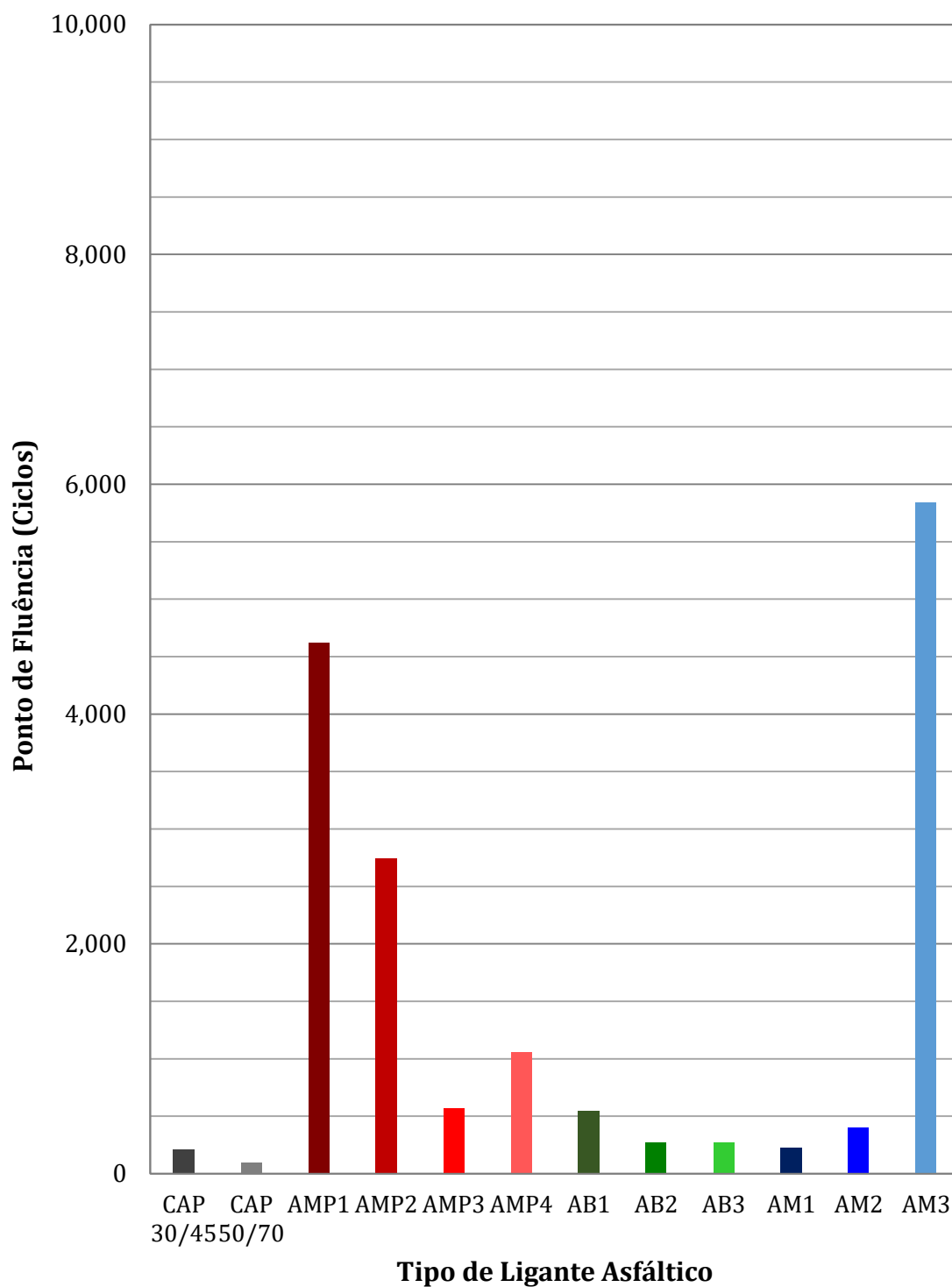


Figura 5.71: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado de São Paulo

Tabela 5.48: Resultados do ensaio de *flow number* nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos do Estado de São Paulo

| Mistura<br>Asfáltica | Faixa<br>Granulométrica | Ligante<br>Asfáltico | Ponto de Fluência<br>(Ciclos) |                  | Ciclos até obter 5%<br>de deformação |                  |
|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|
|                      |                         |                      | Valor<br>Médio                | Desvio<br>Padrão | Valor<br>Médio                       | Desvio<br>Padrão |
| 133                  | Gap Graded              | CAP 30/45            | 186                           | 4                | 547                                  | 21               |
| 134                  | Gap Graded              | CAP 50/70            | 70                            | 14               | 1,197                                | 1,747            |
| 135                  | Gap Graded              | AMP1                 | 4,025                         | 1,336            | 7,046                                | 294              |
| 136                  | Gap Graded              | AMP2                 | 849                           | 164              | 2,883                                | 369              |
| 137                  | Gap Graded              | AMP3                 | 221                           | 71               | 417                                  | 80               |
| 138                  | Gap Graded              | AMP4                 | 889                           | 70               | 2,394                                | 222              |
| 139                  | Gap Graded              | AB1                  | 419                           | 64               | 993                                  | 104              |
| 140                  | Gap Graded              | AB2                  | 569                           | 136              | 1,541                                | 314              |
| 141                  | Gap Graded              | AB3                  | 718                           | 209              | 2,089                                | 523              |
| 142                  | Gap Graded              | AM1                  | 1,070                         | 150              | 2,927                                | 411              |
| 143                  | Gap Graded              | AM2                  | 444                           | 71               | 916                                  | 143              |
| 144                  | Gap Graded              | AM3                  | 6,269                         | 919              | 10,000                               | 0                |

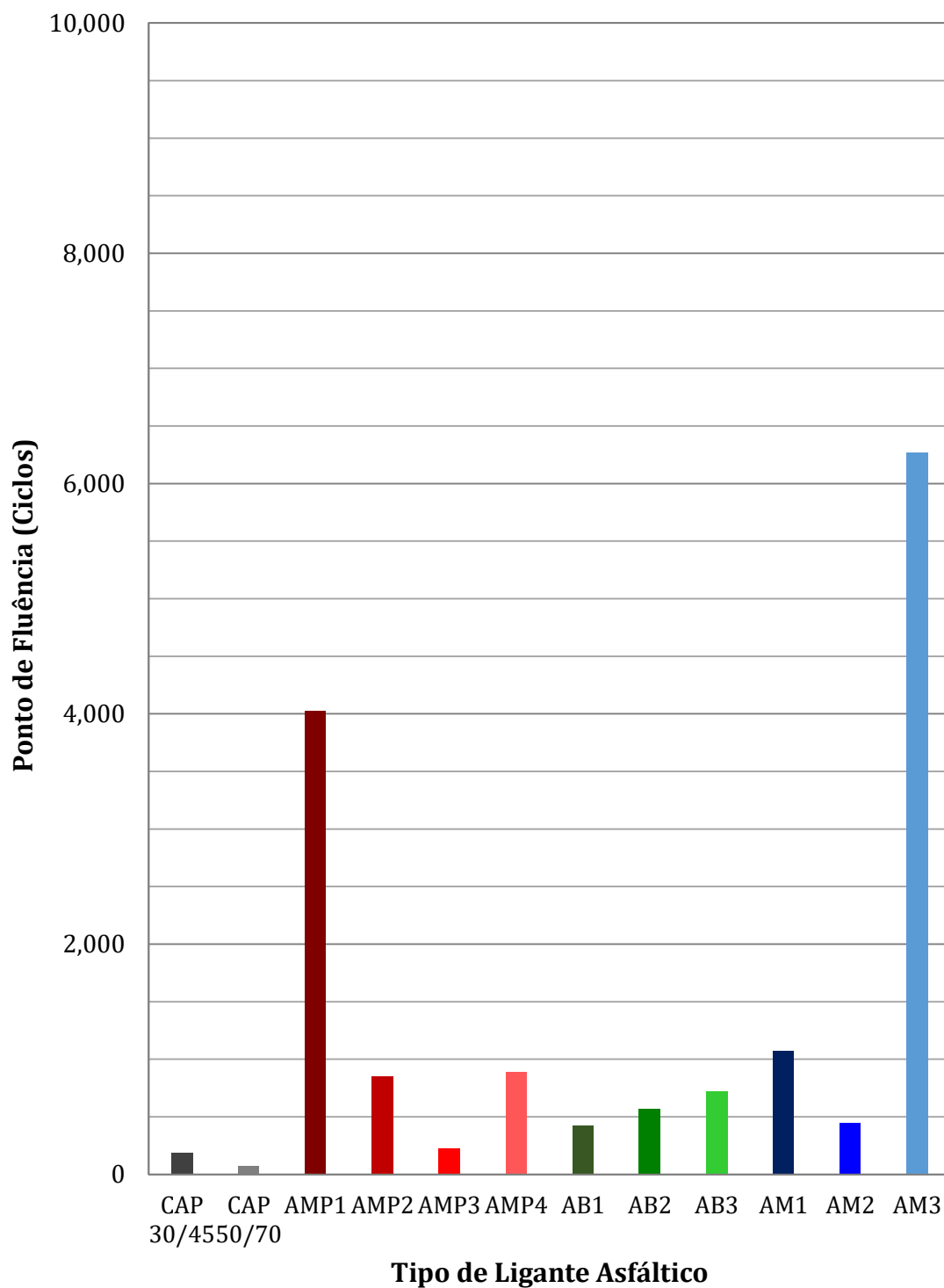


Figura 5.72: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos do Estado de São Paulo

## 5.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Este estudo avaliou as características mecânicas de misturas asfálticas com ligantes asfálticos distintos em composições granulométricas variadas, totalizando 144 experimentos no planejamento fatorial. A avaliação de tendências nesse número de combinações é difícil de realizar e, portanto, optou-se por considerar o fator “ligante asfáltico”, conforme apresentado na Tabela 5.49, agrupando os distintos AMP, AB e AM.

Tabela 5.49: Fatores empregados na análise estatística

| Fatores              | Descrição                             |
|----------------------|---------------------------------------|
| Agregados            | Granito São Paulo                     |
|                      | Granito Rio de Janeiro                |
|                      | Basalto São Paulo                     |
| Faixa Granulométrica | Faixa III DERSA                       |
|                      | EGL 19,0mm                            |
|                      | EGL 9,5mm                             |
|                      | Gap Graded                            |
| Ligante Asfáltico    | CAP 50/70                             |
|                      | CAP 30/45                             |
|                      | Asfalto Modificado por Polímero (AMP) |
|                      | Asfalto Modificado por Polímero (AB)  |
|                      | Asfalto de Alto Módulo (AM)           |

A Tabela 5.49 foi utilizada como base para realizar a análise estatística nos parâmetros mecânicos módulo de resiliência, resistência a tração, módulo dinâmico e *flow number*. Os resultados da análise realizada no software Minitab, com a ferramenta Análise de Variância (ANOVA), são apresentados nos seguintes itens.

### 5.4.1. Módulo de Resiliência

O parâmetro módulo de resiliência (MR) foi obtido em três temperaturas de ensaio: 21,1°C, 25,0°C e 37,8°C. Assim, na análise estatística também foi incluído o fator temperatura de ensaio para avaliar a influência deste condicionamento dos corpos de prova utilizados no ensaio. Na Tabela 5.50 apresenta-se o resultado da Análise de Variância para este parâmetro e observa-se que todos os



fatores são significativamente influentes no MR e somente as interações (A)x(D) e (B)x(C) não são significativas.

Tabela 5.50: Resultados da Análise de Variância do parâmetro módulo de resiliência

| Fatores e Interações   | Grau de Liberdade | Soma dos Quadrados | F Calculado | F Tabelado | P     | Significativo |
|------------------------|-------------------|--------------------|-------------|------------|-------|---------------|
| Agregados (A)          | 2                 | 18549701           | 8.56        | 3.00       | 0.000 | Sim           |
| Granulometria (B)      | 3                 | 1.08E+08           | 33.21       | 2.60       | 0.000 | Sim           |
| Ligante Asfáltico (C)  | 4                 | 4.86E+08           | 112.03      | 2.37       | 0.000 | Sim           |
| Temperatura Ensaio (D) | 2                 | 1.49E+09           | 688.59      | 3.00       | 0.000 | Sim           |
| (A)x(B)                | 6                 | 1.54E+08           | 23.76       | 2.10       | 0.000 | Sim           |
| (A)x(C)                | 8                 | 22158234           | 2.56        | 1.94       | 0.000 | Sim           |
| (A)x(D)                | 4                 | 6073767            | 1.4         | 2.37       | 0.234 | Não           |
| (B)x(C)                | 12                | 16119146           | 1.24        | 1.75       | 0.256 | Não           |
| (B)x(D)                | 6                 | 17410468           | 2.68        | 2.10       | 0.015 | Sim           |
| (C)x(D)                | 8                 | 68561379           | 7.91        | 1.94       | 0.000 | Sim           |
| Erro                   | 252               | 2.73E+08           |             |            |       |               |
| Total                  | 431               | 3.4E+09            |             |            |       |               |

A título de exemplo, apresentam-se na Figura 5.73 as interações individuais dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para o módulo de resiliência na temperatura de 25°C, ressaltando que para as temperaturas de 21,1°C e 37,8°C foram obtidas tendências muito similares. Observa-se que, de forma geral, o MR médio foi maior nas misturas asfálticas com agregados graníticos do Estado de São Paulo (Granito SP). Com relação à faixa granulométrica, observa-se que as misturas asfálticas do tipo *Gap Graded* apresentaram os menores valores de MR enquanto que as misturas EGL 19mm e a Faixa III DERSA apresentaram os valores mais elevados.

As tendências observadas na Figura 5.73, quanto ao tipo de ligante asfáltico, indicaram que o emprego de Alto Módulo e CAP 30/45 produz misturas asfálticas com os valores de módulo de resiliência mais elevados, quando comparadas com as misturas produzidas com asfalto modificado por polímero, o asfalto modificado por borracha e o CAP 50/70, que apresentaram valores de MR similares.

As interações combinadas dos fatores avaliados para o MR na temperatura de 25°C são apresentadas também na Figura 5.74. A tendência mais clara observada nessa figura indica que o emprego de ligante asfáltico de alto módulo (AM) produz as misturas asfálticas com maiores valores de MR, independentemente da faixa granulométrica avaliada.

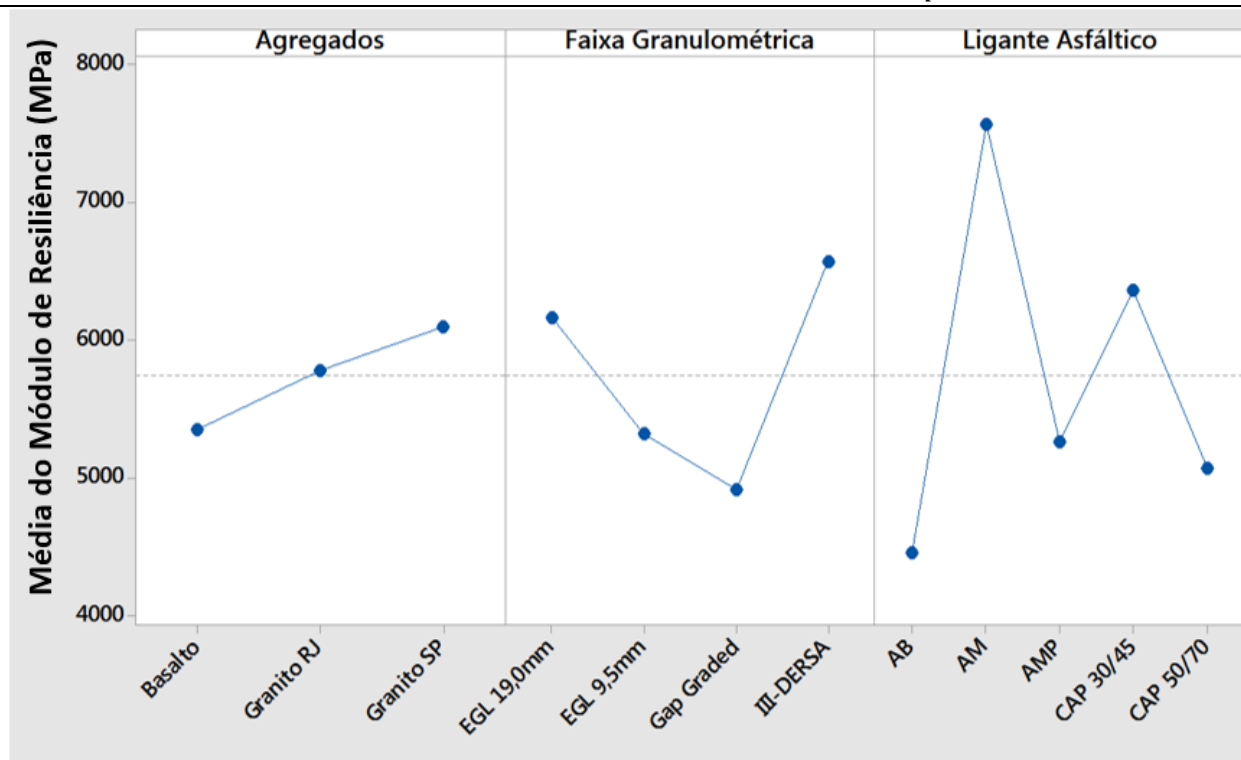


Figura 5.73: Interações individuais dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para o módulo de resiliência na temperatura de 25°C

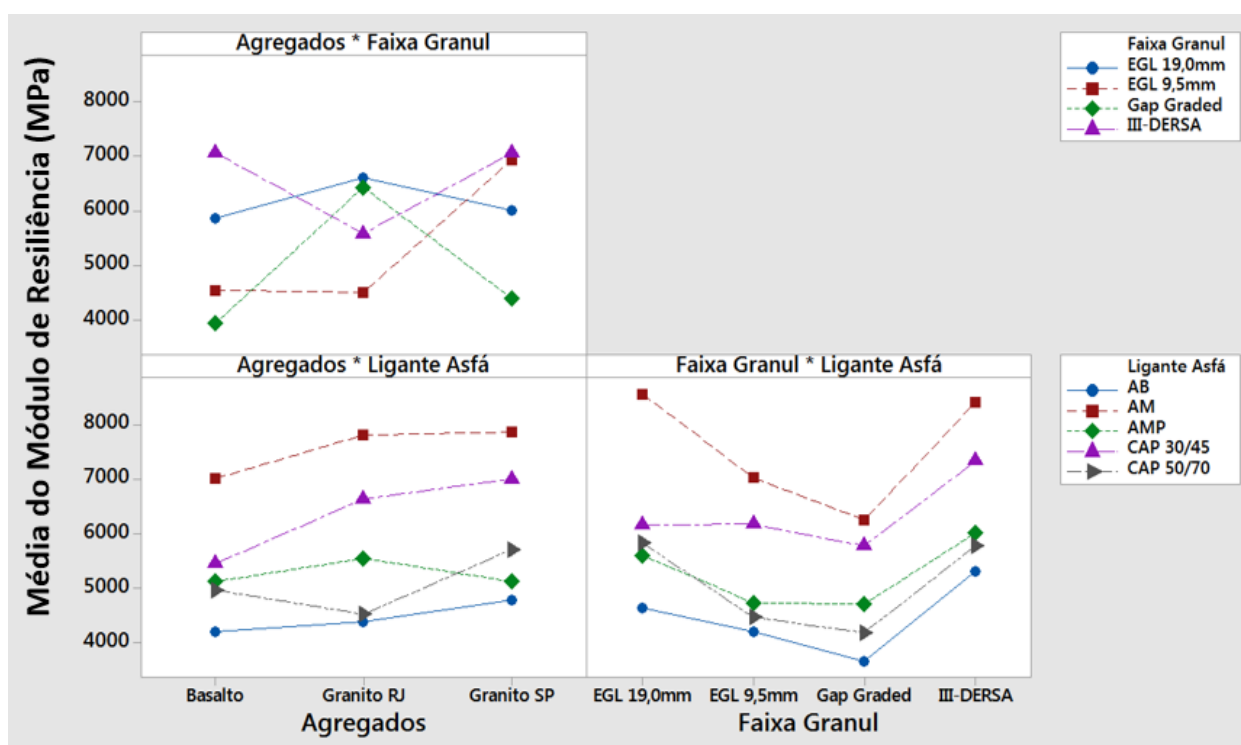


Figura 5.74: Interações combinadas dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligantes asfálticos para o módulo de resiliência na temperatura de 25°C

Nas Figuras 5.75 e 5.76 também são apresentadas as interações individuais e combinadas dos fatores avaliadas para o parâmetro módulo de resiliência obtido na temperatura de 37,8°C. Observa-se que foram mantidas as tendências descritas anteriormente, na temperatura de análise de 25°C, para os fatores fonte de agregados e faixa granulométrica. No entanto, as tendências para o tipo de ligante asfáltico se modificou, e os menores valores de MR na temperatura de 37,8°C foram obtidos no CAP 30/45 e CAP 50/70. Esse comportamento comprova que os ligantes asfálticos modificados apresentam maior rigidez nas temperaturas mais elevadas, quando comparados com os ligantes asfálticos modificados.

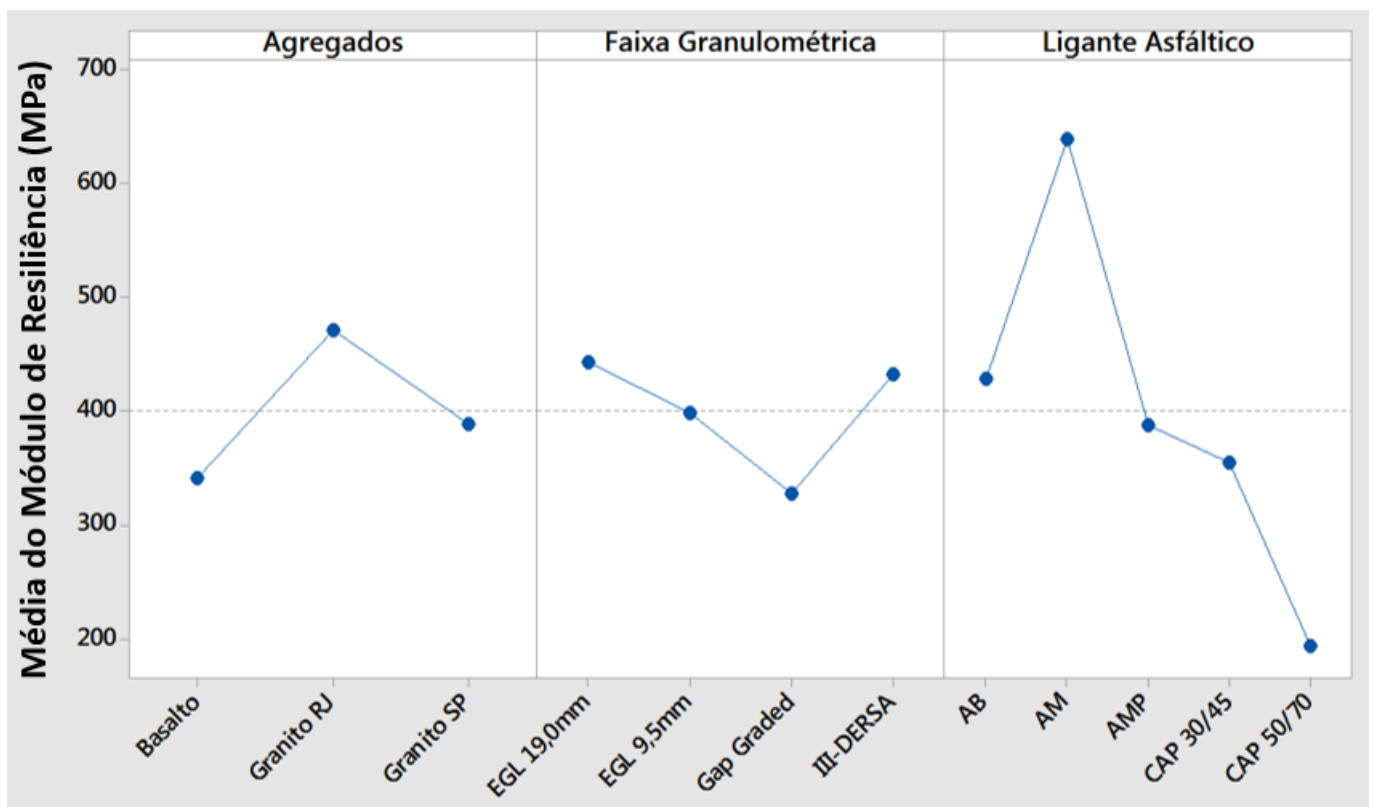


Figura 5.75: Interações individuais dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para o módulo de resiliência na temperatura de 37,8°C

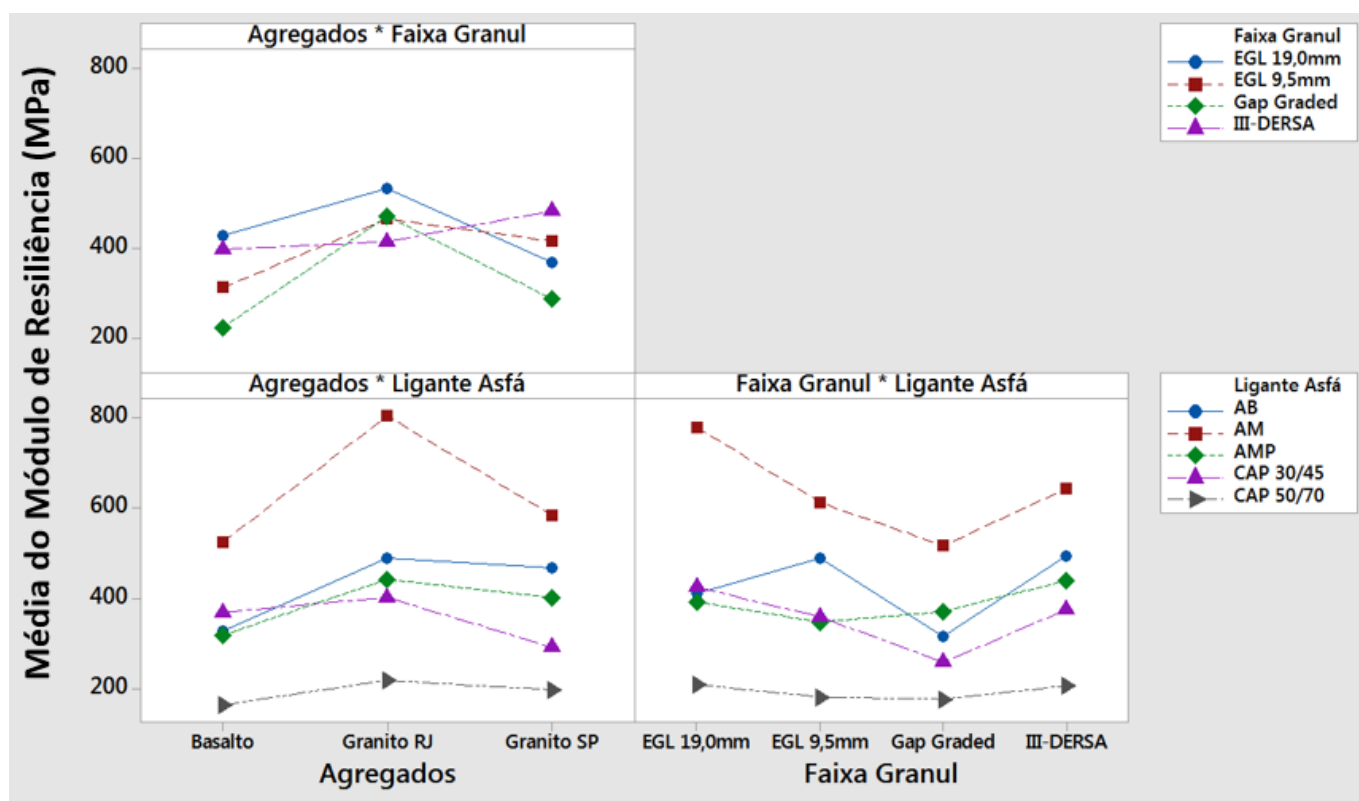


Figura 5.76: Interações combinadas dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligantes asfálticos para o módulo de resiliência na temperatura de 37,8°C

O ensaio de módulo de resiliência foi executado em três temperaturas, como já foi especificado anteriormente. Na Figura 5.77 apresenta-se a interação individual desse fator de avaliação com o tipo de ligante asfáltico e observa-se que, conforme se incrementa a temperatura, os valores de MR são reduzidos, conforme é relatado por diversos estudos da bibliografia consultada. Observa-se ainda nessa Figura que o CAP 30/45 e o CAP 50/70 são mais sensíveis à redução de rigidez em função da temperatura, já que apresentaram a maior redução de rigidez na temperatura de 37,8°C, quando comparados com os ligantes asfálticos modificados. Esse comportamento é um indicativo que os ligantes asfálticos modificados têm menor susceptibilidade térmica e resistiriam melhor às deformações em pavimentos sujeitos a elevadas temperaturas.

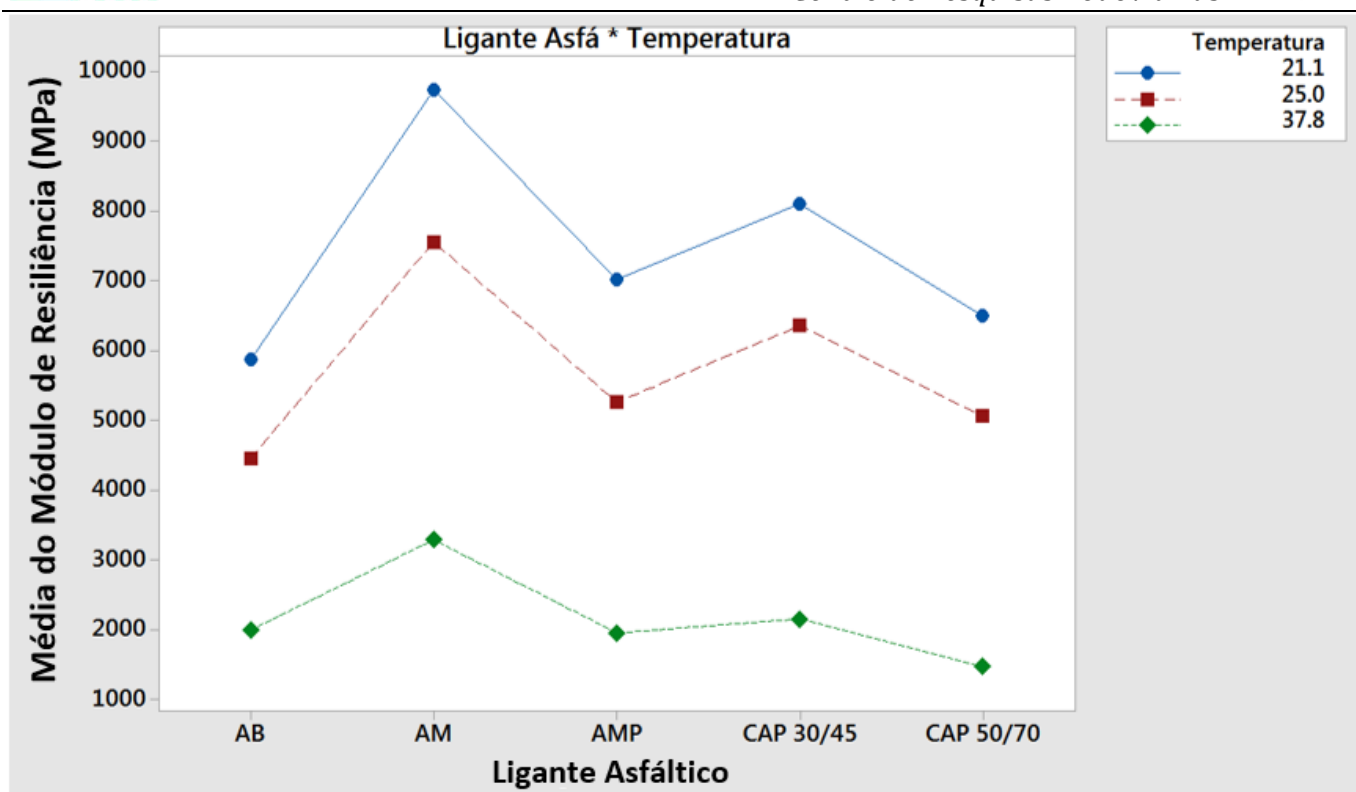


Figura 5.77: Interação individual dos fatores ligante asfáltico e temperatura de ensaio para o módulo de resiliência

#### 5.4.2. Resistência à Tração

Os resultados do parâmetro resistência à tração (RT) também foi avaliado estatisticamente e os resultados da Análise de Variância são apresentados na Tabela 5.51. Observa-se que a fonte de agregados, a faixa granulométrica e o tipo de ligante asfáltico são influentes na RT, e apenas a interação (B)x(C) não mostrou-se significativa nesse parâmetro.

Tabela 5.51: Resultados da Análise de Variância do parâmetro resistência à tração

| Fatores e Interações  | Grau de Liberdade | Soma dos Quadrados | F Calculado | F Tabelado | P     | Significativo |
|-----------------------|-------------------|--------------------|-------------|------------|-------|---------------|
| Agregados (A)         | 2                 | 0.4683             | 3.52        | 3.11       | 0.034 | Sim           |
| Granulometria (B)     | 3                 | 1.6429             | 8.24        | 2.72       | 0.000 | Sim           |
| Ligante Asfáltico (C) | 4                 | 10.5908            | 39.83       | 2.49       | 0.000 | Sim           |
| (A)x(B)               | 6                 | 3.015              | 7.56        | 2.21       | 0.000 | Sim           |
| (A)x(C)               | 8                 | 1.1422             | 2.15        | 2.06       | 0.040 | Sim           |
| (B)x(C)               | 12                | 0.5125             | 0.64        | 1.87       | 0.800 | Não           |
| Erro                  | 84                | 5.5837             |             |            |       |               |
| Total                 | 143               | 24.8509            |             |            |       |               |

A Figura 5.78 apresenta as interações individuais dos fatores considerados para a resistência à tração. Observa-se que, o uso de agregados Granito SP produz misturas asfálticas com o maior valor de RT, lembrando que todas as misturas asfálticas contêm 1,5% de cal hidratada na sua composição. Com relação à faixa granulométrica empregada, os maiores valores obtidos foram para as misturas asfálticas EGL 19,0mm, enquanto que os menores valores observaram-se nas misturas asfálticas *Gap Graded*. Vale aqui salientar que os CPs de *Gap Graded* foram moldados com o volume de vazios de projeto de 5,0%, portanto, a maior presença de vazios, pode ter ocasionado menores valores de resistência à tração.

As misturas asfálticas com ligante asfáltico de alto módulo (AM), apresentaram os maiores valores de RT, em torno de 50% superior aos valores obtidos para o CAP 50/70, que apresentou menor RT, como pode ser observado também na Figura 5.76. O uso de asfalto modificado por borracha (AB) também apresentou valores baixos, próximos aos valores obtidos nas misturas asfálticas com CAP 50/70. Esse comportamento pode ser associado aos elevados teores de ligante asfáltico de projeto característicos desse tipo de materiais. Finalmente, as misturas asfálticas com CAP 30/45 e AMP, apresentaram valores similares de RT similares, na faixa de 2,0 a 2,2 MPa.

Na Figura 5.79 também são apresentadas as interações combinadas dos fatores avaliados para o parâmetro resistência à tração. Basicamente observam-se com maior detalhe as tendências descritas anteriormente, com destaque para as misturas asfálticas com ligante asfáltico de alto módulo (AM), que apresenta os maiores valores de RT médio, para todas as fontes de agregado e faixas granulométricas usadas neste estudo.

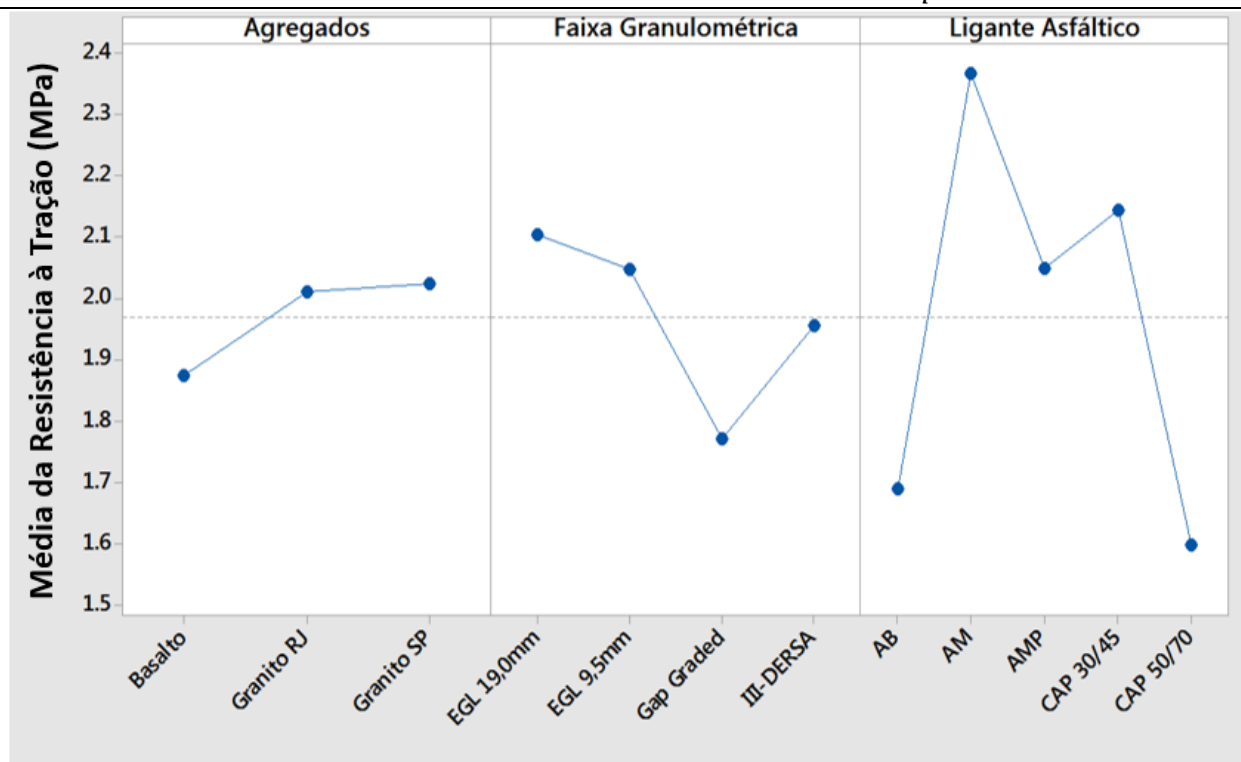


Figura 5.78: Interações individuais dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para a resistência à tração

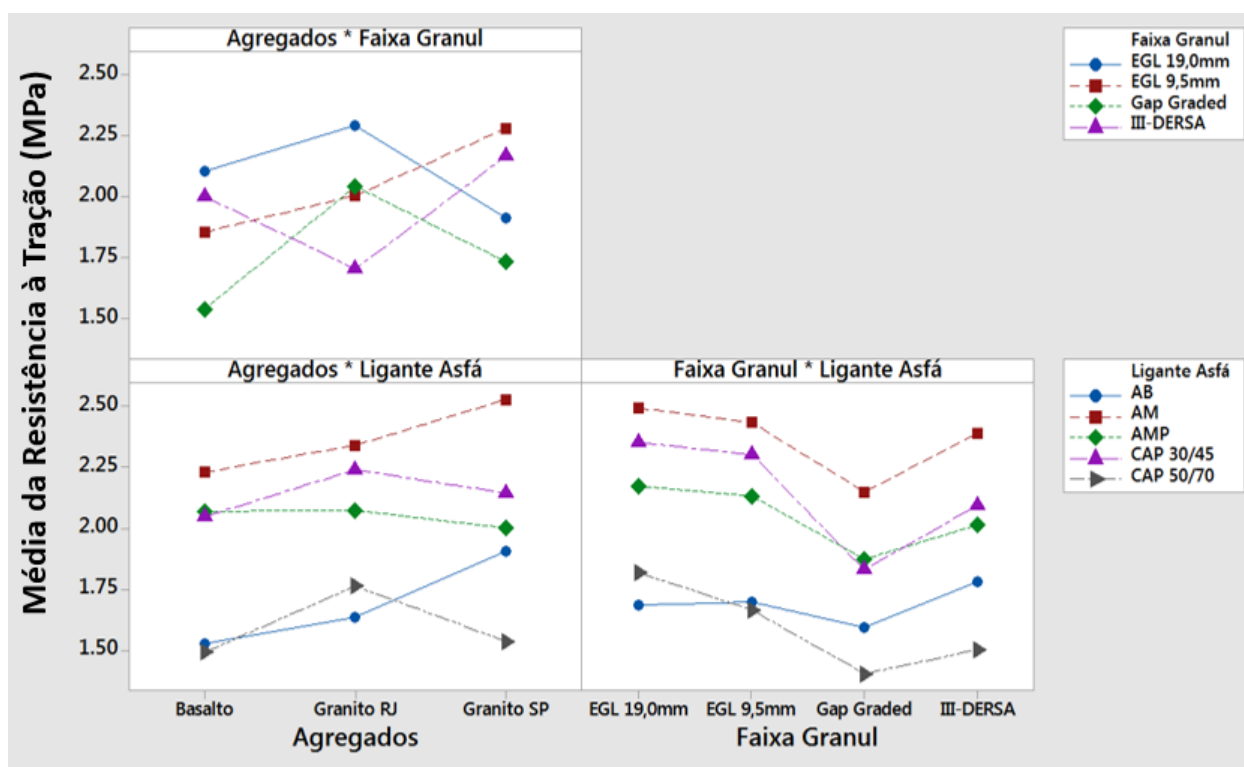


Figura 5.79: Interações combinadas dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para a resistência à tração

### 5.4.3. Módulo Dinâmico

O ensaio de módulo dinâmico é executado em distintas temperaturas e frequências de carregamento, as quais são empregadas para construir uma curva mestre, que consiste em uma função sigmoideal que relaciona a frequência reduzida com o módulo dinâmico ( $E^*$ ), como exemplifica a Figura 5.78. Para realizar a análise estatística foram selecionados, de forma arbitrária, três níveis de frequência reduzida, conforme é apresentado na Tabela 5.52 e identificado na Figura 5.80.

Tabela 5.52 Frequências reduzidas selecionadas para a análise estatística do parâmetro módulo dinâmico

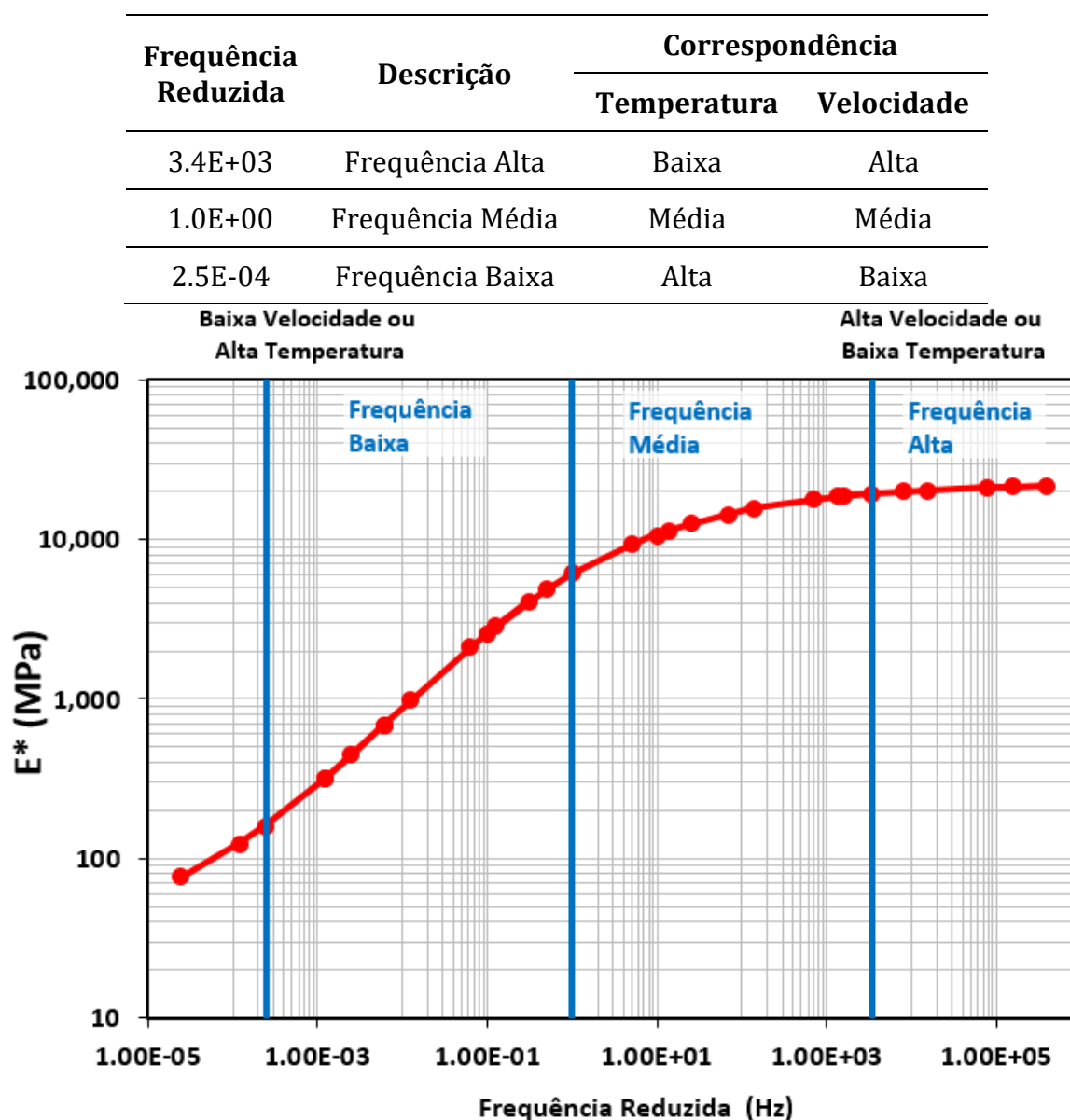


Figura 5.80: Curva mestre e frequências reduzidas empregadas para análise estatística do módulo dinâmico



A análise estatística para o parâmetro módulo dinâmico, considerou, portanto, além da fonte de agregados, faixa granulométrica e tipo de ligante asfáltico, o nível de frequência reduzida, a partir das curvas mestres construídas. Os resultados da Análise de Variância são apresentados na Tabela 5.53 e observa-se que apenas o fator fonte de agregados (A) não foi estatisticamente significativo no E\*. Assim, observa-se que o parâmetro é sensível à faixa granulométrica selecionada, ao tipo de ligante asfáltico e, como é bem sabido, à frequência reduzida.

Tabela 5.53: Resultados da Análise de Variância do parâmetro módulo dinâmico

| Fatores e Interações    | Grau de Liberdade | Soma dos Quadrados | F Calculado | F Tabelado | P     | Significativo |
|-------------------------|-------------------|--------------------|-------------|------------|-------|---------------|
| Agregados (A)           | 2                 | 1995270            | 1.53        | 3.00       | 0.219 | Não           |
| Granulometria (B)       | 3                 | 22071911           | 11.28       | 2.60       | 0.000 | Sim           |
| Ligante Asfáltico (C)   | 4                 | 2.84E+08           | 109.03      | 2.37       | 0.000 | Sim           |
| Frequência Reduzida (D) | 2                 | 1.66E+10           | 12732.3     | 3.00       | 0.000 | Sim           |
| (A)x(B)                 | 6                 | 70039639           | 17.9        | 2.10       | 0.000 | Sim           |
| (A)x(C)                 | 8                 | 16824216           | 3.23        | 1.94       | 0.002 | Sim           |
| (A)x(D)                 | 4                 | 3099904            | 1.19        | 2.37       | 0.316 | Não           |
| (B)x(C)                 | 12                | 21279055           | 2.72        | 1.75       | 0.002 | Sim           |
| (B)x(D)                 | 6                 | 11921407           | 3.05        | 2.10       | 0.007 | Sim           |
| (C)x(D)                 | 8                 | 1.46E+08           | 27.9        | 1.94       | 0.000 | Sim           |
| Erro                    | 252               |                    |             |            |       |               |
| Total                   | 431               |                    |             |            |       |               |

Na Figura 5.81 são apresentados os resultados das interações individuais para o parâmetro E\* médio, considerando a frequência reduzida média. Observa-se que as misturas asfálticas com agregados do tipo Granito RJ foram as que apresentaram maiores valores de módulo dinâmico médio, enquanto que as misturas asfálticas com Basalto SP e Granito SP tiveram valores muito próximos. Com relação à faixa granulométrica, observou-se uma tendência similar à observada nos parâmetros de RT e MR, sendo que os maiores valores de rigidez obtiveram-se nas misturas asfálticas EGL 19,0mm e os menores valores no *Gao Graded*.

Para o fator tipo de ligante asfáltico, observou-se novamente que as misturas asfálticas com AM apresentam os maiores valores de E\*, como pode ser notado nas Figuras 5.81 e 5.82, seguido pelo CAP 30/45. Já as misturas com os ligantes asfálticos modificados por polímero e borracha e o CAP 50/70 apresentaram valores de E\* médio próximos, na frequência reduzida média.

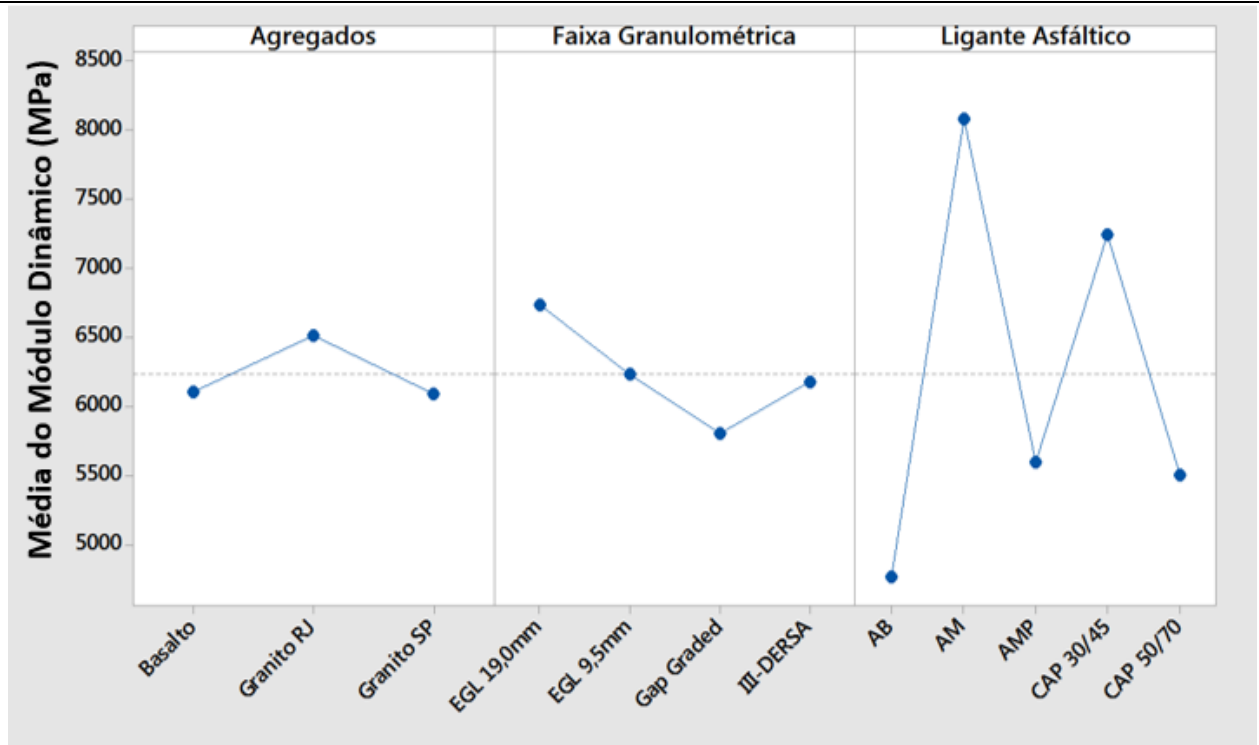


Figura 5.81: Interações individuais dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para o módulo dinâmico em frequência reduzida média

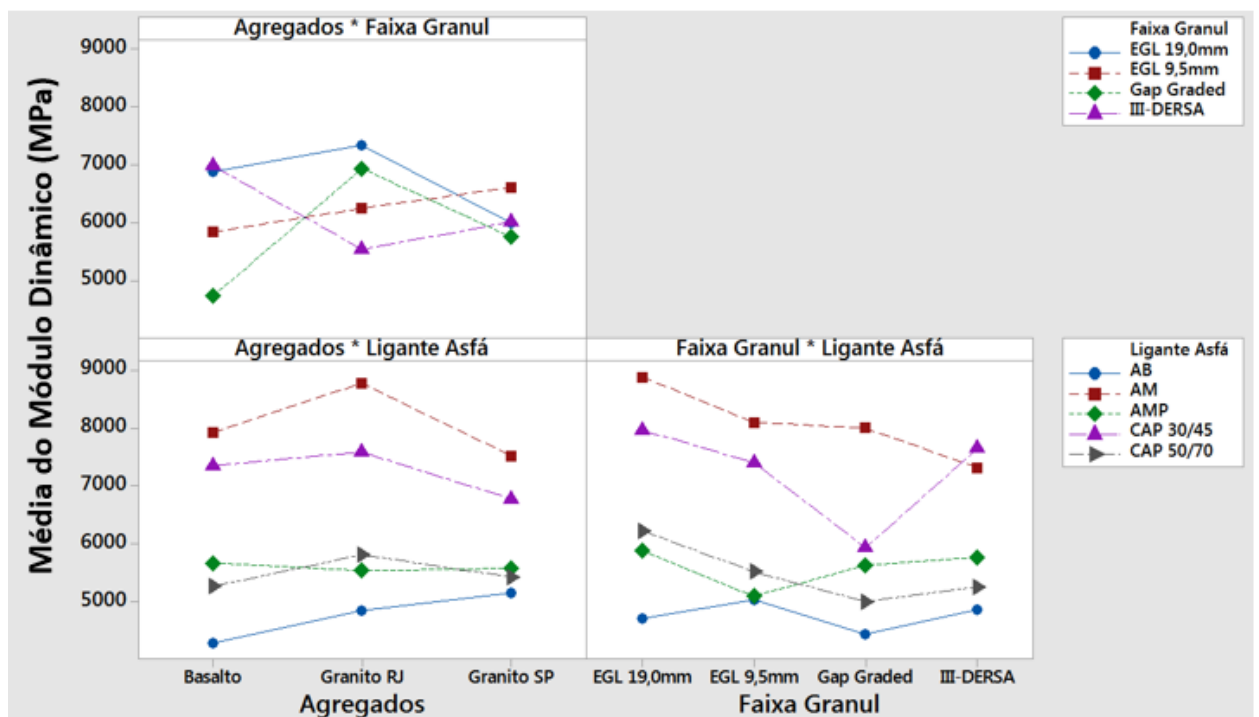


Figura 5.82: Interações combinadas dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para o módulo dinâmico em frequência reduzida média

Nas Figuras 5.83 e 5.84 apresentam-se também as interações individuais e combinadas, respectivamente, dos fatores para o módulo dinâmico na frequência reduzida baixa, que é equivalente a condicionamentos de baixa velocidade de carregamento ou elevada temperatura. As tendências observadas para os fatores fonte de agregados e faixa granulométrica são similares aos descritos anteriormente para a frequência reduzida baixa. No entanto, para o fator ligante asfáltico, observa-se que os menores de módulo dinâmico médio são obtidos nos ligantes asfálticos convencionais CAP 30/45 e CAP 50/70. Esse comportamento, novamente indica uma maior susceptibilidade à deformação permanente dos ligantes asfálticos convencionais em temperaturas elevadas.

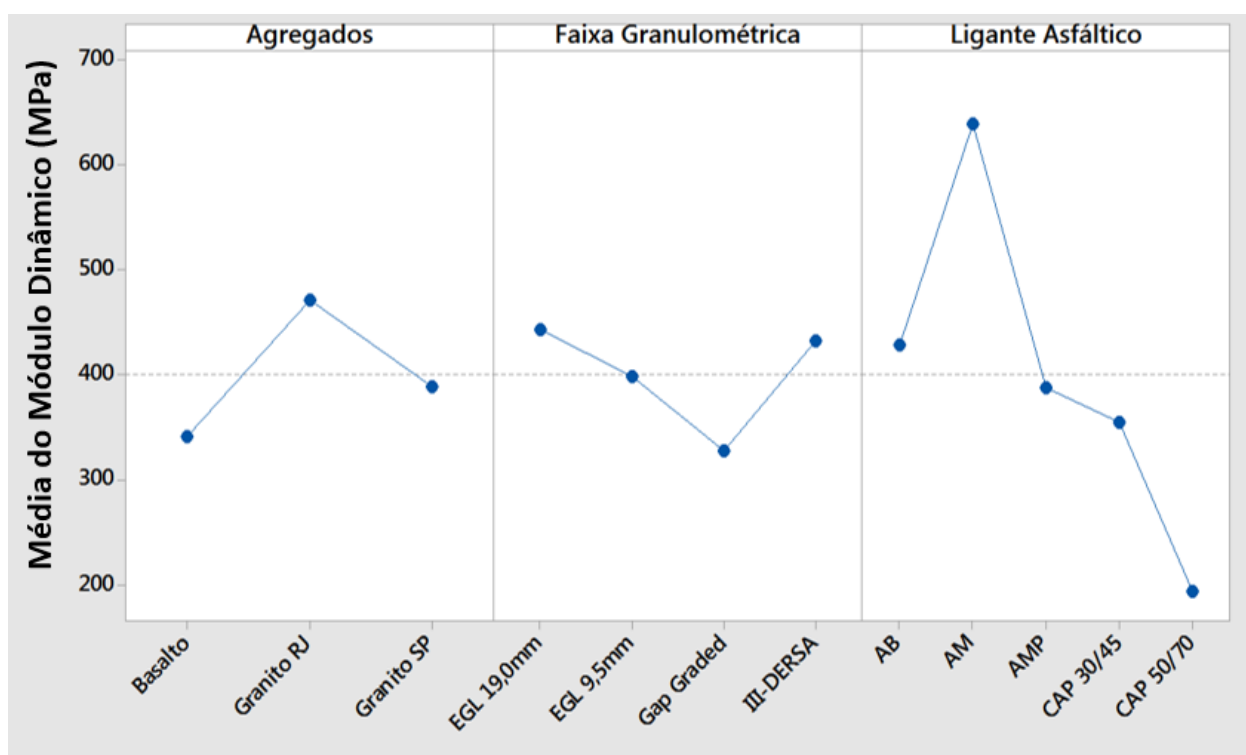


Figura 5.83: Interações individuais dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para o módulo dinâmico em frequência reduzida baixa

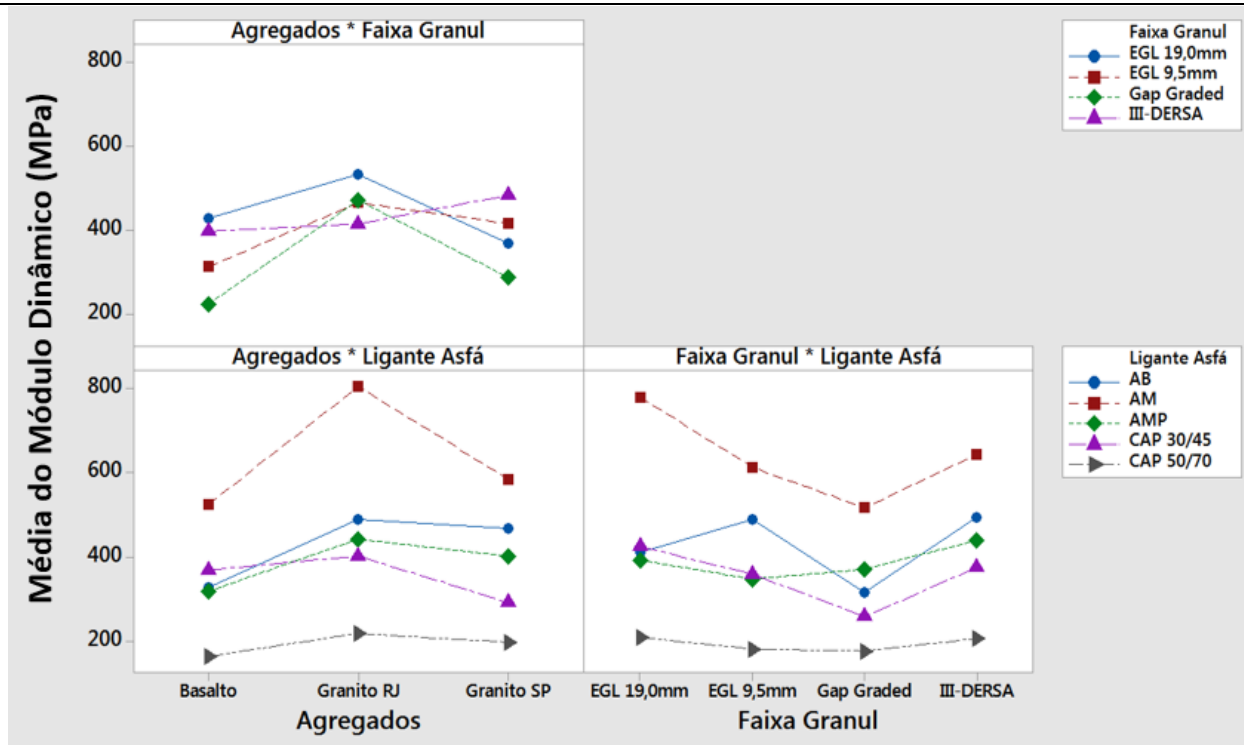


Figura 5.84: Interações combinadas dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para o módulo dinâmico em frequência reduzida baixa

A Figura 5.85 apresenta os resultados da análise estatística para a combinação dos fatores ligante asfáltico e frequência reduzida. Comprova-se que com a redução da frequência reduzida, que é equivalente ao incremento da temperatura ou à redução da velocidade de carregamento, reduz-se o módulo dinâmico médio das misturas asfálticas estudadas.

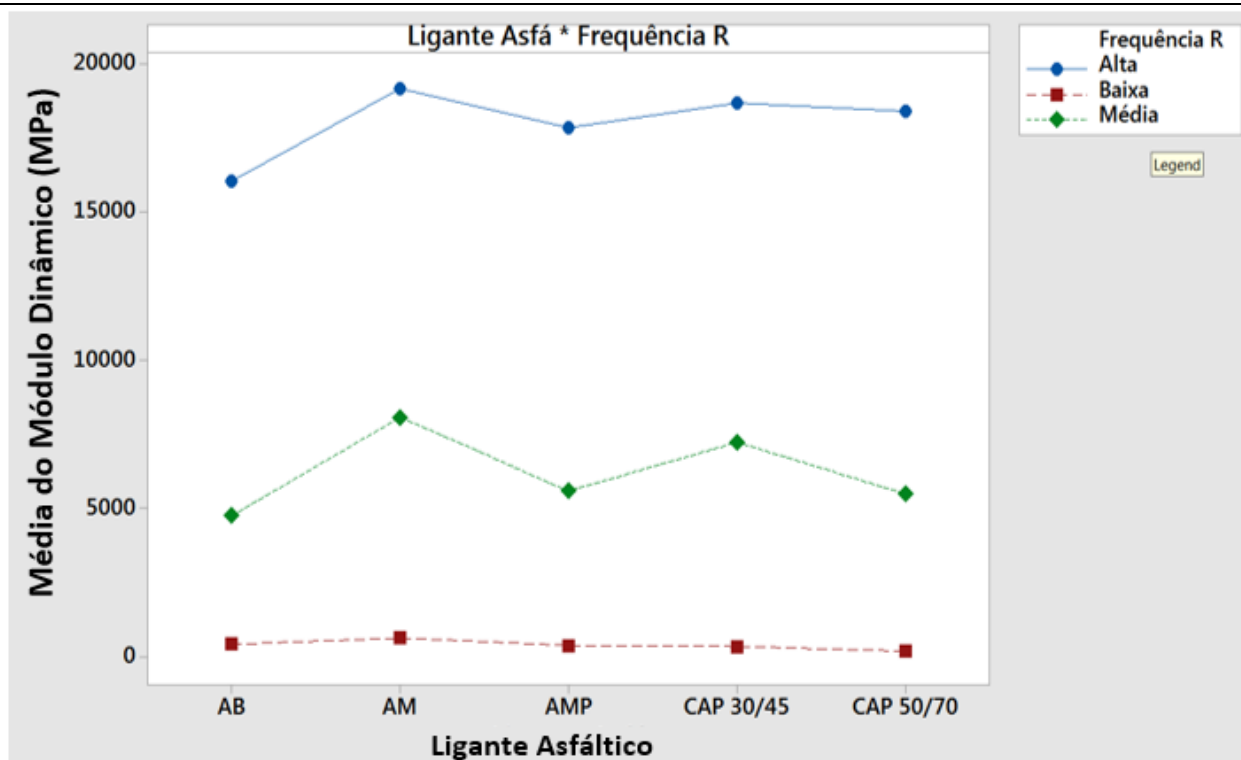


Figura 5.85: Interação individual dos fatores ligante asfáltico e frequência reduzida para o módulo dinâmico

#### 5.4.4. Flow Number

Na Tabela 5.54 são apresentados os resultados da Análise de Variância do parâmetro *flow number* (FN) e observa-se que neste parâmetro o único fator estatisticamente significativo é o tipo de ligante asfáltico. Esse comportamento não era esperado, uma vez que é sabido que a faixa granulométrica e o arranjo das partículas também influenciam a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas.

Na Figura 5.86 são apresentados os resultados das interações individuais dos fatores avaliados para o parâmetro *flow number*. Observa-se que os menores valores de FN médio foram obtidos nas misturas asfálticas com agregados graníticos do Rio de Janeiro (Granito RJ), quando comparados com os agregados Granito SP e Basalto SP, que apresentaram resultados equivalentes. Observa-se também na Figura 5.86 que as misturas asfálticas *Gap Graded* apresentaram os menores valores de FN, com destaque para a Faixa EGL 19,0mm que apresentou os maiores valores de *flow number* médio.

Ainda Na Figura 5.86 observa-se que o ligante asfáltico modificado por borracha (AB) foi o que apresentou os maiores valores médios de *flow number*, seguido pelo asfalto de alto módulo (AM) e pelo asfalto modificado por polímero (AMP). Os menores valores de FN foram registrados para os

ligantes asfálticos convencionais CAP 50/70 e CAP 30/45. Assim, observa-se que esse ensaio, realizado a temperaturas elevadas, discrimina bem o emprego de ligantes asfálticos modificados nas misturas asfálticas.

Tabela 5.54: Resultados da Análise de Variância do parâmetro *flow number*

| Fatores e Interações  | Grau de Liberdade | Soma dos Quadrados | F Calculado | F Tabelado | P     | Significativo |
|-----------------------|-------------------|--------------------|-------------|------------|-------|---------------|
| Agregados (A)         | 2                 | 4752128            | 0.59        | 3.11       | 0.558 | Não           |
| Granulometria (B)     | 3                 | 11560704           | 0.95        | 2.72       | 0.418 | Não           |
| Ligante Asfáltico (C) | 4                 | 1.03E+08           | 6.36        | 2.49       | 0.000 | Sim           |
| (A)x(B)               | 6                 | 5510067            | 0.23        | 2.21       | 0.967 | Não           |
| (A)x(C)               | 8                 | 30660912           | 0.95        | 2.06       | 0.481 | Não           |
| (B)x(C)               | 12                | 47140432           | 0.97        | 1.87       | 0.481 | Não           |
| Erro                  | 84                | 3.39E+08           |             |            |       |               |
| Total                 | 143               | 6.1E+08            |             |            |       |               |

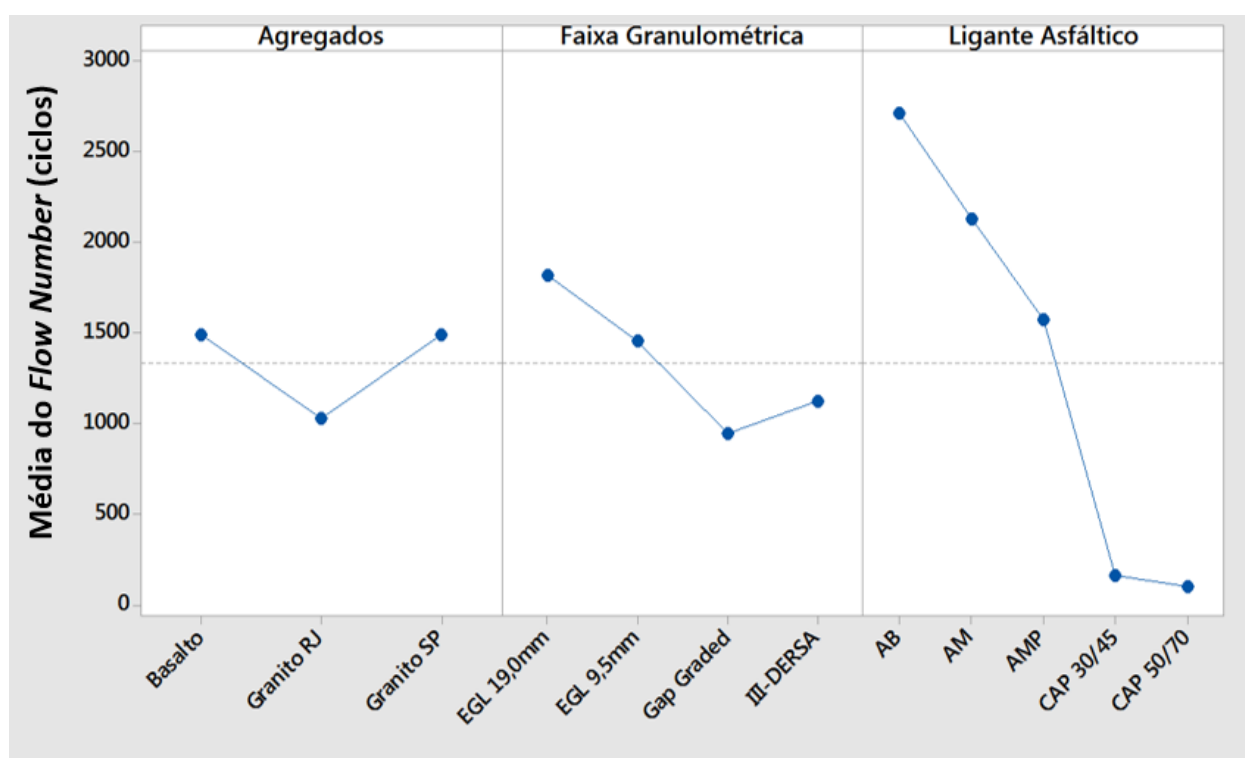


Figura 5.86: Interações individuais dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para o *flow number*

A Figura 5.87 apresenta os resultados das interações combinadas dos fatores estatísticos avaliados para o parâmetro *flow number*. Nessa figura observa-se novamente que os CAP 30/45 e CAP 50/70 apresentam os menores valores de FN para as distintas faixas granulométricas e para os três tipos

de agregados utilizados neste estudo. Já o comportamento dos ligantes asfálticos modificados, AM, AB e AMP não foi muito claro e nenhum mostrou comportamento superior absoluto, quando avaliados os fatores agregados e faixas granulométricas.

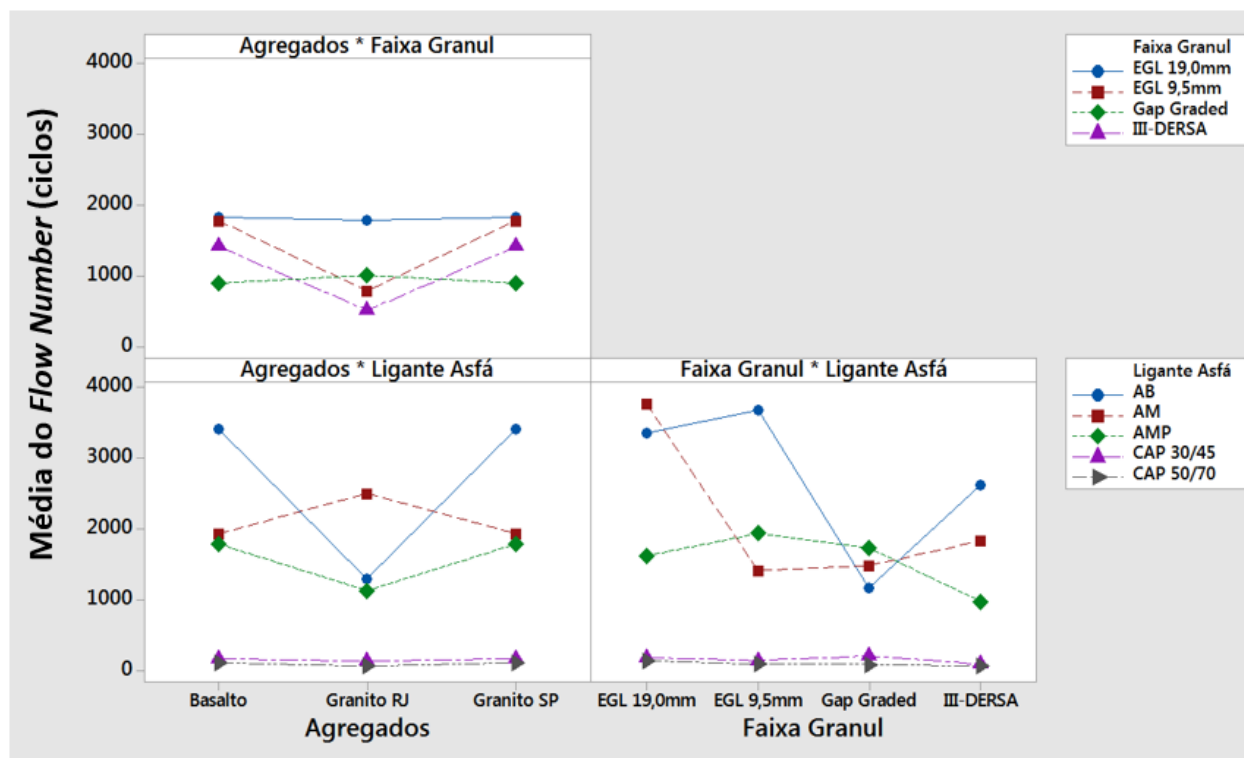


Figura 5.87: Interações combinadas dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para o *flow number*

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os parâmetros mecânicos das misturas asfálticas são recomendados para a adequada caracterização, seleção e dosagem dos materiais empregados na construção e restauração de pavimentos. Além disso, esses parâmetros são fundamentais nos processos de dimensionamento de estruturas de pavimentos que aplicam conceitos mecanicistas.

Este estudo avaliou o emprego de diversos materiais para compor misturas asfálticas usualmente disponíveis nos Estados de São Paulo e do Rio de Janeiro. As combinações de três fontes de agregados, quatro faixas granulométricas e doze ligantes asfálticos selecionados produziram 144 misturas asfálticas nas quais foram avaliados os parâmetros de resistência à tração (RT), módulo de resiliência (MR), módulo dinâmico ( $E^*$ ) e *flow number* (FN). A análise estatística realizada nesses parâmetros possibilitou avaliar tendências de comportamentos que foram resumidas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Observações estatísticas realizadas nos valores médios dos parâmetros avaliados

| Parâmetro             | Fonte de Agregados  | Faixa Granulométrica  | Tipo de ligante asfáltico  |
|-----------------------|---|---|--|
| Módulo de Resiliência | → Significativo<br>→ Maior valor no Granito SP<br>→ Menor valor no Basalto SP     | → Significativo<br>→ Maior valor na Faixa III<br>→ Menor valor no <i>Gap Graded</i> | → Significativo<br>→ Maior valor no AM<br>→ Menor valor no CAP 50/70 |
| Resistência à Tração  | → Significativo<br>→ Maior valor no Granito SP<br>→ Menor valor no Basalto SP     | → Significativo<br>→ Maior valor no EGL 19mm<br>→ Menor valor no <i>Gap Graded</i>  | → Significativo<br>→ Maior valor no AM<br>→ Menor valor no CAP 50/70 |
| Módulo Dinâmico       | → Não Significativo<br>→ Maior valor no Granito RJ<br>→ Menor valor no Basalto SP | → Significativo<br>→ Maior valor no EGL 19mm<br>→ Menor valor no <i>Gap Graded</i>  | → Significativo<br>→ Maior valor no AM<br>→ Menor valor no CAP 50/70 |
| <i>Flow Number</i>    | → Significativo<br>→ Maior valor no Granito SP<br>→ Menor valor no Granito RJ     | → Significativo<br>→ Maior valor no EGL 19mm<br>→ Menor valor no <i>Gap Graded</i>  | → Significativo<br>→ Maior valor no AM<br>→ Menor valor no CAP 50/70 |

Excetuando o fator fonte de agregados no módulo dinâmico, observa-se na Tabela 6.1 que todos os parâmetros avaliados neste estudo foram significativos para todos os parâmetros. Assim, conclui-se



que é muito importante estudar as propriedades das misturas asfálticas para sua adequada seleção e emprego em projetos de pavimentos rodoviários.

Com relação à fonte de agregados, observou-se que de forma genérica os agregados graníticos do Estado de São Paulo apresentaram os maiores valores de rigidez, resistência à tração e resistência à deformação permanente. Quanto à faixa granulométrica, os resultados mais elevados na RT, E\* e FN foram obtidos na EGL 19mm, e para o MR foram obtidos na Faixa III DERSA.

Nos ensaios de módulo de resiliência e módulo dinâmico observou-se que, em temperaturas intermediárias, o ligante asfáltico de alto módulo (AM) produz misturas asfálticas com maior rigidez seguido pelo CAP 30/45, e asfaltos modificados por polímero (AMP), por borracha (AB) e o CAP 50/70 apresentam rigidez muito próxima. No entanto, nas temperaturas elevadas de ensaio, os ligantes asfálticos modificados AM, AMP e AB apresentaram rigidez superior aos ligantes asfálticos convencionais CAP 30/45 e CAP 50/70. Esse comportamento variável em função da temperatura de execução dos ensaios é um indicativo de que os ligantes asfálticos modificados têm menor susceptibilidade térmica e resistiriam melhor às deformações em pavimentos sujeitos a elevadas temperaturas.

Finalmente, pode se afirmar que os resultados obtidos nesta pesquisa consistem em uma base de dados das propriedades fundamentais das misturas asfálticas para sua futura seleção e emprego em atividades de conservação da Rodovia Presidente Dutra e também para projetos de construção de novas estruturas relacionadas a faixas adicionais e marginais da rodovia. A seleção de materiais adequados ao tráfego e ao clima representa maior durabilidade dos pavimentos, com menores intervenções, gerando economia e trazendo conforto e segurança aos usuários da Rodovia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADVANCED ASPHALT TECHNOLOGIES, LLC. (2011). A manual for design of hot mix asphalt with commentary, NCHRP Report 673, National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C. Estados Unidos.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2008) Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice. AASHTO Designation: MEPDG-1. Washington, DC. Estados Unidos.
- American Association of State Highways Officials. AASHTO PP 62-09: Developing Dynamic Modulus Master Curves for Hot Mix Asphalt (HMA). Washington, D. C., Estados Unidos.
- American Association of State Highways Officials. AASHTO T 342-11: Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). Washington, D. C., Estados Unidos.
- American Society for Testing and Materials. ASTM D 3497 – 79 – Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures. Philadelphia, PA, Estados Unidos..
- ANITELLI, A. (2013). Estudo do dano por umidade de misturas densas com ligantes asfálticos convencional e modificado com polímero SBS. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo.
- AZAMBUJA, D. M. (2004). Estudo de recapeamentos asfálticos de pavimentos através de ensaios acelerados. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFRGS. Porto Alegre.
- BARDINI, V. S. S. (2008). Estudo de viabilidade técnica da utilização de cinzas da queima da casca de pinus em obras de pavimentação asfáltica. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo.
- BARDINI, V.S.S. (2013). Influência do Fíler Mineral em Propriedades de Misturas Asfálticas Densas. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo.

- BASTOS, J. B. S. DOS.; BORGES, R. L.; SOARES, J. B. E KLINSKY, L. M. G. (2015). Avaliação em laboratório e em campo da deformação permanente de pavimentos asfálticos do Ceará e de São Paulo. *Revista Transportes*, Volume 23, No. 3, pp. 44-55. Rio de Janeiro, RJ.
- BOCK, A. L. (2012). Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFRGS. Porto Alegre.
- BONAQUIST, R. (2012). Evaluation of Flow Number (Fn) as a Discriminating HMA Mixture Property. Final Report WHRP 12-01 for the Wisconsin Department of Transportation. Wisconsin, Estados Unidos.
- BONNAURE, F.; GEST, G.; GRAVOIS, A. E UGE, P. (1977). A new method of predicting the stiffness of asphalt paving mixtures. *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 46, pp. 64-100. Estados Unidos.
- CARDOSO, A. P. P. (2002). Efeitos em laboratório do Comportamento mecânico de misturas betuminosas utilizadas em pistas experimentais. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre.
- CASTELO BRANCO, V. T. F. (2004). Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado. Dissertação de Mestrado. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- CAVALCANTI, L. S. (2010). Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas. Dissertação de Mestrado. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- CHRISTENSEN, D.W. E ANDERSON, D.A. (1992). Interpretation of Dynamic Mechanical Test Data for Paving Grade Asphalt Cements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Volume 61, Charleston, SC. Estados Unidos.
- CLYNE, T. R.; LI, X.; MARASTEANU, M. O.; SKOK, E. L. (2003). Dynamic and resilient modulus of MN/DOT Asphalt Mixtures. Relatório Final preparado para o Departamento de Transportes de Minnessota. Estados Unidos.
- COLPO, G. B. (2014). Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas através do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre.

- COUTINHO NETO, B. (2004). Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.
- CUNHA, M. B. (2004). Avaliação do método Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo.
- DA SILVA, M.B. (2012). Caracterização de misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA e avaliação do processo executivo em pista experimental no Estado do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFRGS. Porto Alegre.
- DE BARROS, L. M. (2014). Deformação permanente de revestimentos asfálticos com diferentes ligantes: Comparação de desempenho através do parâmetro *flow number*. Trabalho de Diplomação. Engenharia Civil. UFRGS. Porto Alegre.
- DE CASTRO (2011). Misturas asfálticas com incorporação de cal: Análise Volumétrica e Mecânica. Trabalho de Diplomação. Engenharia Civil. UFRGS. Porto Alegre.
- DIAS, M. R. (2005). Utilização de Mistura Asfáltica com Borracha pelo Processo da Via Seca - Execução de um trecho experimental em Via Urbana em Porto Alegre-RS. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre.
- DONGRÉ, R.; MYERS, L.; D'ANGELO, J.; PAUGH, C. E GUDIMETTLA, J. (2003). Field Evaluation of Witczak and Hirsch Models for predicting Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt. Pre-Print of the Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Volume 74. Estados Unidos.
- DOUGAN, C.E.; STEPHENS, MAHONEY, J. E HANSEN, G. (2003). E\* - Dynamic Modulus. Test Protocol – Problems and Solutions. Report No. CT-SPR-0003084-F-03-3, University of Connecticut, Storrs, CT. Estados Unidos.
- EL-HAGE, R, B. (2012). Estudo de misturas asfálticas tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) à luz dos compactadores Marshall e Superpave. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo.
- EUROPEAN STANDARDS. BS EN 13924:2006: Bitumen and bituminous binders. Specifications for hard paving grade bitumens.

- FREITAS, H. B. De. (2007). Misturas asfálticas de Módulo Elevado com uso de escória de aciaria como agregado. Dissertação de Mestrado. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- FURLAN, A. P. (2006). Considerações acerca da adesão e da suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.
- GARCIA, G. E THOMPSON, M. (2007). HMA Dynamic Modulus Predictive Models – A Review. Research Report FHWA-ICT-07-005. Illinois Center of Transportation. Illinois, Estados Unidos.
- GIGANTE, A. C. (2007). Avaliação da susceptibilidade térmica e do efeito das condições ambientais no enrijecimento de misturas asfálticas densas à luz de seus comportamentos resilientes. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo.
- GRANDE, W. R. DE. (2011). Efeitos da cal hidratada e do ácido polifosfórico nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo.
- GRECO, J. A. S. (2004). Avaliação da influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas, à luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo.
- HAJJ, E. Y.; ULLAO, A.; SIDDHARTHAN, R.; e SEBAALY, P. E. (2010) Characteristics of the loading pulse for the flow number performance test. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 79, pp. 253-294. Estados Unidos.
- HIRSCH, F. (2009). Avaliação das propriedades de fratura de misturas asfálticas através do ensaio de tração em disco circular com fenda. Dissertação de Mestrado. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ILDEFONSO, J. S. (2007). Análise da viabilidade técnica da utilização do copolímero etileno acetato de vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas (processo seco). Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo.

- IWANAGA, F. I. (2007). Avaliação da Influência do tipo de agregado, do tipo de ligante, do tipo de moldagem e do tipo de fíler na vida de fadiga de misturas asfálticas densas. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo.
- KHANAL, P. P. E MAMLOUK, M. S. (1995). Tensile versus compressive moduli of asphalt concrete. Transportation Research Record 1492, pp 144-150. Washington D.C. Estados Unidos.
- LIMA, A. T. (2003). Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente. Dissertação de Mestrados. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- MAGALHÃES, S. T. (2004). Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho. Dissertação de Mestrado. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- MARIANO, B. P. (2013). Concreto Asfáltico com agregado granítico: Efeitos da incorporação de cal hidratada. Trabalho de Diplomação. Engenharia Civil. UFRGS. Porto Alegre.
- MARQUES, G. L. O. De. (2004). Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica: Efeito da Compactação por impacto e giratória. Tese de Doutorado. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- MOTTA, R.S.DOS. (2011). Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético. Tese de Doutorado. Escola Politécnica de Universidade de São Paulo. São Paulo.
- MOURÃO, F. A. L. (2003). Misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA. Dissertação de Mestrado. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- NASCIMENTO, L. A. H. (2008) Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.
- NASCIMENTO, L. A. H. (2008). Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente. Dissertação de Mestrado. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Final Report. NCHRP 1-37A, National Research Council, Washington, D. C., Estados Unidos.
- NEGRÃO, D. P. (2006). Estudo de asfaltos modificados por polímeros do tipo RET para aplicações em pavimentos. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- NOGUEIRA, M. G. (2008). Comparação do comportamento em campo de concretos asfálticos com CAP 30-45 e com CAP 50-70 para revestimentos de pavimentos. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- OLIVEIRA FILHO, C. M. S. (2007). Estudo do efeito de diferentes granulometrias no comportamento mecânico de misturas asfálticas densas descontínuas tipo Stone Matrix Asphalt (SMA). Dissertação de Mestrados. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- PAPAZIAN, H.S. (1962). The response of linear viscoelastic materials in the frequency domain with emphasis on asphaltic concrete. 1st International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. pp. 454-463.
- PATRIOTA, M. B. DE. (2004). Análise laboratorial de concreto betuminoso usinado a quente modificado com adição de borracha reciclada de pneus - processo seco. Dissertação de Mestrado. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- PELLINEN, T. K. E WITCZAK, M. W. (2002). Stress dependent master curve construction for dynamic (complex) modulus. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 71. Colorado Spring, CO, Estados Unidos.
- PEREIRA, M. M. L. (2012). Estudo de mistura asfáltica de módulo elevado para camadas de base de pavimento. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- PINHEIRO, J. H. M. (2004). Incorporação de Borracha de Pneu em Misturas asfálticas de diferentes granulometrias (Processos Úmido e Seco). Dissertação de Mestrados. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.



- RIVOIRE, L. J. (2014). Avaliação de misturas amornas com emprego de simulador de tráfego linear. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- ROHDE, L. (2007). Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- ROQUE, R. AND RUTH, B.E. (1987). Materials Characterization and Response of Flexible Pavements at Low Temperatures". Em Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 56 (1987), pp. 130-167. Estados Unidos.
- SCHMIDT, R. J. (1972). Practical method for measuring the resilient modulus of Asphalt-Treated Mixes. Highway Research Record, No. 404, pp 22-29. Washington D.C. Estados Unidos.
- SILVA, P. B. da. (2005). Estudo em laboratório e em campo de misturas asfálticas SMA 0/8S. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- SPECHT, L.P. (2004). Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- STEFFENON, F. (2003). Incorporação de resíduos industriais em concreto betuminoso usinado à quente. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFRGS. Porto Alegre.
- VALE, A. C. DO. (2007). Estudo Laboratorial da Viabilidade do uso de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas tipo SMA. Dissertação de Mestrados. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- VASCONCELLOS, K. L. (2004). Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias. Dissertação de Mestrados. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- VILLELA, A. R. A. (2012). *Estudo de camada de base asfáltica de módulo elevado para restauração de rodovias de tráfego muito pesado*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- WITCZAK, M. (2005). Simple Performance Tests: Summary of Recommended Methods and Database. NCHRP Report 547, Project 9-19. Transportation Research Board. ISBN 0-309-08843-7. Washington D.C. Estados Unidos.



- WITCZAK, M. W. E ROOT, R. E. (1995). Summary of complex modulus laboratory test procedures and results. American Society for Testing and Materials. STP 561, pp. 67-94. Estados Unidos.
- WITCZAK, M.; KALOUSH, K.; PELLINEN, T.; EL-BASYOUNY, M. E VON QUINTUS, H. (2002). Simple performance test for Superpave mix design. NCHRP Report 465, Transportation Research Board – National Research Council, Washington, D.C., Estados Unidos.
- YODER, E. J. E WITCZAK, M. W. (1975). Principles of pavement Design. Segunda Edição New York: John Wiley & Sons, Inc. Estados Unidos.