

 	<b>1. Relatório Número:</b> CCR-ND-MOD- RF-MAR/2018  <b>2. Data do Relatório:</b> Março de 2018 <b>3. Folhas:</b> 241	
<b>4. Título da Pesquisa:</b> "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>  Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da Concessionária NovaDutra, do Grupo CCR	<b>6. Relatório Elaborado para:</b>  Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT)	
<b>7. Período de Execução das atividades:</b> Maio de 2015 a Março de 2018.		
<b>8. Relatório preparado por:</b>  Luis Miguel Gutiérrez Klinsky (CPR) Valéria C. de Faria (CPR)		
<b>9. Resumo:</b>  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> 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. <i>Ensaio de compressão diametral de cargas repetidas</i> .....	- 7 -
2.1.2. <i>Normativas para execução do ensaio de MR</i> .....	- 13 -
2.1.2.1. <i>Normativa do DNIT</i> .....	- 13 -
2.1.2.2. <i>Normativas Norteamericanas</i> .....	- 15 -
2.1.2.3. <i>Normativa Australiana</i> .....	- 20 -
2.1.3. <i>Fatores que afetam o módulo de resiliência</i> .....	- 21 -
2.1.3.1. <i>Efeito dos agregados e granulometria</i> .....	- 22 -
2.1.3.2. <i>Efeito do tipo e do teor de ligante asfáltico</i> .....	- 23 -
2.1.3.3. <i>Estudos desenvolvidos no Brasil</i> .....	- 24 -
2.2. MÓDULO DINÂMICO .....	- 39 -
2.2.1. <i>Histórico do ensaio</i> .....	- 39 -
2.2.2. <i>Fundamentação teórica do ensaio</i> .....	- 41 -
2.2.3. <i>Normativas para execução do ensaio</i> .....	- 44 -
2.2.4. <i>Construção de curvas mestre</i> .....	- 47 -
2.2.5. <i>Modelos preditivos do módulo dinâmico</i> .....	- 51 -
2.2.5.1. <i>Modelo de Witczak</i> .....	- 51 -
2.2.5.2. <i>Modelo de Hirsch</i> .....	- 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. <i>Agregados graníticos do Estado de São Paulo</i> .....	- 56 -
3.1.2. <i>Agregados basálticos do Estado de São Paulo</i> .....	- 58 -
3.1.2. <i>Agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro</i> .....	- 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 -
3.2.3. Faixa Granulométrica EGL 9,5mm .....	- 165 -
3.2.4. Faixa Granulométrica Gap Graded .....	- 178 -
5.3. RESULTADOS DE FLOW NUMBER.....	- 191 -
5.3.1. Faixa Granulométrica Faixa III-DERSA.....	- 191 -
3.3.2. 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.

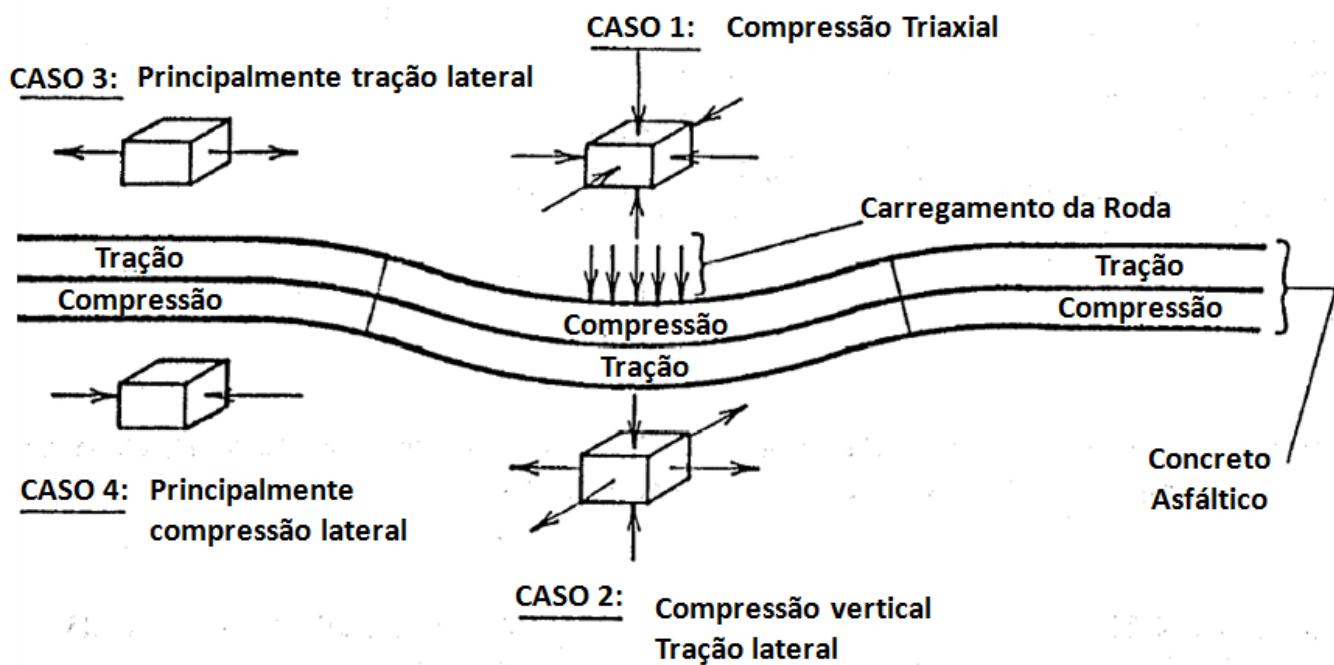


Figura 2.1: estados de tensão típicos no revestimento de concreto asfáltico induzidos pelo carregamento de uma roda. Adaptado de Roque e Buttlar (1992)

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.

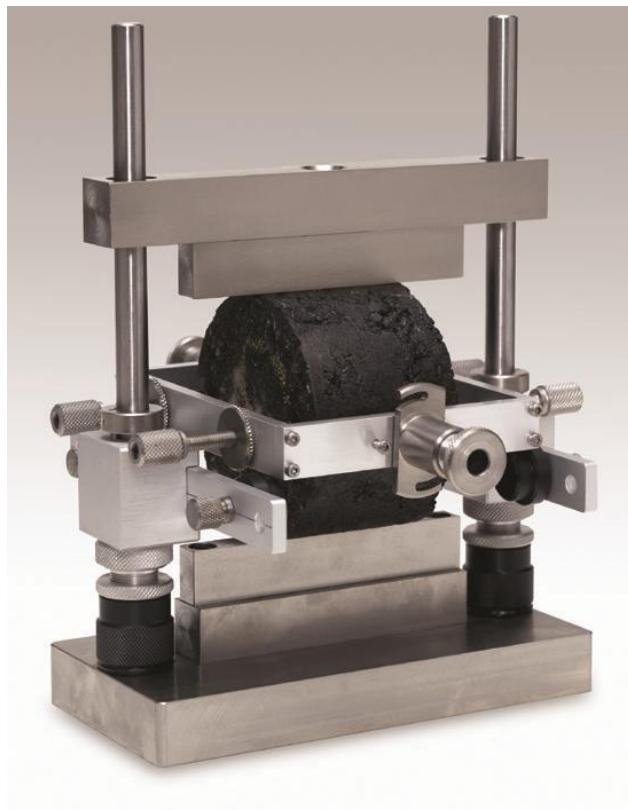


Figura 2.2: Emprego de frisos metálicos para aplicar o carregamento diametral em CPs cilíndricos tipo Marshall (FONTE: IPC-Global, 2015)

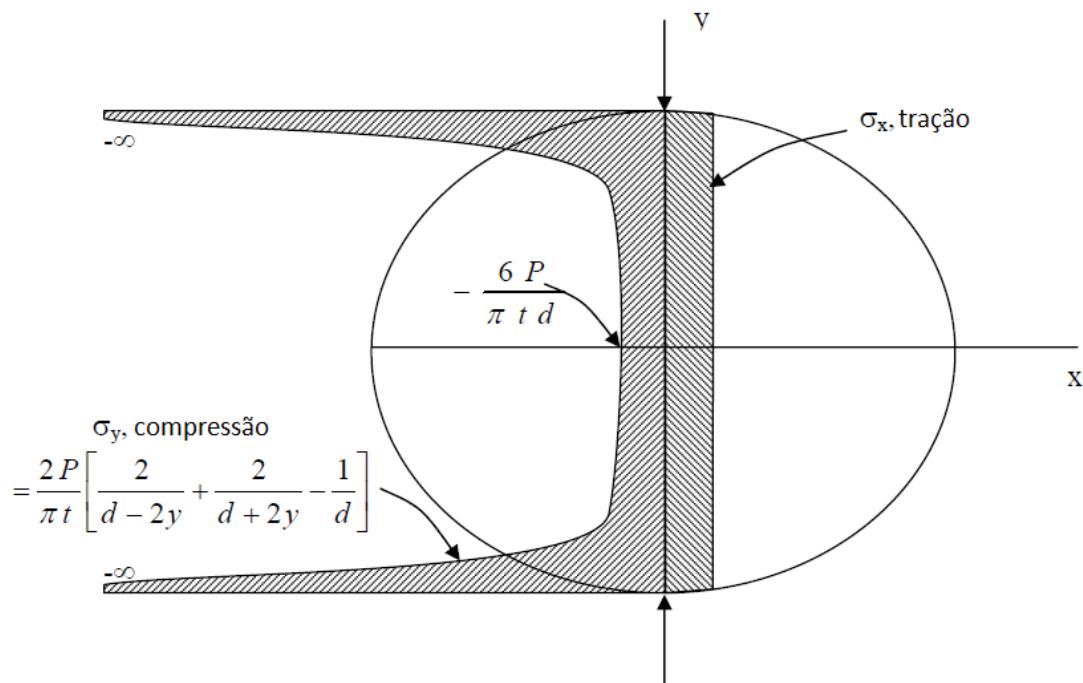
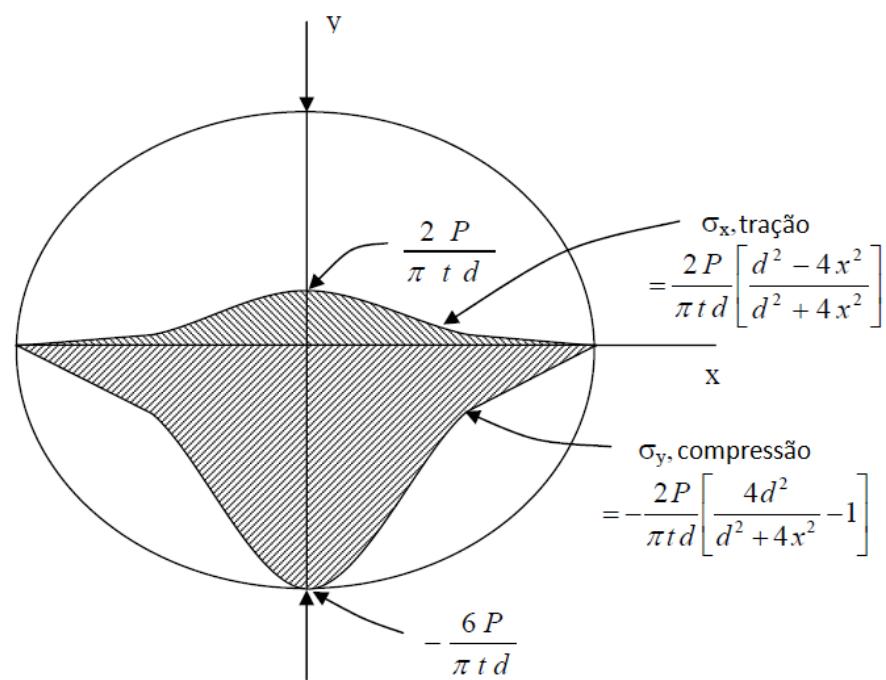


Figura 2.3: Distribuição teórica das tensões de tração e compressão nos planos diametais do corpo cilíndrico durante o ensaio de compressão diametral

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.

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

Equação 2.3

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

Equação 2.4

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

Equação 2.5

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

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.

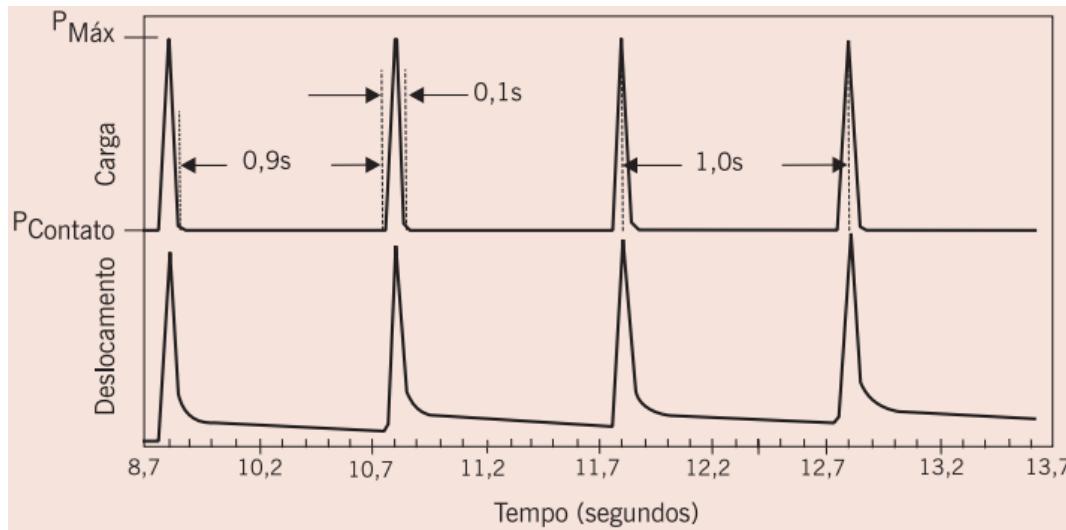


Figura 2.4: duração dos tempos de carregamento e repouso. FONTE: Bernucci et al. (2008)

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.

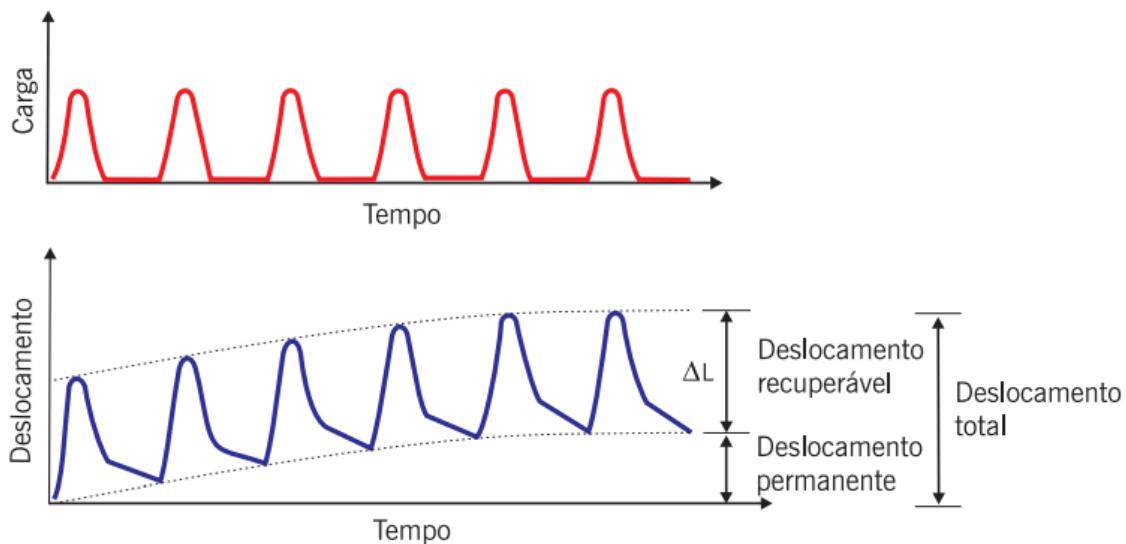


Figura 2.5: Parcelas dos deslocamentos resilientes e permanentes registrados durante os ensaios de módulo de resiliência. FONTE: Bernucci et al. (2008)

### 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 os 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  $38,1\text{mm}$  até  $63,5\text{mm}$ . 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  $5^\circ\text{C}$ ,  $15^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$  e  $25^\circ\text{C}$ , 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.

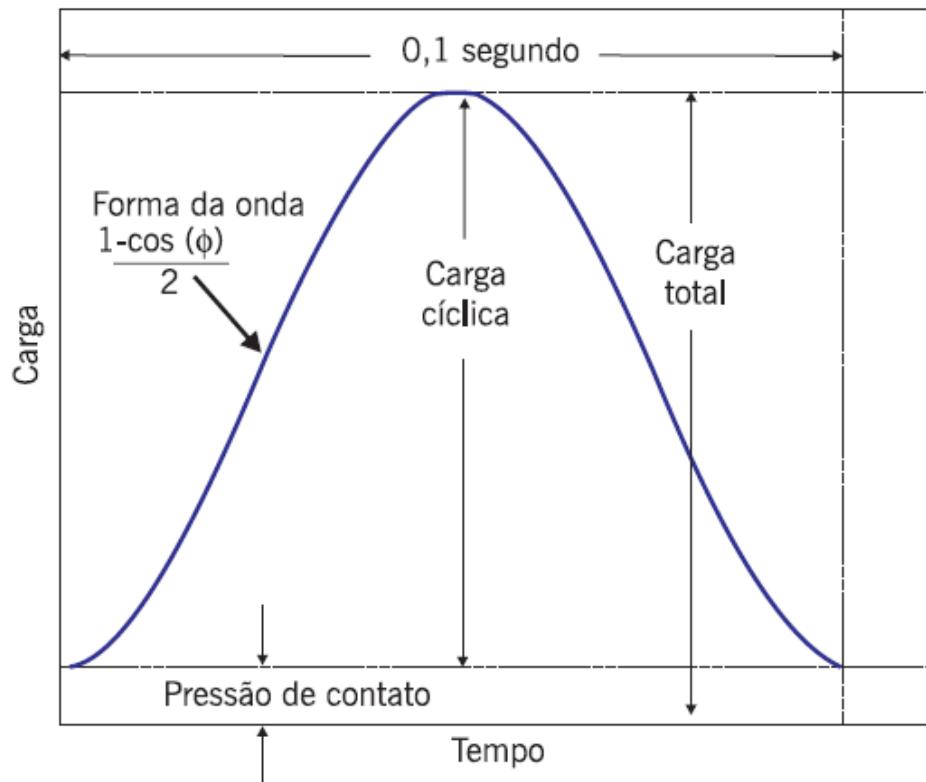


Figura 2.6: Forma do pulso de carregamento adaptado de NCHRP-285.

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 90º 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.

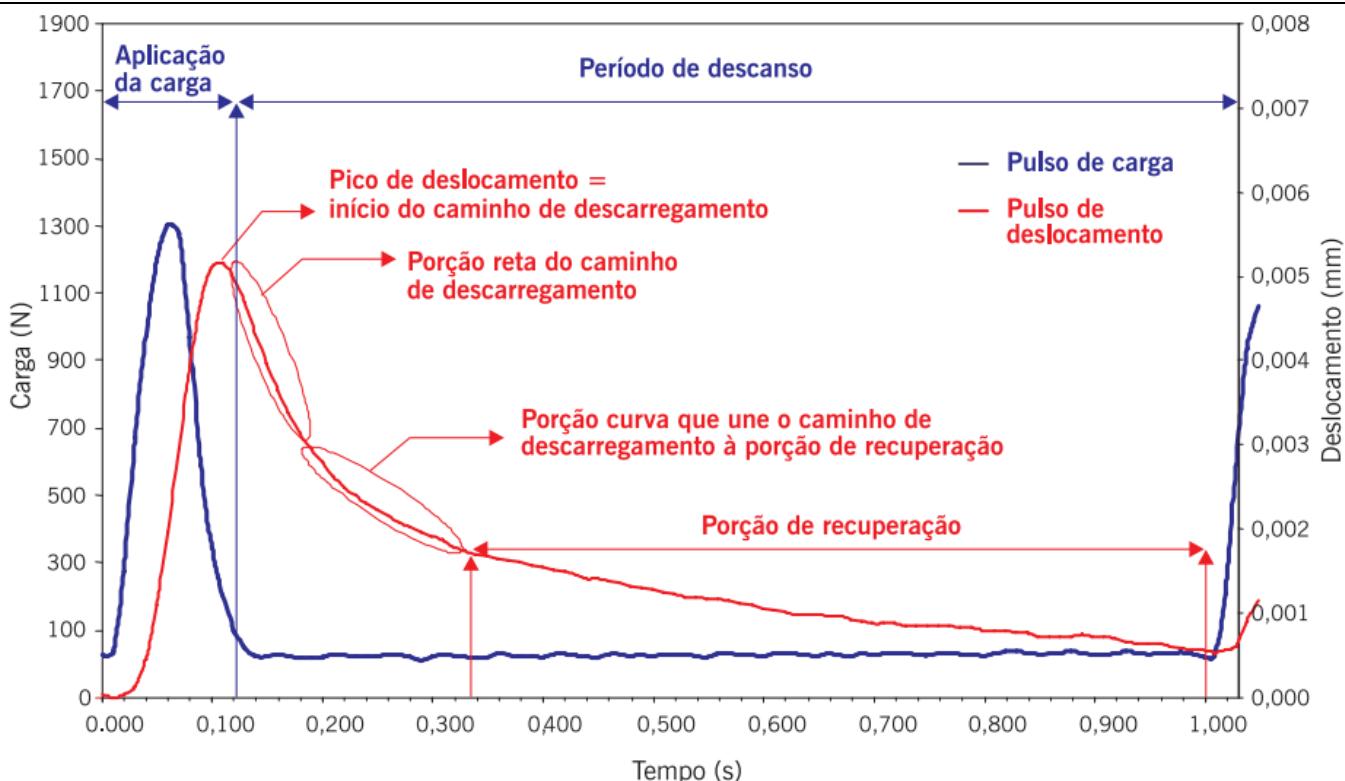


Figura 2.7: Subdivisões do pulso de deslocamento na norma ASTM7369-09.

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.

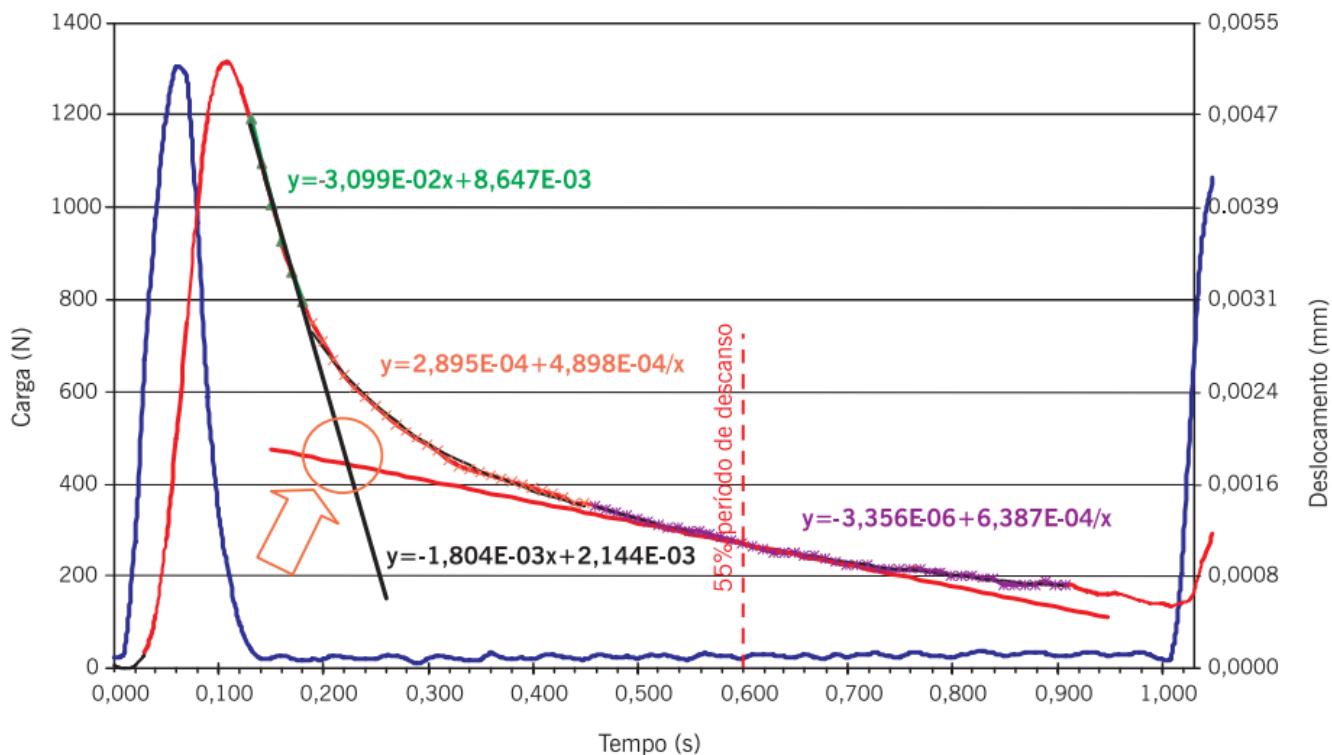


Figura 2.8: Regressões das porções de descarregamento do pulso de deslocamento.

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).

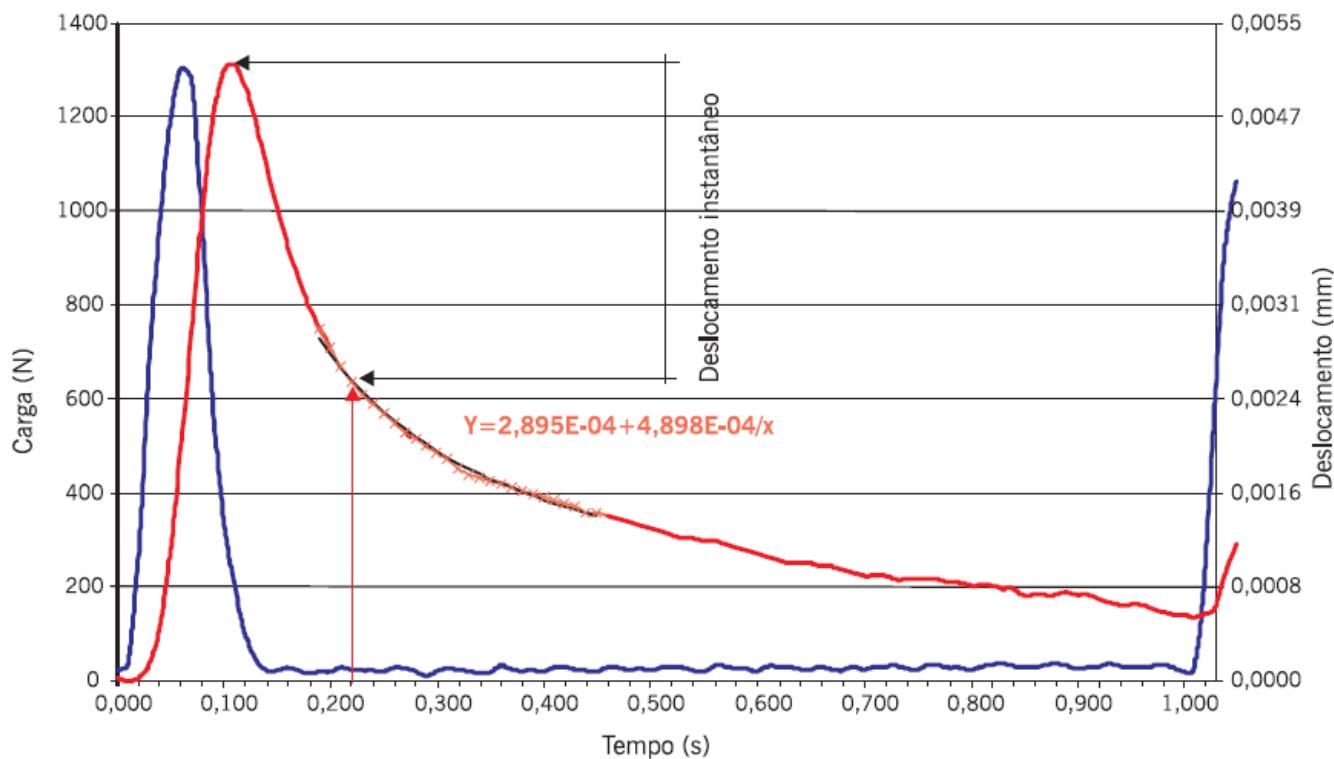


Figura 2.9: Deslocamento resiliente instantâneo. FONTE: Bernucci et al. (2008)

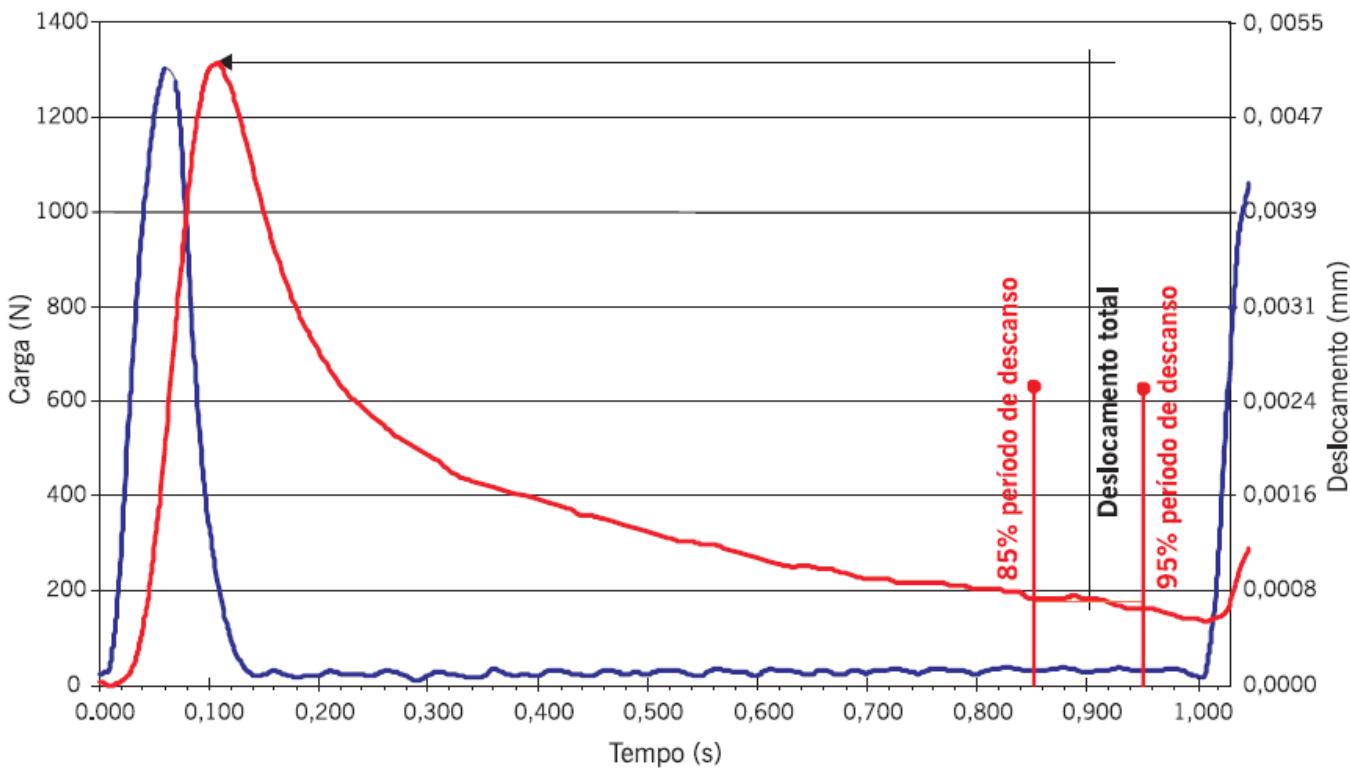


Figura 2.10: Deslocamento resiliente total. FONTE: Bernucci et al. (2008)

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.

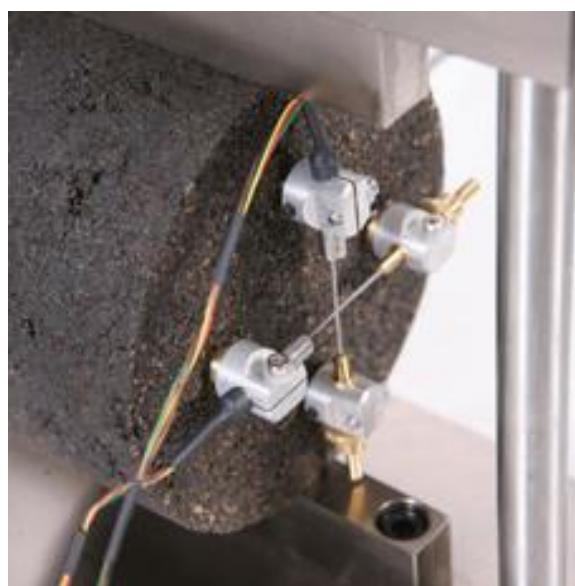


Figura 2.11: Aquisição dos deslocamentos horizontais e verticais durante o ensaio de módulo de resiliência. FONTE: IPC Global (2015)

#### 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 AUSTROADS (2008) recomenda que os CPs para o ensaio tenham de 35mm a 70mm de altura e  $100 \pm 2\text{mm}$  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.

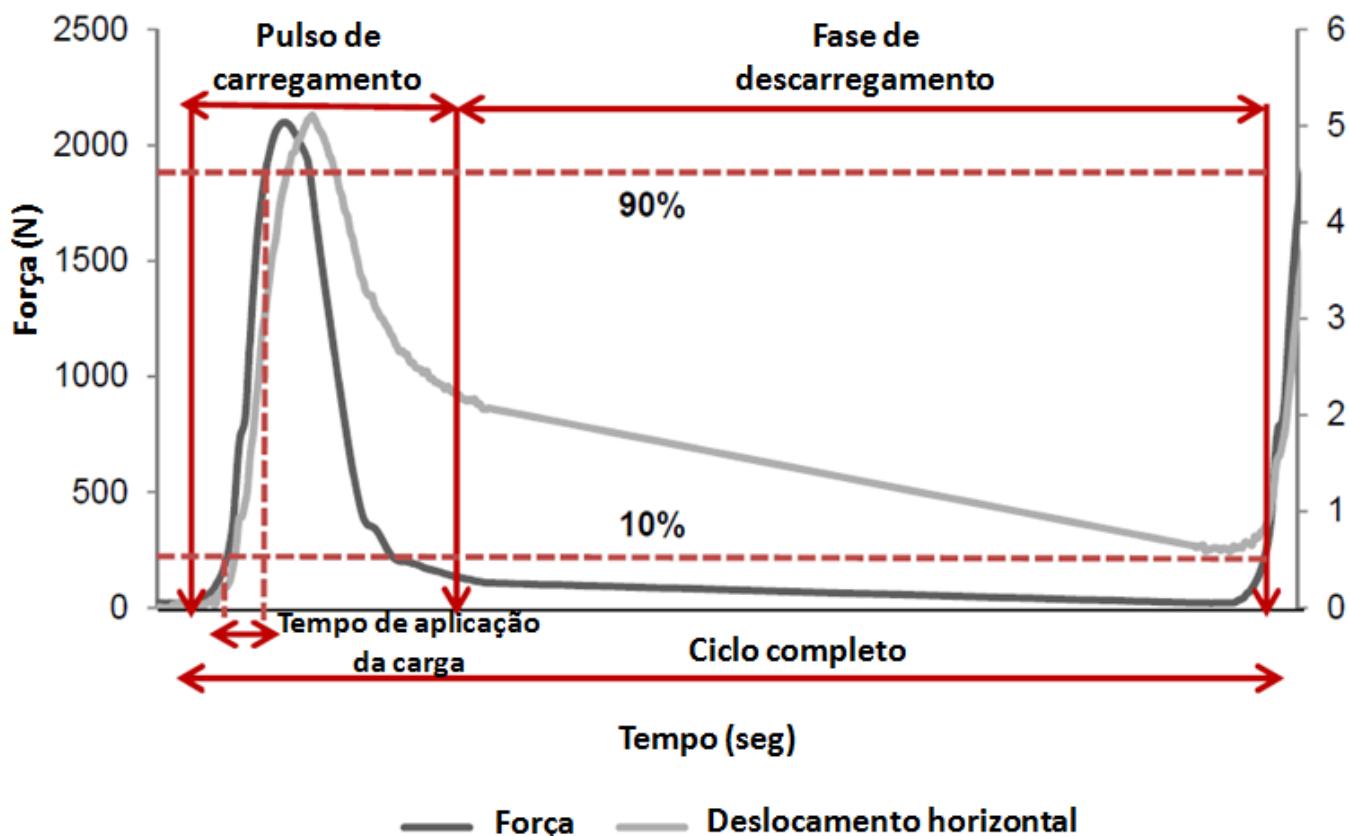


Figura 2.12: ciclo de carregamento e descarregamento no ensaio de módulo de resiliência australiano. FONTE: Kumlai et al. (2014)

### 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, consequentemente, 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 filer 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 mastique 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 63ºC. 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 diametal 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	Modifi-cador	Teor (%)	Aditivo	Volume de Vazios	Produção da Mistura Afáltica	Molda-gem dos CPs	MR 25°C (MPa)	RT 25°C (MPa)	
Furlan (2006)	Faixa "C" DNIT	Basalto	CAP 20		5,50%	1% Cal	4,0%	Laboratório	Marshall	5.782	1,48	
										8.138	1,63	
		Granito			5,50%	1% Cal	4,0%	Laboratório	Marshall	6.891	1,66	
										8.839	1,62	
	Faixa "C" DNIT	Gabro			5,50%	1% Cal	4,0%	Laboratório	Marshall	7.461	1,74	
										9.195	1,78	
		Basalto	CAP 40		5,50%	1% Cal	4,0%	Laboratório	Marshall	11.713	2,82	
										13.041	2,91	
Anitelli (2013)	Faixa "C" DNIT	Granito	CAP 50/70		4,30%	1% Cal	4,0%	Laboratório	CGS	5.331	1,41	
										4.923	1,40	
			CAP 60/85	SBS	4,50%	1% Cal	4,0%	Laboratório	CGS	5.287	1,73	
										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	
										5.246	1,38	
	AZR			Gabro	4,90%					3.597	1,19	
	Bayley				5,10%					5.514	1,39	
Gigante (2007)	Faixa "C" DNIT	Basalto	CAP-20		5,50%		4,0%	Laboratório	Marshall	6.252	1,62	
						Cal				6.911	1,68	
					5,50%					9.431	1,71	
						Cal				8.160	1,64	
					5,50%					7.093	1,90	
						Cal				7.237	2,11	
		Granito	CAP 40		5,50%		4,0%	Laboratório	Marshall	10.871	2,82	
						Cal				13.516	2,89	
					5,50%					12.915	2,49	
						Cal				12.662	2,36	
					5,50%					12.088	2,50	
						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-cador	Teor (%)	Aditivo	Volume de Vazios	Produção da Mistura Afáltica	Molda-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
					6,80%			Laboratório	Marshall 50g	3.147	1,26
					6,80%				Giratório 77g	2.668	1,08
					6,10%				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
					4,80%	Cal Hidratada				6.460	1,97
		Basalto			4,90%	Cimento Portland				6.716	2,12
					4,80%	Calcário				6.329	1,99
	Superpave 25mm	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
					4,70%	Cal Hidratada				4.199	1,15
		Basalto		20% Borracha	4,70%	Cimento Portland				3.851	1,21
					4,50%	Calcário				4.069	1,18
Greco (2004)	Faixa "B" DNIT	Basalto	CAP 20	-	4,5	4,00%	Laboratório	Marshall	11830	1,75	
	Faixa "C" DNIT				5				3677	1,97	
	Faixa "B" DNIT	Basalto	CAP AMP	4,5% SBS	4,5				10729	2,204	
	Faixa "C" DNIT				5				4908	2,108	
	Faixa "B" DNIT	Basalto	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-cador	Teor (%)	Aditivo	Volume de Vazios	Produção da Mistura Afáltica	Molda-gem dos CPs	MR 25°C (MPa)	RT 25°C (MPa)
Grande (2011)	Mix IV-B Asphalt Institute	CAP 50/70	-							5313	1,67
			0,6% PPA							5351	1,73
			1,2% PPA							8360	1,94
			-		4,6	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
			-		4,6					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			-				5374	1,6
		Granito				Cal				7163	1,7
		Gabro				-				6370	1,7
		Basalto	CAP 40			Cal				6705	1,64
		Granito				-				7367	1,9
						Cal				9042	2,1
						-				11751	2,8
						-				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
			CAP 30/45		4,40%	Cal Hidratada	3,9%	Laboratório	Giratório	7.166	1,38
								Usina	Giratório	5.682	1,33
								Usina	Campo	3.340	0,8
								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			
	<i>Gap Graded</i> 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	Modifi-cador	Teor (%)	Aditivo	Volume de Vazios	Produção da Mistura Afáltica	Molda-gem 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
	Faixa C DNIT Acima ZR				6,40%				Giratório	6.003	1,72
	Faixa C DNIT Através ZR				5,80%				Marshall	3.506	1,07
	SMA 12,5mm				6,40%				Giratório	6.421	1,47
	SMA 9,5mm				5,60%				Marshall	3.326	1,28
					6,10%				Giratório	4.181	1,43
					6,60%				Marshall		
					6,90%				Giratório	4.747	0,98
					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				Marshall	3.184	0,67
					5,80%				Giratório	4.111	1,14
					6,10%				Marshall	2.689	0,76
					Fibras de Coco				Giratório	4.003	1,11
					6,10%						
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			4.776	1,30
					0,8% AR-75		5,10% 30% Fresado			7.524	1,30
					1,2% AR-75		5,20% 50% Fresado			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
					6,80%		3,9%			3.745	1,10
					7,20%		3,2%			3.790	1,11
					-		3,5%			3.351	1,17
					-		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	Modifi-cador	Teor (%)	Aditivo	Volume de Vazios	Produção da Mistura Afáltica	Molda-gem 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	Modifi-cador	Teor (%)	Aditivo	Volume de Vazios	Produção da Mistura Afáltica	Molda-gem 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
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	Modifi-cador	Teor (%)	Aditivo	Volume de Vazios	Produção da Mistura Afáltica	Molda-gem 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	Modifi-cador	Teor (%)	Aditivo	Volume de Vazios	Produção da Mistura Afáltica	Molda-gem 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 Fundição Verde	3,8	Laboratório	Marshall 75 golpes	7303	1,333
		Riodacítica	CAP-20		7,2	Areia de Fundição 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	Modificadora	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		
					4,50%					Marshall 75 golpes	4.045	1,12	
Marques (2004)	Faixa A DNIT	Granito/Gnaisse	CAP20	4,50%				Laboratório	Giratório 100 giros	6.160	1,29		
										Marshall 75 golpes	8.769	2,04	
			CAP40							Giratório 100 giros	8.335	1,76	
										Marshall 75 golpes	4.506	1,06	
			CAP50/60							Giratório 100 giros	3.597	1,05	
										Marshall 75 golpes	6.419	1,58	
			CAP20							Giratório 100 giros	8.853	1,69	
										Marshall 75 golpes	9.571	2,05	
	Faixa B DNIT	Granito/Gnaisse	CAP40	4,50%						Giratório 100 giros	10.175	2,55	
										Marshall 75 golpes	3.927	1,07	
			CAP50/60							Giratório 100 giros	4.792	1,39	
										Marshall 75 golpes	7.507	2,24	
			CAP20							Giratório 100 giros	7.056	2,21	
										Marshall 75 golpes	10.416	2,65	
	Faixa C DNIT	Granito/Gnaisse	CAP40	5,00%						Giratório 100 giros	10.873	2,96	
										Marshall 75 golpes	4.984	1,40	
			CAP50/60							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	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		
				-	5,50%				3.512	1,62		
				-	5,00%				4.179	2,04		
				-	5,50%				4.664	2,14		
			Flex 65/90	Polímero	5,00%				2.999	1,47		
			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	Modificador	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	
			CAP 20		5,50%		3,4%		Marshall	6.600	1,58	
Magalhães (2004)	Faixa B DNIT / EME 0/14	Granito	AMP	7,5% EVA			3,6%			Giratório	5.140	1,52
			CAP Módulo Elevado	RASF			4,0%			Marshall	10.980	2,25
										Giratório	7.680	1,95
									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	
				80% Escória	6,8%					2.188	0,76	
					6,2%					2.051	0,75	
		Granito										

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	-	Laboratório - Marshall 75 golpes	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 *Tecnhical 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) (Dougan 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.

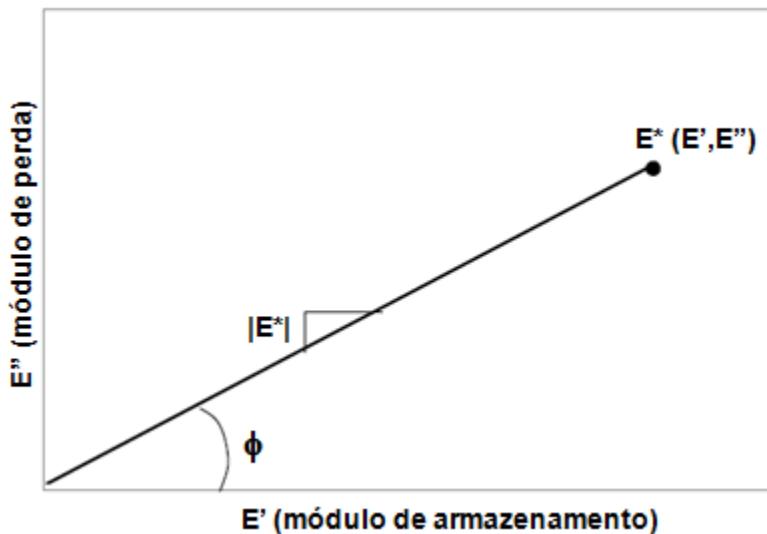


Figura 2.13: Relação gráfica entre o módulo complexo e os módulos de armazenamento e de perda

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.

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

Onde:  $\sigma$  = tensão axial;

$\sigma_0$  = amplitude da tensão;

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

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \operatorname{sen}(\omega t - \phi)$$

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.

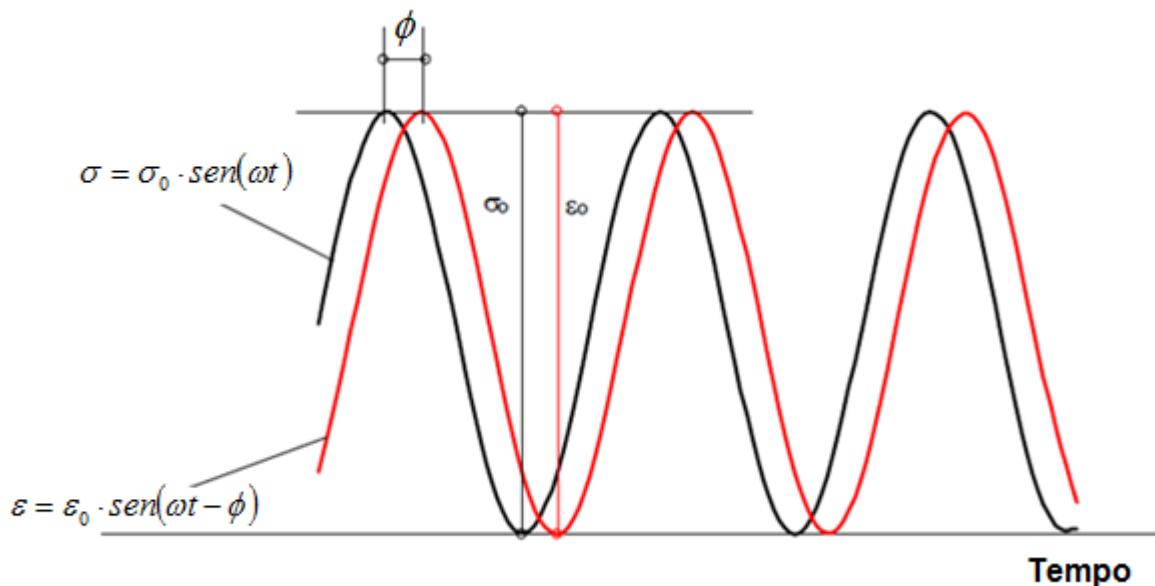


Figura 2.14: Curva de tensão e deformação durante o carregamento senoidal. Fonte: Garcia e Thompson (2007)

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.

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

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

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.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$$

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

<b>Parâmetro</b>	<b>ASTM D3497</b>	<b>AASHTO T 342-11</b>
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 25°C 40°C	-10,0°C 4,4°C 21,1°C 37,8°C 54,4°C
	Começar pela temperatura mais baixa	Começar pela temperatura mais baixa
Frequências de Carregamento	1Hz 4Hz 16Hz	0,1Hz 0,5Hz 1,0Hz 5,0Hz 10Hz 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

<b>Temperatura de Ensaio (°C)</b>	<b>Tempo a partir de uma temperatura de 25°C (h)</b>	<b>Tempo a partir da temperatura anterior de ensaio (h)</b>
-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

<b>Temperatura de Ensaio (°C)</b>	<b>Faixa de Tensão (kPa)</b>
-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 Witzak, 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.

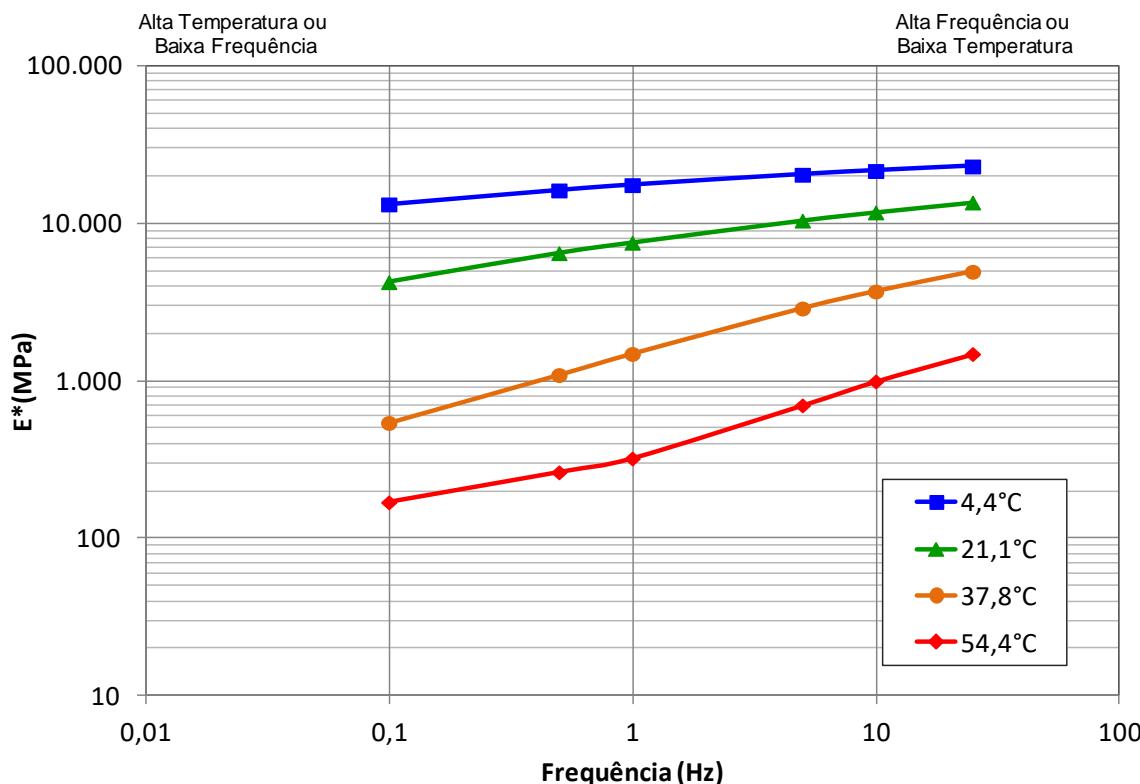


Figura 2.15: Resultados do ensaio de módulo dinâmico em diversas temperaturas em função da frequência de carregamento

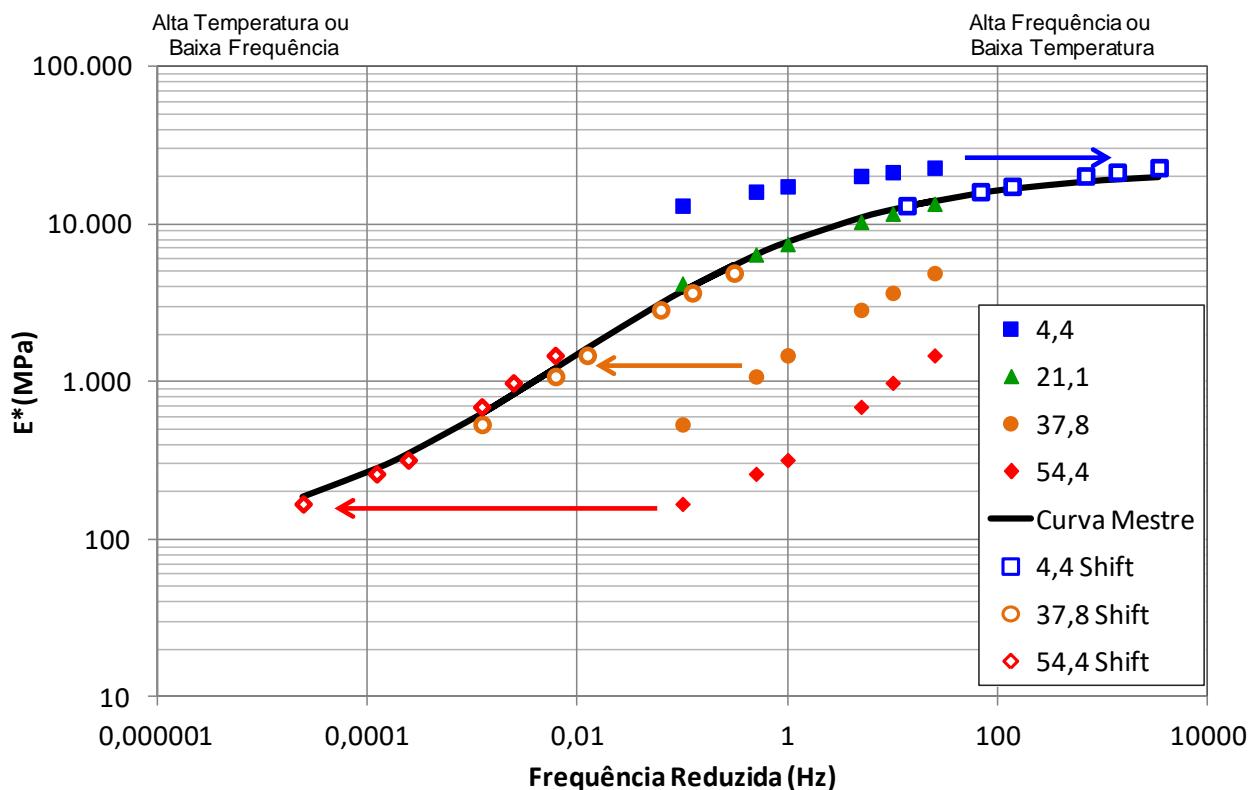


Figura 2.16: Construção da curva mestre após deslocamentos dos dados na temperatura de referência

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 irrationais 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 sigmoidal definida pela Equação 2.24. Nesse estudo propõe-se construir as curvas mestre com ajuste dos dados de módulo dinâmico em uma função sigmoidal, 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 sigmoidal, empregando qualquer função de deslocamento para resolver a frequência reduzida ( $fr$ ), ou tempo ( $tr$ ), em função da temperatura (Pellinen e Witczak, 2002).

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1+e^{\beta+\gamma\log(tr)}}$$
 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 sigmoidal.

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 gradação 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).

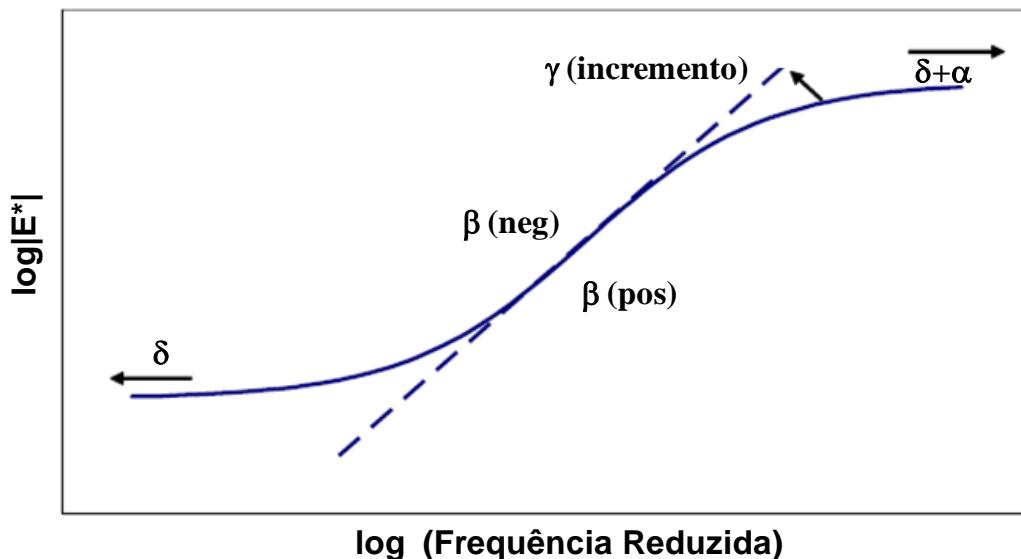


Figura 2.17: Função sigmoidal. Fonte: Pellinen e Witczak (2002)

A justificativa para utilizar a função sigmoidal no ajuste do módulo dinâmico obtido por carregamento axial é fundamentada nas observações físicas do comportamento da mistura asfáltica. Na região superior, a função sigmoidal 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 sigmoidal 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.

$$\log|E^*| = 3,750063 + 0,02932\rho_{200} - 0,001767(\rho_{200})^2 - 0,002841\rho_4 - 0,058097V_a - 0,802208 \left( \frac{V_{beef}}{V_{beff}+V_a} \right) + \frac{3,871977 - 0,0021\rho_4 + 0,003958\rho_{38} - 0,000017(\rho_{38})^2 + 0,00547\rho_{34}}{1+e^{(-0,603313 - 0,313351\log(f) - 0,393532\log(\eta))}}$$
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 (VCA), (Christensen et al. 2003).

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

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

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.

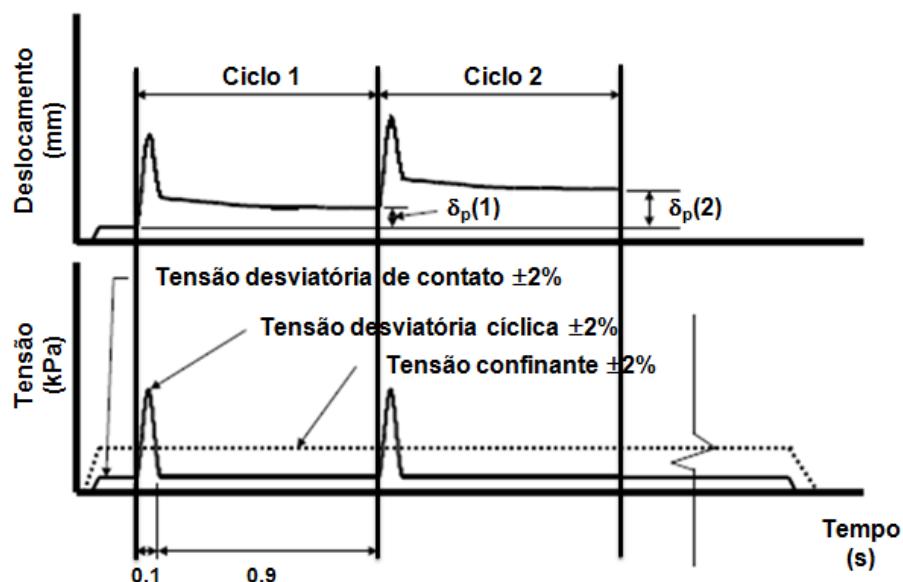


Figura 2.18: Representação esquemática do carregamento no ensaio de *Flow Number*. FONTE: Bonaquist 2012

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.

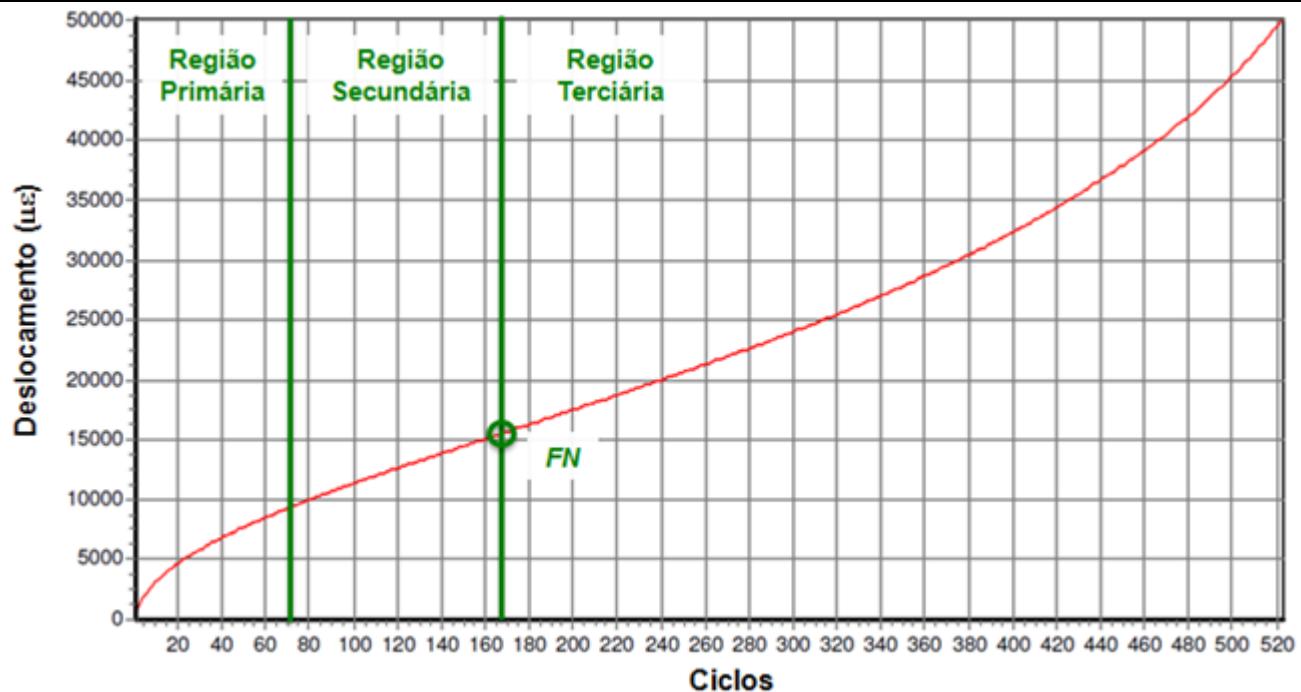


Figura 2.19: Regiões durante o ensaio uniaxial de carga repetida e obtenção do FN

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 / Níveis de Tráfego (número N)	Vv (%)	Temp. (°C)	Tensão (kPa)	Leve	Médio	Pesado	Extremamente 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	-
Advanced Asphalt Technologies (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 (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	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

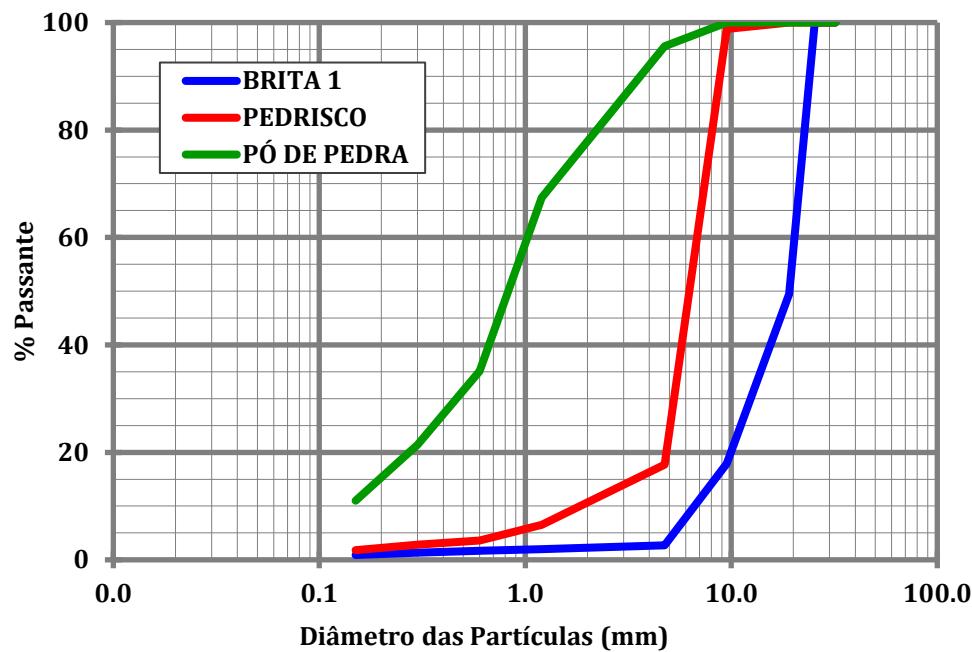


Figura 3.1: Granulometria das frações dos agregados graníticos do Estado de São Paulo

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 (%)
<b>32,0</b>	100,0	100,0	100,0
<b>25,4</b>	100,0	100,0	100,0
<b>19,1</b>	63,5	100,0	100,0
<b>9,50</b>	28,3	99,1	100,0
<b>4,75</b>	3,5	10,9	98,7
<b>1,20</b>	1,4	0,9	70,8
<b>0,60</b>	0,8	0,4	34,8
<b>0,30</b>	0,6	0,3	21,6
<b>0,150</b>	0,4	0,2	12,2

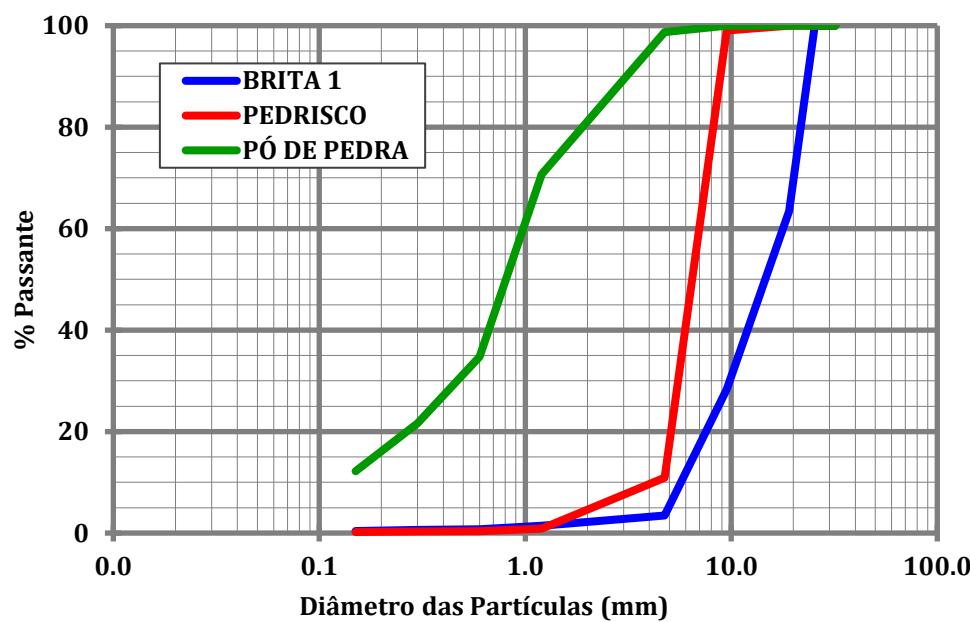


Figura 3.2: Granulometria das frações dos agregados basálticos do Estado de São Paulo

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

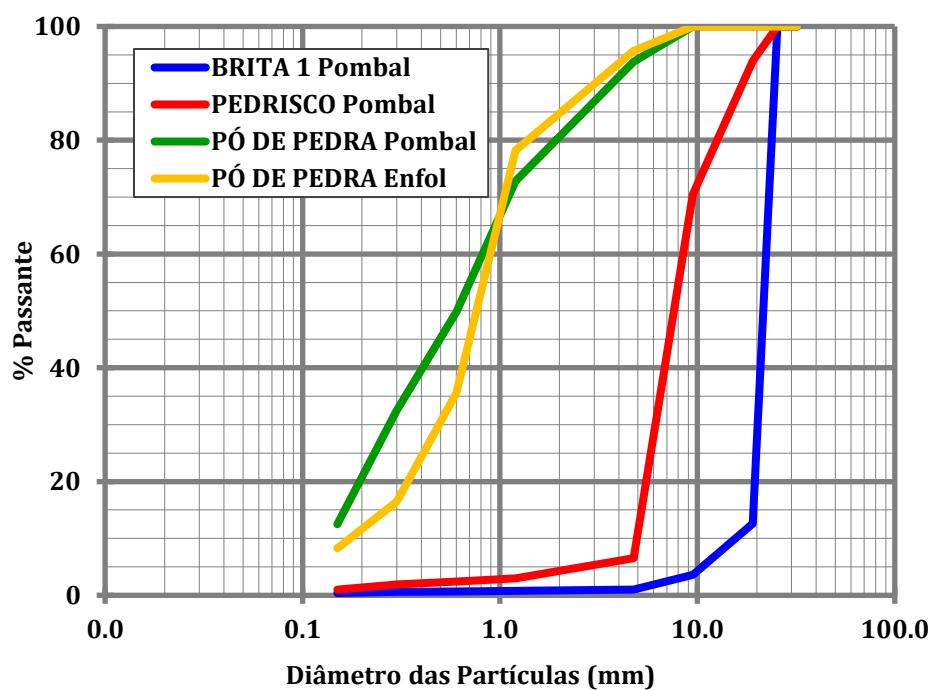


Figura 3.3: Granulometria das frações dos agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

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" Pombal	Pedrisco 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 Pombal	Agregado Fino 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" Pombal	Pedrisco Pombal	Pó de Pedra Pombal	Pó de Pedra Enfol
<b>Densidade Real</b>	2,807	2,809	2,838	2,700
<b>Densidade Aparente</b>	2,765	2,750	2,823	2,679
<b>Absorção (%)</b>	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 Ensaios
			CAP 50/70		
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) (Pen)	0,1mm	53	50 - 70		ABNT NBR 6576
Ponto de Amolecimento (Pa)	°C	52	mínimo 46		ABNT NBR 6560
Índice de Susceptibilidade Térmica (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 Ensaios
			CAP 30/45		
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) (Pen)	0,1mm	32	30 - 45		ABNT NBR 6576
Ponto de Amolecimento (Pa)	°C	52	mínimo 52		ABNT NBR 6560
Índice de Susceptibilidade Térmica (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 Ensaios
			AMP 60/85	
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 Ensaios
			AMP 60/85	
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	<b>Especificação (*)</b>	<b>Métodos de Ensaios</b>
			AMP 60/85	
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	<b>Especificação (*)</b>	<b>Métodos de Ensaios</b>
			AMP 60/85	
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	<b>Especificação (*)</b>	<b>Métodos de</b>
			<b>Borracha AB(8)</b>	<b>Ensaios</b>
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	<b>Especificação (*)</b>	<b>Métodos de</b>
			<b>Borracha AB(8)</b>	<b>Ensaios</b>
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	<b>Especificação (*)</b>	<b>Métodos de</b>
			<b>Borracha AB(8)</b>	<b>Ensaios</b>
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	<b>Especificação (*)</b>	<b>Métodos de</b>
			<b>EME 15-25</b>	<b>Ensaios</b>
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	<b>Especificação (*)</b>	<b>Métodos de</b>
			EME 15-25	Ensaios
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	<b>Especificação (*)</b>	<b>Métodos de</b>
			EME 15-25	Ensaios
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

<b>Mistura Asfáltica</b>	<b>Agregados</b>	<b>Local de coleta dos Agregados</b>	<b>Faixa Granulométrica</b>	<b>Ligante Asfáltico</b>
<b>1</b>	Granito	E. de São Paulo	III-DERSA	CAP 30/45
<b>2</b>	Granito	E. de São Paulo	III-DERSA	CAP 50/70
<b>3</b>	Granito	E. de São Paulo	III-DERSA	AMP1
<b>4</b>	Granito	E. de São Paulo	III-DERSA	AMP2
<b>5</b>	Granito	E. de São Paulo	III-DERSA	AMP3
<b>6</b>	Granito	E. de São Paulo	III-DERSA	AMP4
<b>7</b>	Granito	E. de São Paulo	III-DERSA	AB1
<b>8</b>	Granito	E. de São Paulo	III-DERSA	AB2
<b>9</b>	Granito	E. de São Paulo	III-DERSA	AB3
<b>10</b>	Granito	E. de São Paulo	III-DERSA	AM1
<b>11</b>	Granito	E. de São Paulo	III-DERSA	AM2
<b>12</b>	Granito	E. de São Paulo	III-DERSA	AM3
<b>13</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	CAP 30/45
<b>14</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	CAP 50/70
<b>15</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	AMP1
<b>16</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	AMP2
<b>17</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	AMP3
<b>18</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	AMP4
<b>19</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	AB1
<b>20</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	AB2
<b>21</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	AB3
<b>22</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	AM1
<b>23</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	AM2
<b>24</b>	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>
<b>25</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	CAP 30/45
<b>26</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	CAP 50/70
<b>27</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AMP1
<b>28</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AMP2
<b>29</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AMP3
<b>30</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AMP4
<b>31</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AB1
<b>32</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AB2
<b>33</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AB3
<b>34</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AM1
<b>35</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AM2
<b>36</b>	Granito	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AM3
<b>37</b>	Granito	E. de São Paulo	GAP	CAP 30/45
<b>38</b>	Granito	E. de São Paulo	GAP	CAP 50/70
<b>39</b>	Granito	E. de São Paulo	GAP	AMP1
<b>40</b>	Granito	E. de São Paulo	GAP	AMP2
<b>41</b>	Granito	E. de São Paulo	GAP	AMP3
<b>42</b>	Granito	E. de São Paulo	GAP	AMP4
<b>43</b>	Granito	E. de São Paulo	GAP	AB1
<b>44</b>	Granito	E. de São Paulo	GAP	AB2
<b>45</b>	Granito	E. de São Paulo	GAP	AB3
<b>46</b>	Granito	E. de São Paulo	GAP	AM1
<b>47</b>	Granito	E. de São Paulo	GAP	AM2
<b>48</b>	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
<b>49</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	III-DERSA	CAP 30/45
<b>50</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	III-DERSA	CAP 50/70
<b>51</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	III-DERSA	AMP1
<b>52</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	III-DERSA	AMP2
<b>53</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	III-DERSA	AMP3
<b>54</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	III-DERSA	AMP4
<b>55</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	III-DERSA	AB1
<b>56</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	III-DERSA	AB2
<b>57</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	III-DERSA	AB3
<b>58</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	III-DERSA	AM1
<b>59</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	III-DERSA	AM2
<b>60</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	III-DERSA	AM3
<b>61</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 19,0mm	CAP 30/45
<b>62</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 19,0mm	CAP 50/70
<b>63</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 19,0mm	AMP1
<b>64</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 19,0mm	AMP2
<b>65</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 19,0mm	AMP3
<b>66</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 19,0mm	AMP4
<b>67</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 19,0mm	AB1
<b>68</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 19,0mm	AB2
<b>69</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 19,0mm	AB3
<b>70</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 19,0mm	AM1
<b>71</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 19,0mm	AM2
<b>72</b>	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>
<b>73</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 9,5mm	CAP 30/45
<b>74</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 9,5mm	CAP 50/70
<b>75</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 9,5mm	AMP1
<b>76</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 9,5mm	AMP2
<b>77</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 9,5mm	AMP3
<b>78</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 9,5mm	AMP4
<b>79</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 9,5mm	AB1
<b>80</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 9,5mm	AB2
<b>81</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 9,5mm	AB3
<b>82</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 9,5mm	AM1
<b>83</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 9,5mm	AM2
<b>84</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	EGL 9,5mm	AM3
<b>85</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	GAP	CAP 30/45
<b>86</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	GAP	CAP 50/70
<b>87</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	GAP	AMP1
<b>88</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	GAP	AMP2
<b>89</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	GAP	AMP3
<b>90</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	GAP	AMP4
<b>91</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	GAP	AB1
<b>92</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	GAP	AB2
<b>93</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	GAP	AB3
<b>94</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	GAP	AM1
<b>95</b>	Granito	E. do Rio de Janeiro	GAP	AM2
<b>96</b>	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
<b>97</b>	Basalto	E. de São Paulo	III-DERSA	CAP 30/45
<b>98</b>	Basalto	E. de São Paulo	III-DERSA	CAP 50/70
<b>99</b>	Basalto	E. de São Paulo	III-DERSA	AMP1
<b>100</b>	Basalto	E. de São Paulo	III-DERSA	AMP2
<b>101</b>	Basalto	E. de São Paulo	III-DERSA	AMP3
<b>102</b>	Basalto	E. de São Paulo	III-DERSA	AMP4
<b>103</b>	Basalto	E. de São Paulo	III-DERSA	AB1
<b>104</b>	Basalto	E. de São Paulo	III-DERSA	AB2
<b>105</b>	Basalto	E. de São Paulo	III-DERSA	AB3
<b>106</b>	Basalto	E. de São Paulo	III-DERSA	AM1
<b>107</b>	Basalto	E. de São Paulo	III-DERSA	AM2
<b>108</b>	Basalto	E. de São Paulo	III-DERSA	AM3
<b>109</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	CAP 30/45
<b>110</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	CAP 50/70
<b>111</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	AMP1
<b>112</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	AMP2
<b>113</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	AMP3
<b>114</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	AMP4
<b>115</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	AB1
<b>116</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	AB2
<b>117</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	AB3
<b>118</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	AM1
<b>119</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 19,0mm	AM2
<b>120</b>	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
<b>121</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	CAP 30/45
<b>122</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	CAP 50/70
<b>123</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AMP1
<b>124</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AMP2
<b>125</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AMP3
<b>126</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AMP4
<b>127</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AB1
<b>128</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AB2
<b>129</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AB3
<b>130</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AM1
<b>131</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AM2
<b>132</b>	Basalto	E. de São Paulo	EGL 9,5mm	AM3
<b>133</b>	Basalto	E. de São Paulo	GAP	CAP 30/45
<b>134</b>	Basalto	E. de São Paulo	GAP	CAP 50/70
<b>135</b>	Basalto	E. de São Paulo	GAP	AMP1
<b>136</b>	Basalto	E. de São Paulo	GAP	AMP2
<b>137</b>	Basalto	E. de São Paulo	GAP	AMP3
<b>138</b>	Basalto	E. de São Paulo	GAP	AMP4
<b>139</b>	Basalto	E. de São Paulo	GAP	AB1
<b>140</b>	Basalto	E. de São Paulo	GAP	AB2
<b>141</b>	Basalto	E. de São Paulo	GAP	AB3
<b>142</b>	Basalto	E. de São Paulo	GAP	AM1
<b>143</b>	Basalto	E. de São Paulo	GAP	AM2
<b>144</b>	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 misturas na Faixa EGL 9,5mm

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

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

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

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

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

Tabela 4.10: Composição granulométrica das misturas na Faixa *Gap Graded*

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

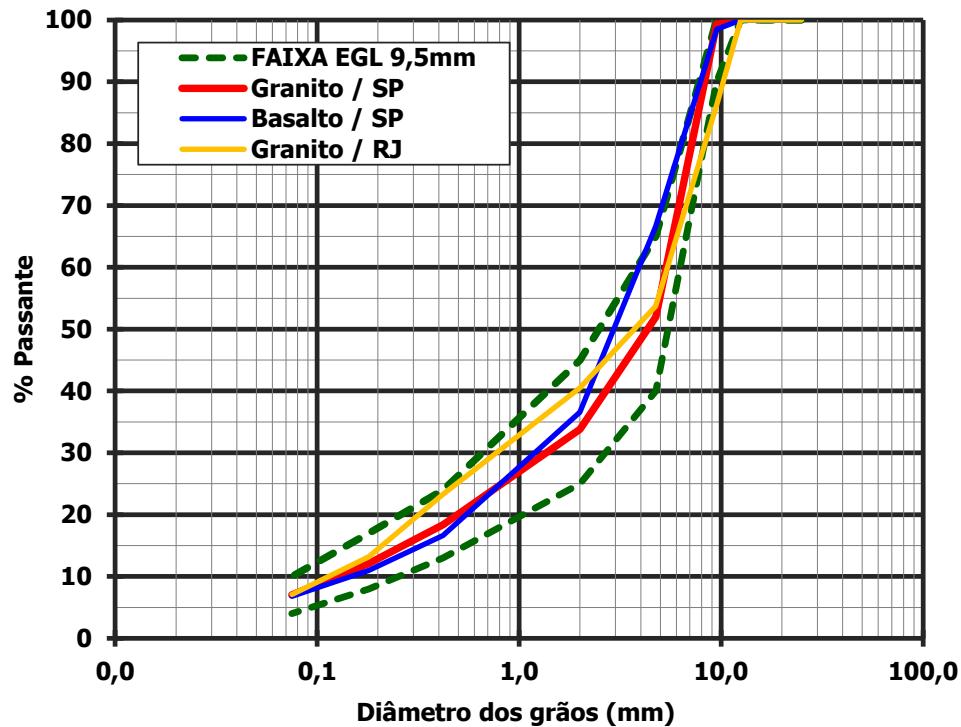


Figura 4.1: Faixa Granulométrica da mistura asfáltica EGL 9,5mm e misturas obtidas

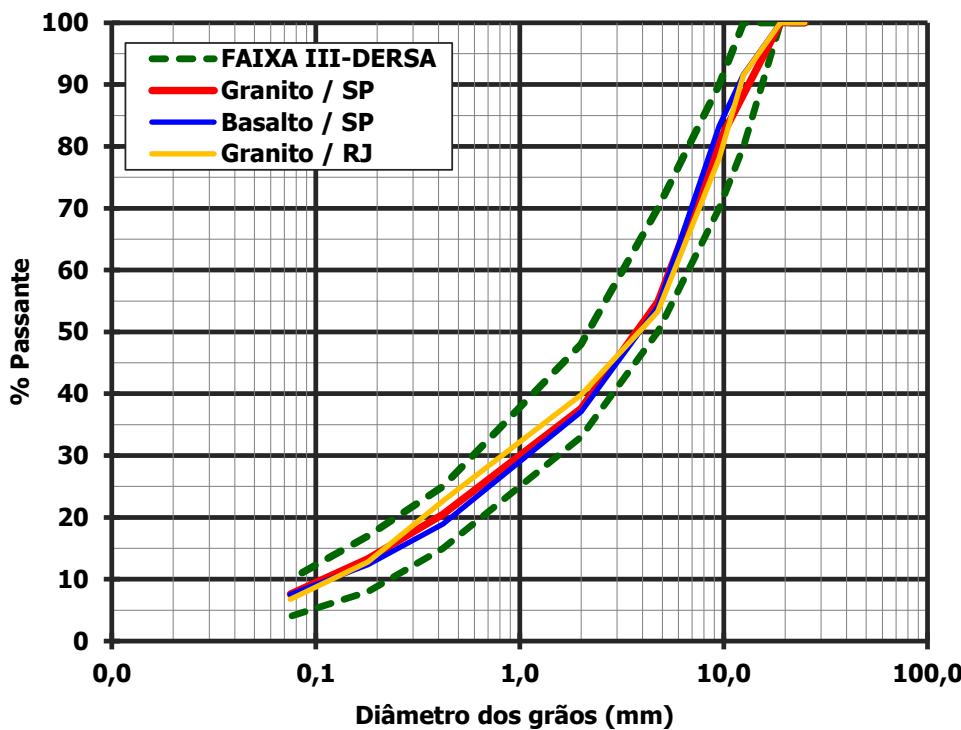


Figura 4.2: Faixa Granulométrica da mistura asfáltica Faixa III-DERSA e misturas obtidas

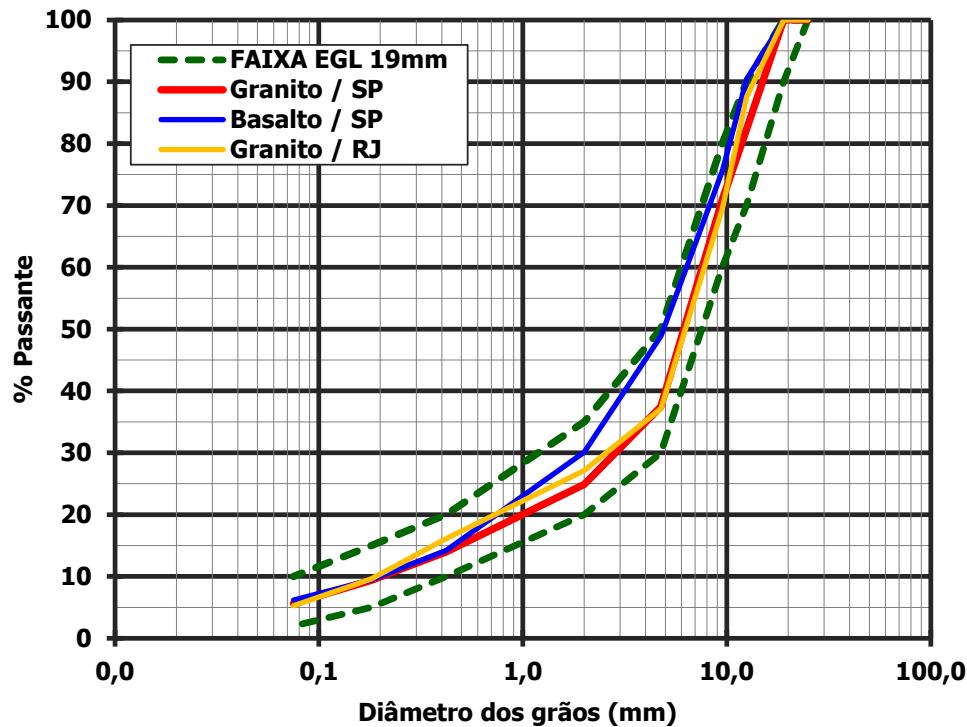


Figura 4.3: Faixa Granulométrica da mistura asfáltica EGL 19mm e misturas obtidas

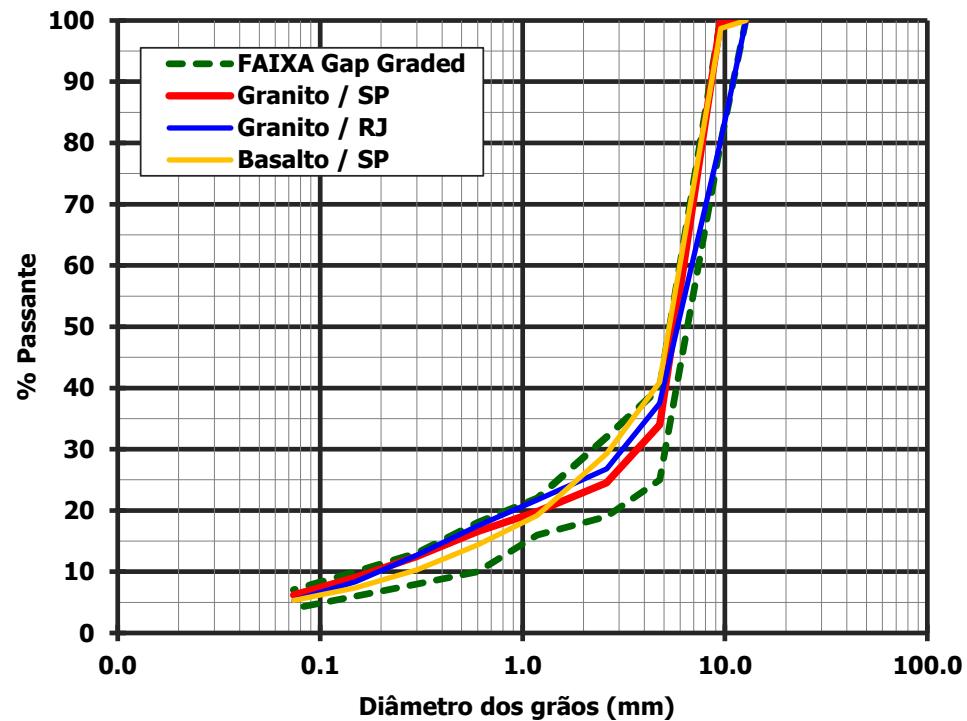


Figura 4.4: Faixa Granulométrica da mistura asfáltica *Gap Graded* e misturas obtidas

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.

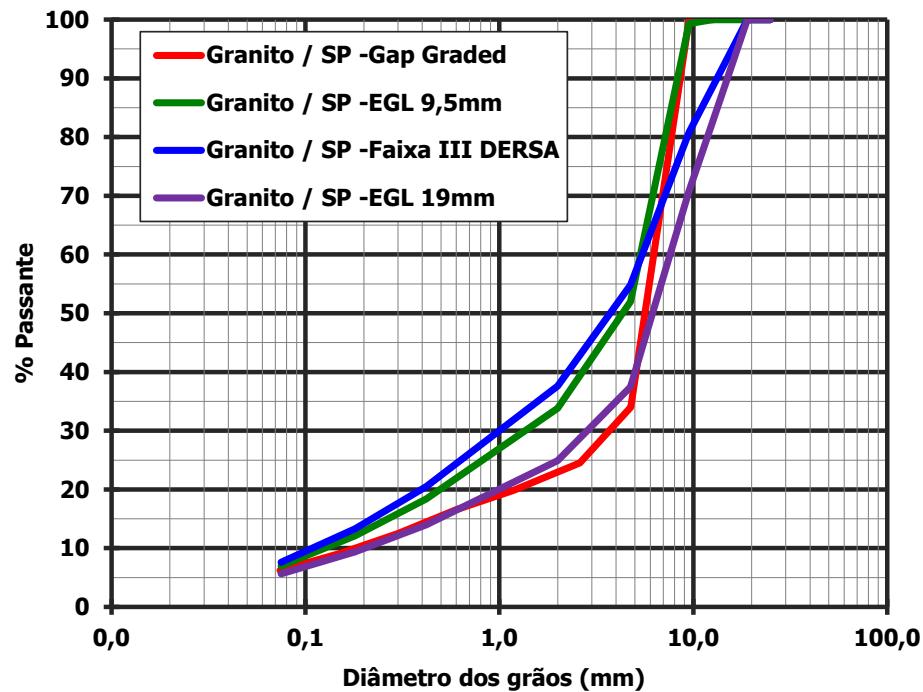


Figura 4.5: Curvas granulométricas das misturas asfálticas estudadas com agregados graníticos do Estado de São Paulo

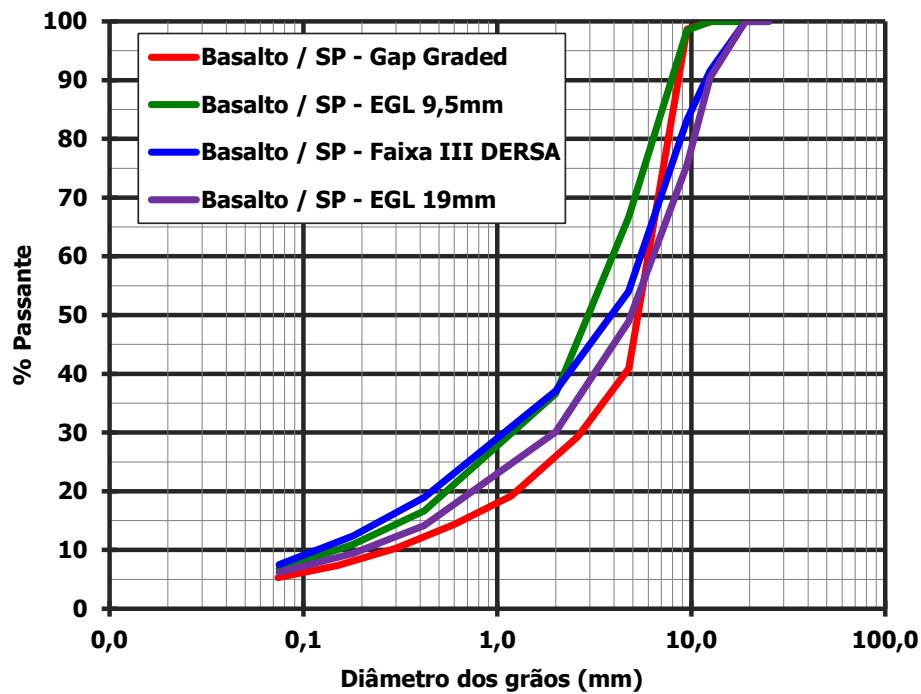


Figura 4.6: Curvas granulométricas das misturas asfálticas estudadas com agregados basálticos do Estado de São Paulo

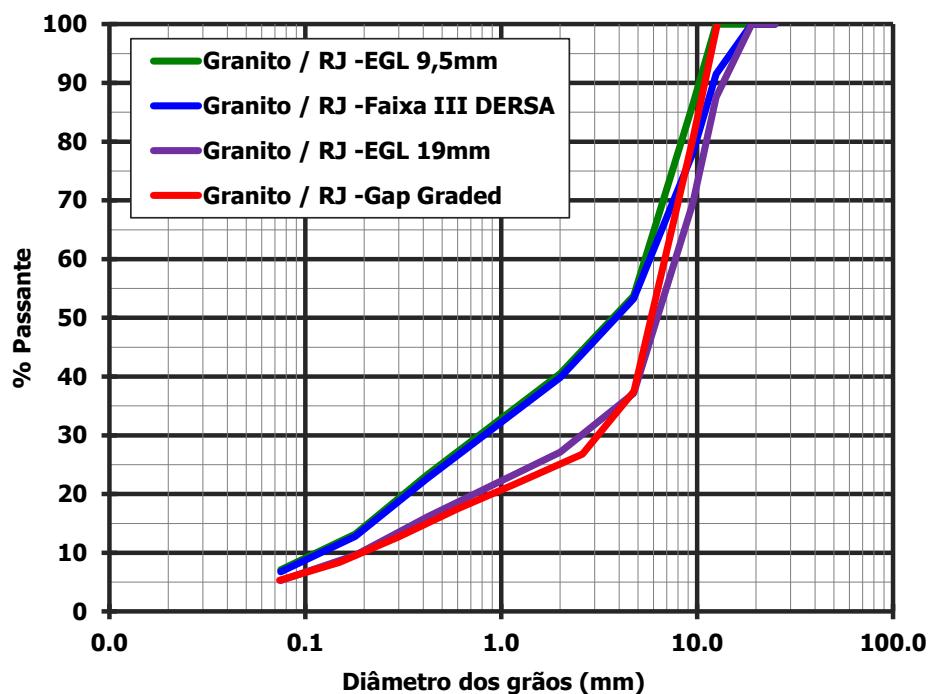


Figura 4.7: Curvas granulométricas das misturas asfálticas estudadas com agregados graníticos do Estado de Rio de Janeiro

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
<b>Ligante Asfáltico</b>	<b>30/45</b>	<b>50/70</b>	<b>AMP1</b>	<b>AMP2</b>	<b>AMP3</b>	<b>AMP4</b>	<b>AB1</b>	<b>AB2</b>	<b>AB3</b>	<b>AM1</b>	<b>AM2</b>	<b>AM3</b>
<b>Teor de Ligante Asfáltico em peso (%)</b>	4.6	4.6	4.8	4.9	4.9	5.0	5.3	5.5	5.6	5.0	4.7	5.2
<b>Absorção de asfalto pelo agregado (%)</b>	0.4	0.4	0.6	0.5	0.4	0.3	0.5	0.3	0.4	0.3	0.5	0.4
<b>Massa específica aparente dos agregados combinados (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.611	2.611	2.611	2.611	2.618	2.611	2.611	2.618	2.611	2.611	2.611	2.611
<b>Massa específica efetiva dos agregados combinados (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.639	2.639	2.639	2.643	2.642	2.641	2.639	2.641	2.647	2.639	2.642	2.637
<b>Massa específica aparente da mistura compactada (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.361	2.361	2.366	2.348	2.350	2.348	2.344	2.335	2.332	2.345	2.356	2.360
<b>Massa específica máxima da mistura (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.457	2.457	2.458	2.448	2.449	2.445	2.440	2.431	2.432	2.442	2.458	2.455
<b>Volume de vazios de projeto (%)</b>	3.9	3.9	3.7	4.1	4.0	4.0	4.0	4.0	4.1	4.0	4.1	3.9
<b>Vazios de agregado mineral (%)</b>	13.7	13.7	13.7	14.5	14.7	14.8	15.0	15.7	15.9	14.9	14.0	14.3
<b>Vazios cheios de asfalto (%)</b>	71.6	71.7	72.8	71.6	72.5	73.1	73.6	74.8	74.1	73.5	70.5	72.9
<b>Resistência à tração (MPa)</b>	2.3	1.7	2.2	2.1	1.8	2.4	1.8	1.8	1.5	2.4	2.6	2.8
<b>Relação Fíler/Asfalto</b>	1.7	1.7	1.6	1.6	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4	1.5	1.6	1.5
<b>Teor de Ligante Asfáltico em volume (%)</b>	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	<b>49</b>	<b>50</b>	<b>51</b>	<b>52</b>	<b>53</b>	<b>54</b>	<b>55</b>	<b>56</b>	<b>57</b>	<b>58</b>	<b>59</b>	<b>60</b>
<b>Ligante Asfáltico</b>	<b>30/45</b>	<b>50/70</b>	<b>AMP1</b>	<b>AMP2</b>	<b>AMP3</b>	<b>AMP4</b>	<b>AB1</b>	<b>AB2</b>	<b>AB3</b>	<b>AM1</b>	<b>AM2</b>	<b>AM3</b>
<b>Teor de Ligante Asfáltico em peso (%)</b>	4.9	4.7	4.7	4.7	4.7	4.6	5.0	5.2	5.2	4.8	4.7	5.3
<b>Absorção de asfalto pelo agregado (%)</b>	0.5	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3
<b>Massa específica aparente dos agregados combinados (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.747	2.747	2.747	2.747	2.747	2.747	2.747	2.747	2.747	2.747	2.747	2.747
<b>Massa específica efetiva dos agregados combinados (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.783	2.780	2.767	2.765	2.766	2.767	2.766	2.765	2.766	2.765	2.765	2.766
<b>Massa específica aparente da mistura compactada (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.450	2.465	2.453	2.453	2.449	2.453	2.439	2.437	2.434	2.451	2.457	2.451
<b>Massa específica máxima da mistura (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.563	2.569	2.558	2.555	2.557	2.564	2.549	2.541	2.542	2.553	2.559	2.557
<b>Volume de vazios de projeto (%)</b>	4.4	4.1	4.1	4.0	4.2	4.3	4.3	4.1	4.3	4.0	4.0	4.1
<b>Vazios de agregado mineral (%)</b>	15.2	14.5	14.9	14.9	15.0	14.8	15.7	15.9	16.0	15.0	14.8	15.5
<b>Vazios cheios de asfalto (%)</b>	70.9	71.9	72.3	73.2	72.1	70.8	72.3	74.4	73.4	73.5	73.0	73.3
<b>Resistência à tração (MPa)</b>	2.3	1.8	1.8	1.8	1.8	2.3	1.4	1.9	1.7	2.3	2.6	2.7
<b>Relação Fíler/Asfalto</b>	1.5	1.6	1.5	1.5	1.5	1.6	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.4
<b>Teor de Ligante Asfáltico em volume (%)</b>	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 Fíler/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 Fíler/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 Fíler/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 Fíler/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 Fíler/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 Fíler/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 Fíler/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%.

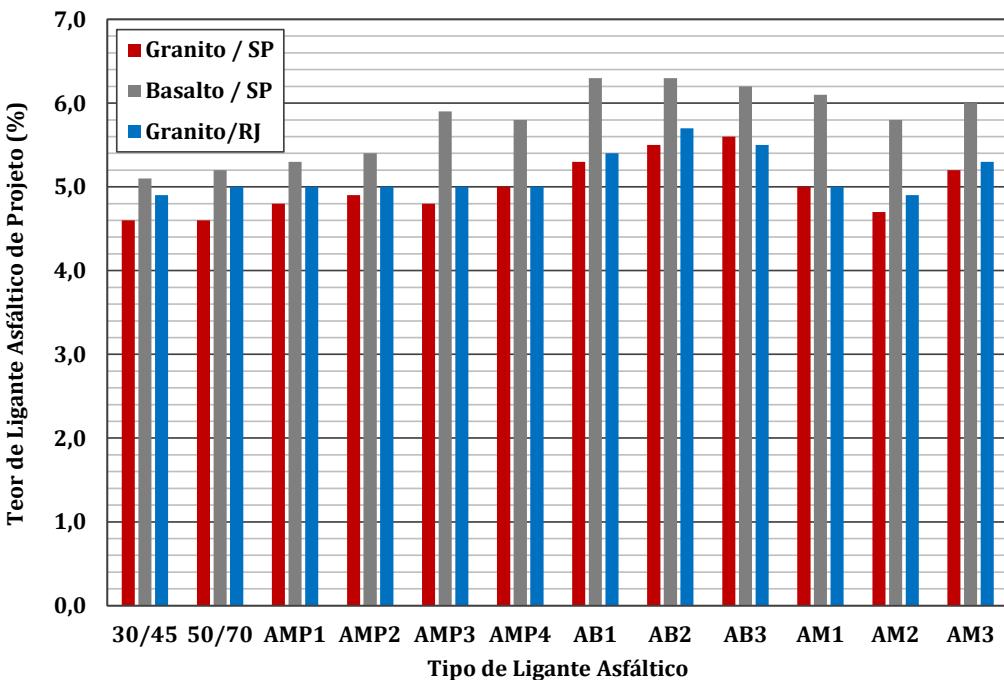


Figura 4.8: Teor de ligante asfáltico de projeto das misturas asfálticas Faixa III-DERSA

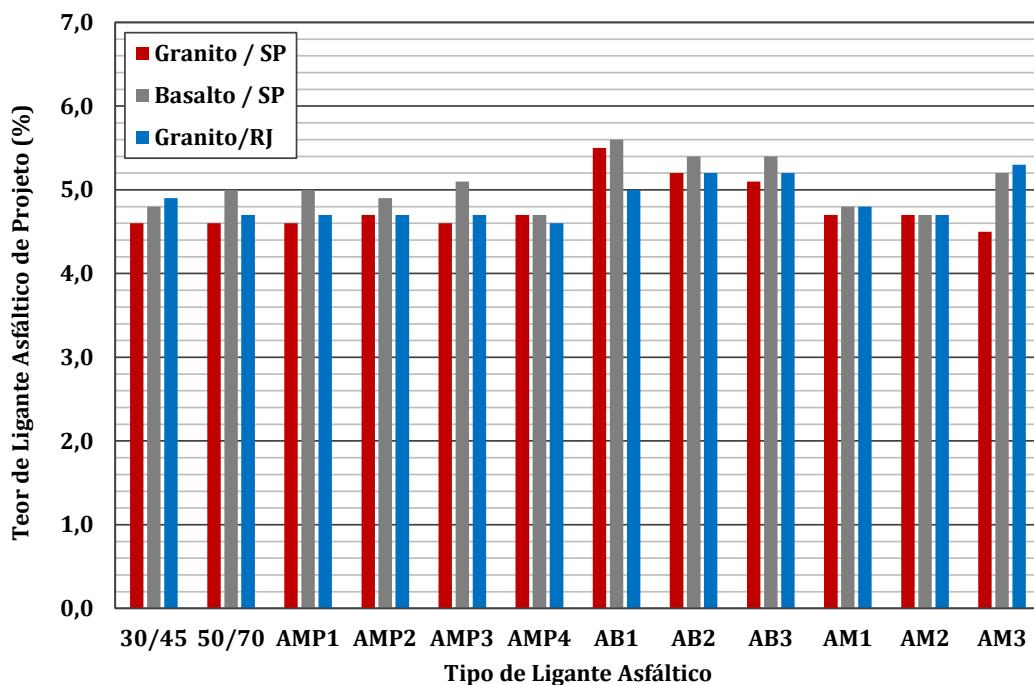


Figura 4.9: Teor de ligante asfáltico de projeto das misturas asfálticas EGL19,0mm

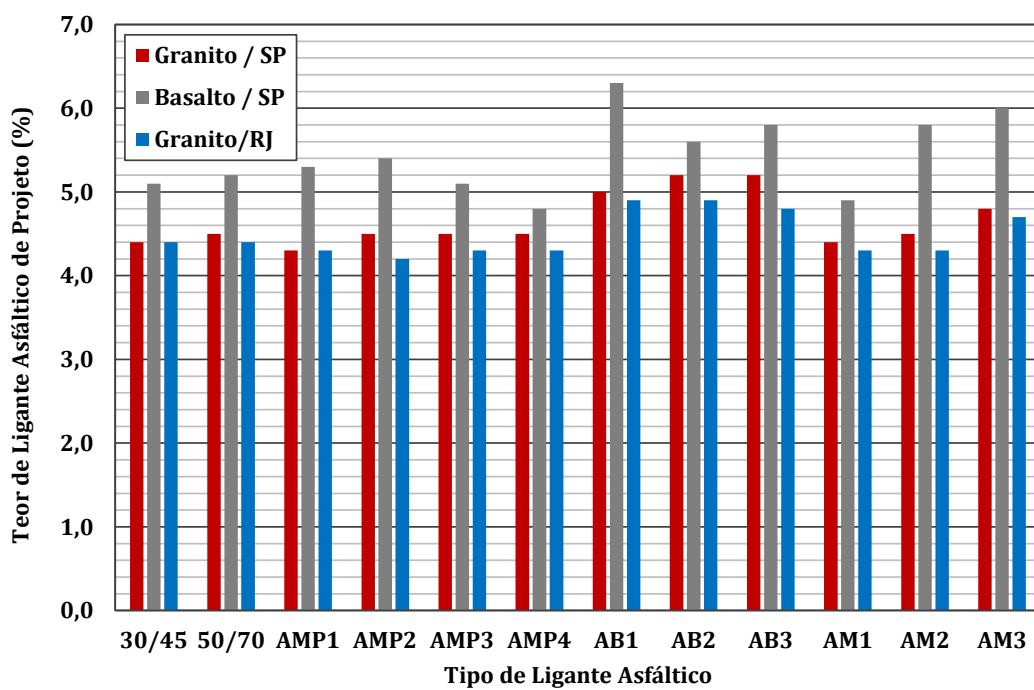


Figura 4.10: Teor de ligante asfáltico de projeto das misturas asfálticas EGL9,5mm

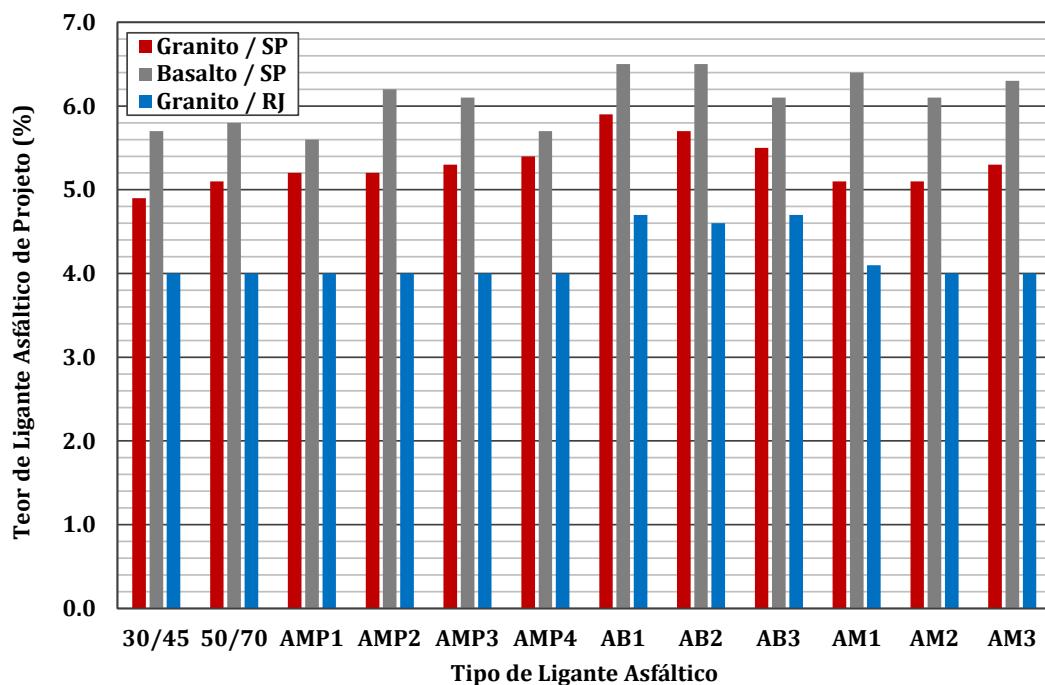


Figura 4.11: Teor de ligante asfáltico de projeto das misturas asfálticas *Gap Graded*

## 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.

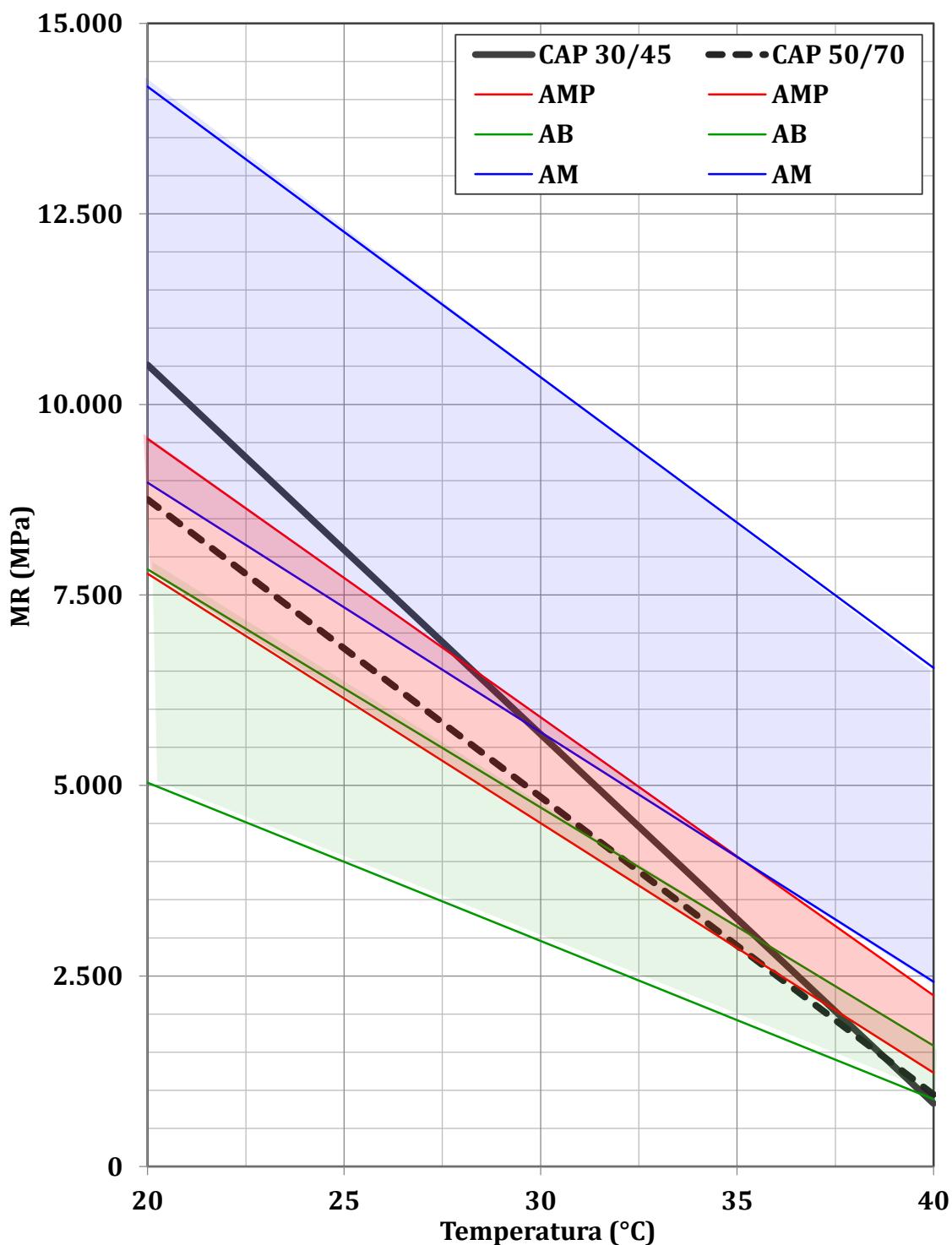


Figura 5.1. Resultados de MR nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo, em função da temperatura de ensaio

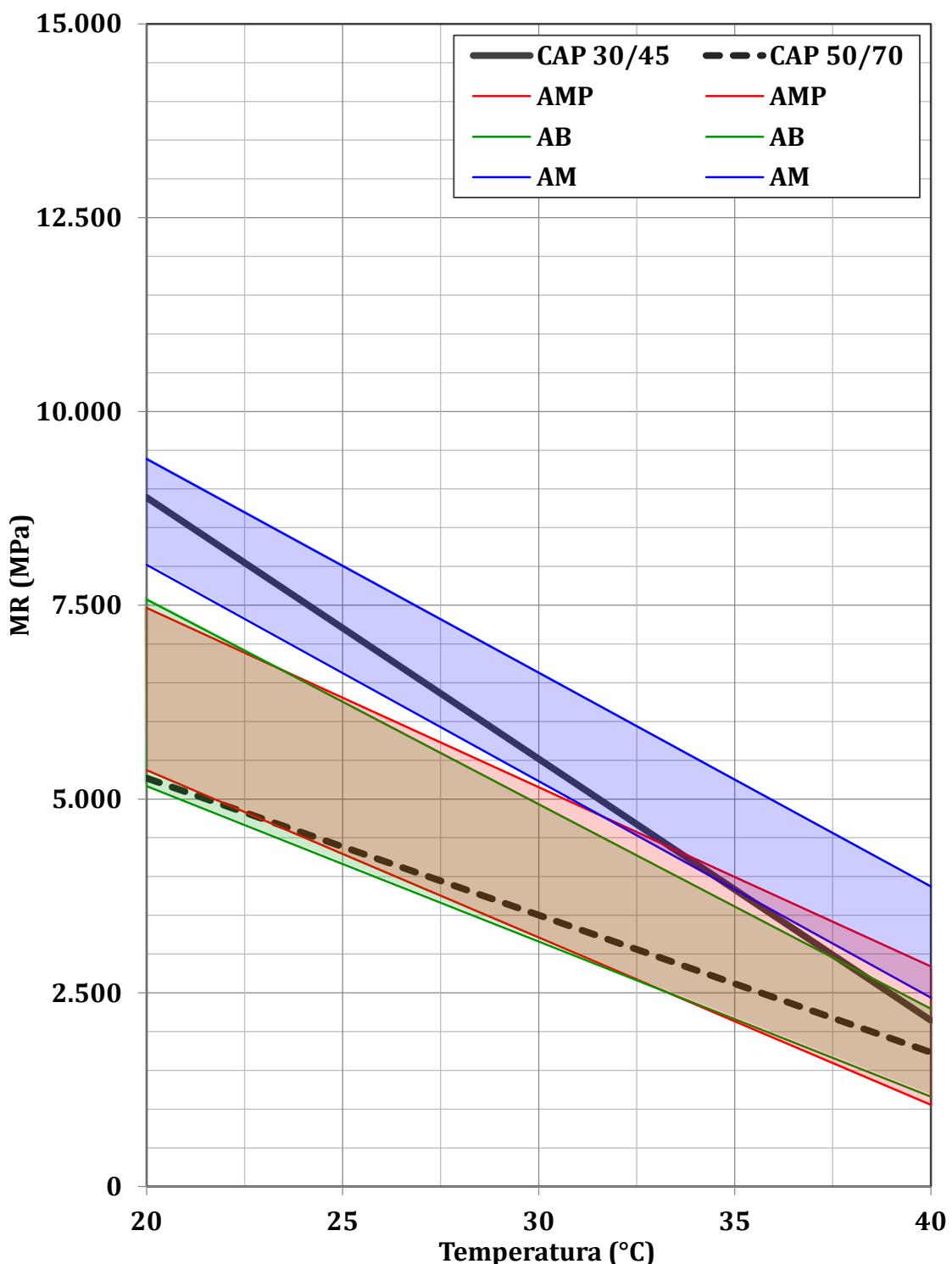


Figura 5.2. Resultados de MR nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro, em função da temperatura de ensaio

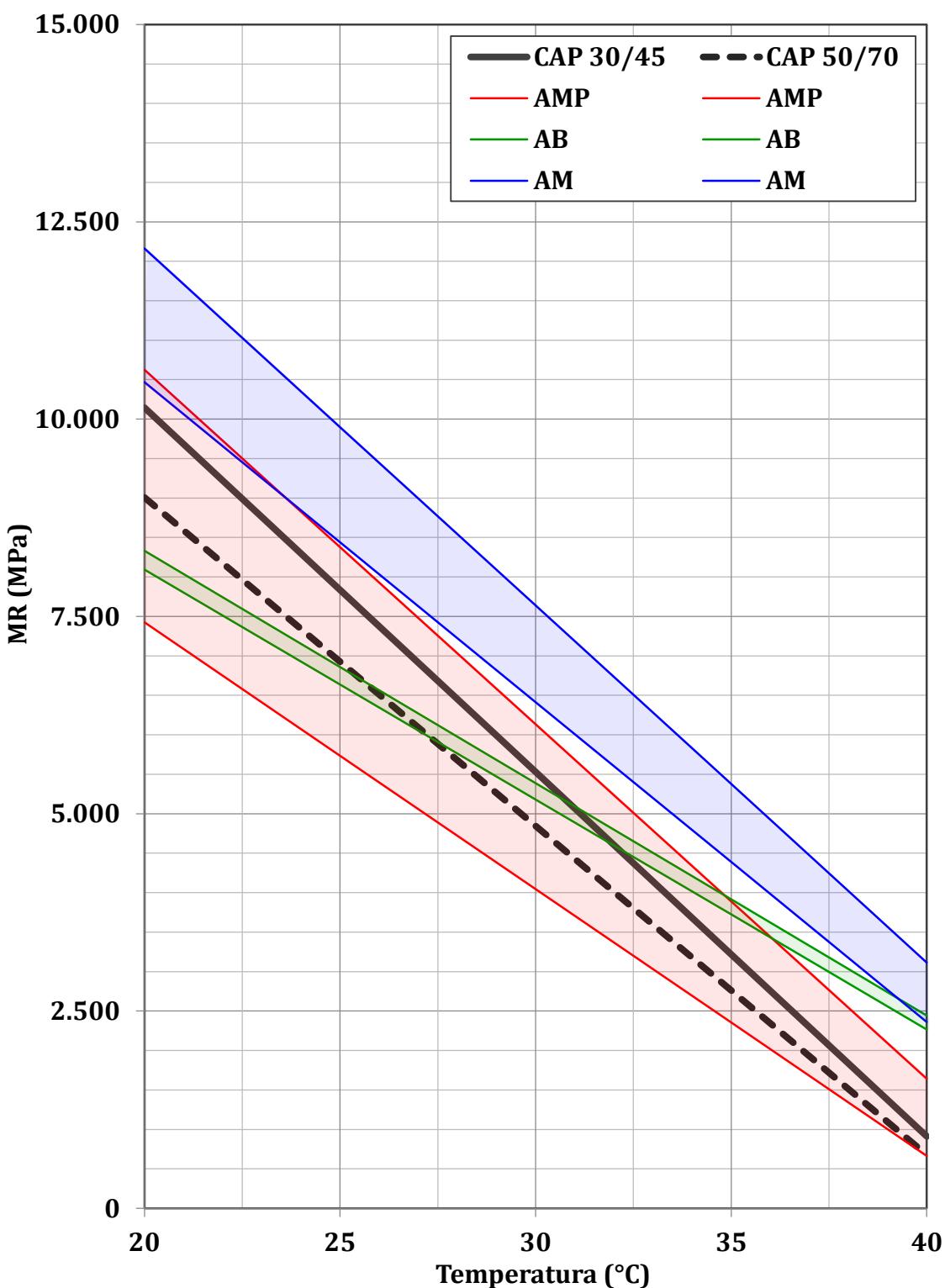


Figura 5.3. Resultados de MR nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos do Estado de São Paulo, em função da temperatura de ensaio

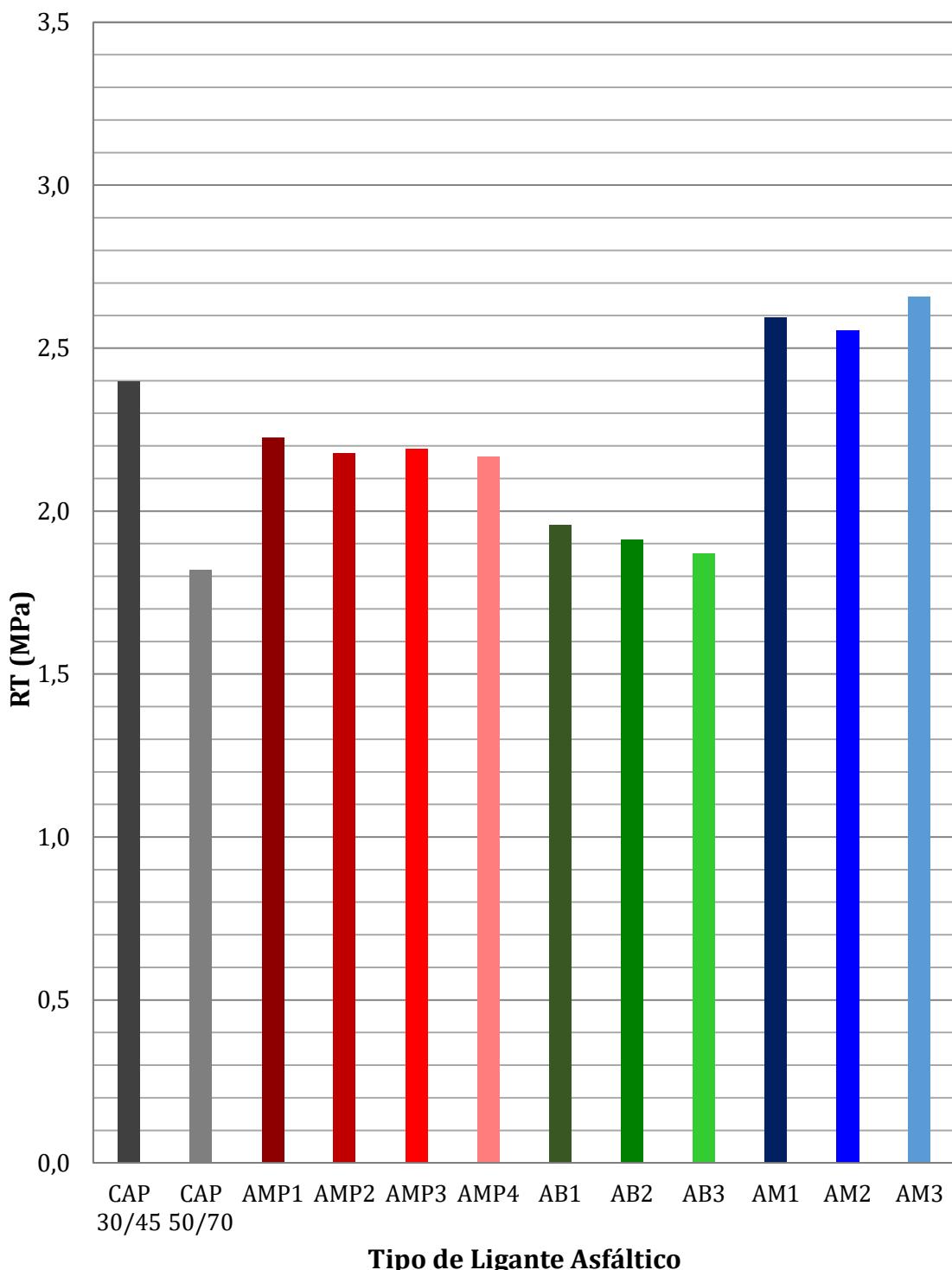


Figura 5.4. Resultados de RT nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo

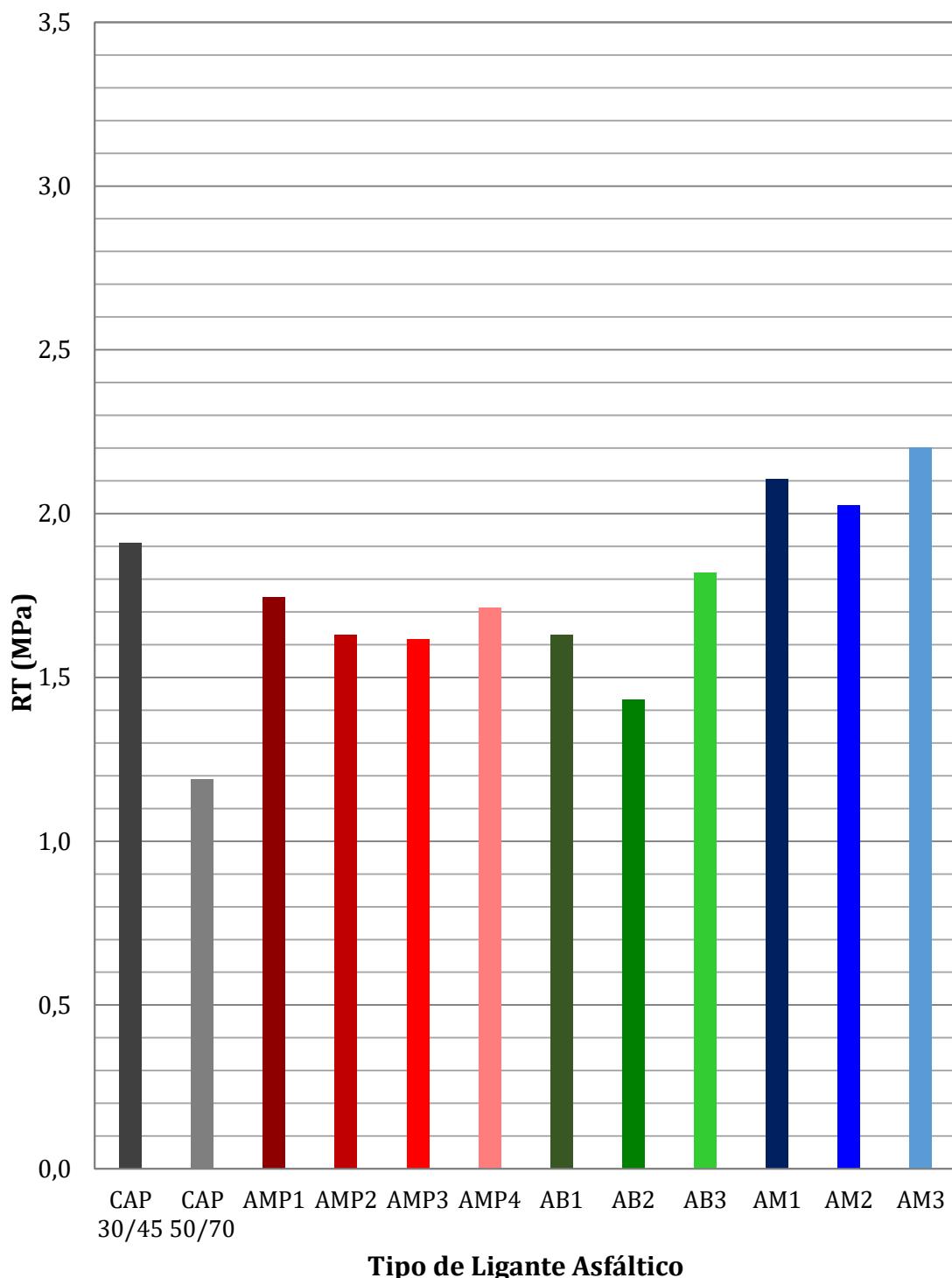


Figura 5.5. Resultados de RT nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de Rio Janeiro

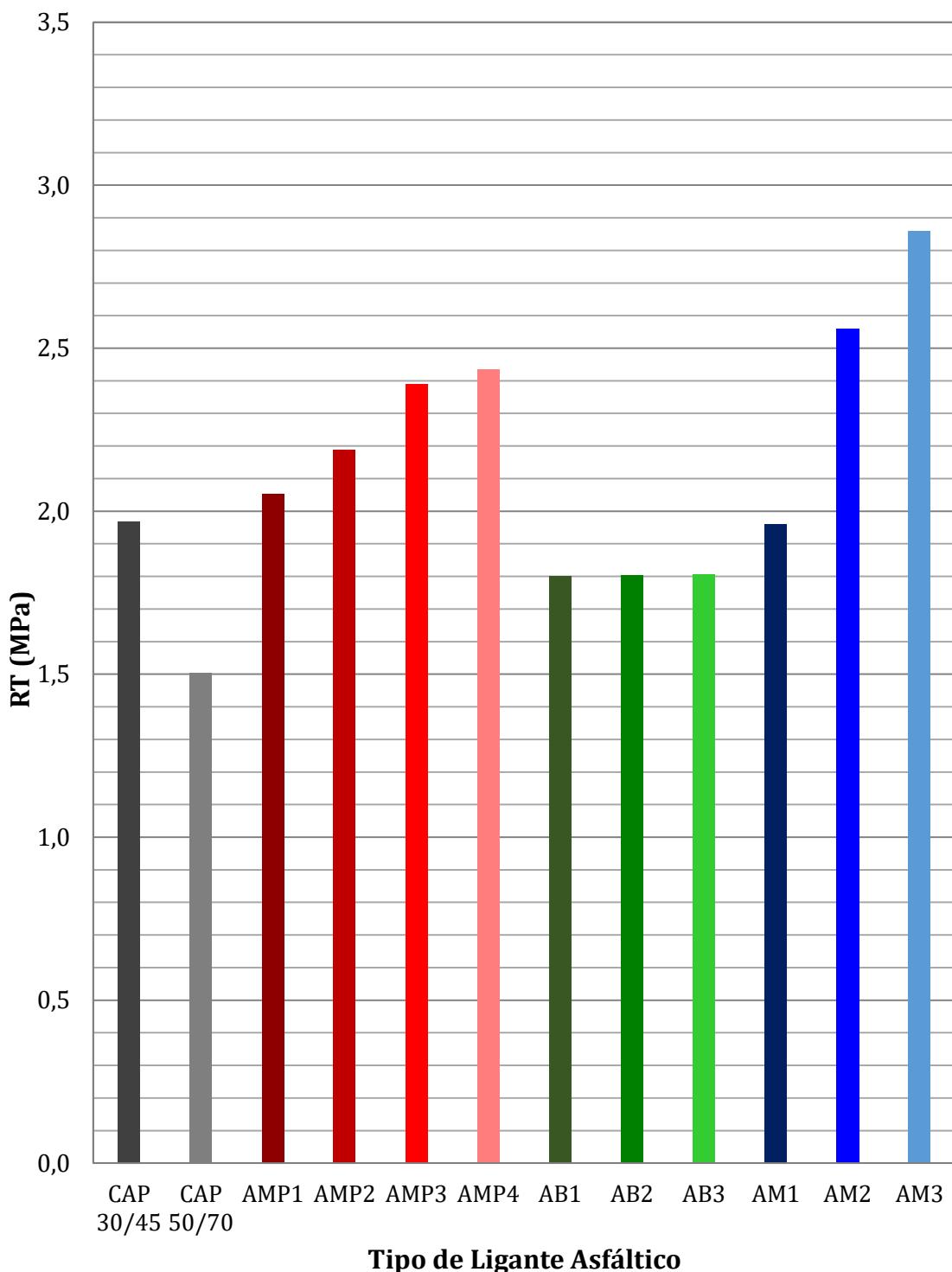


Figura 5.6. Resultados de RT nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos do Estado de São Paulo

### 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.

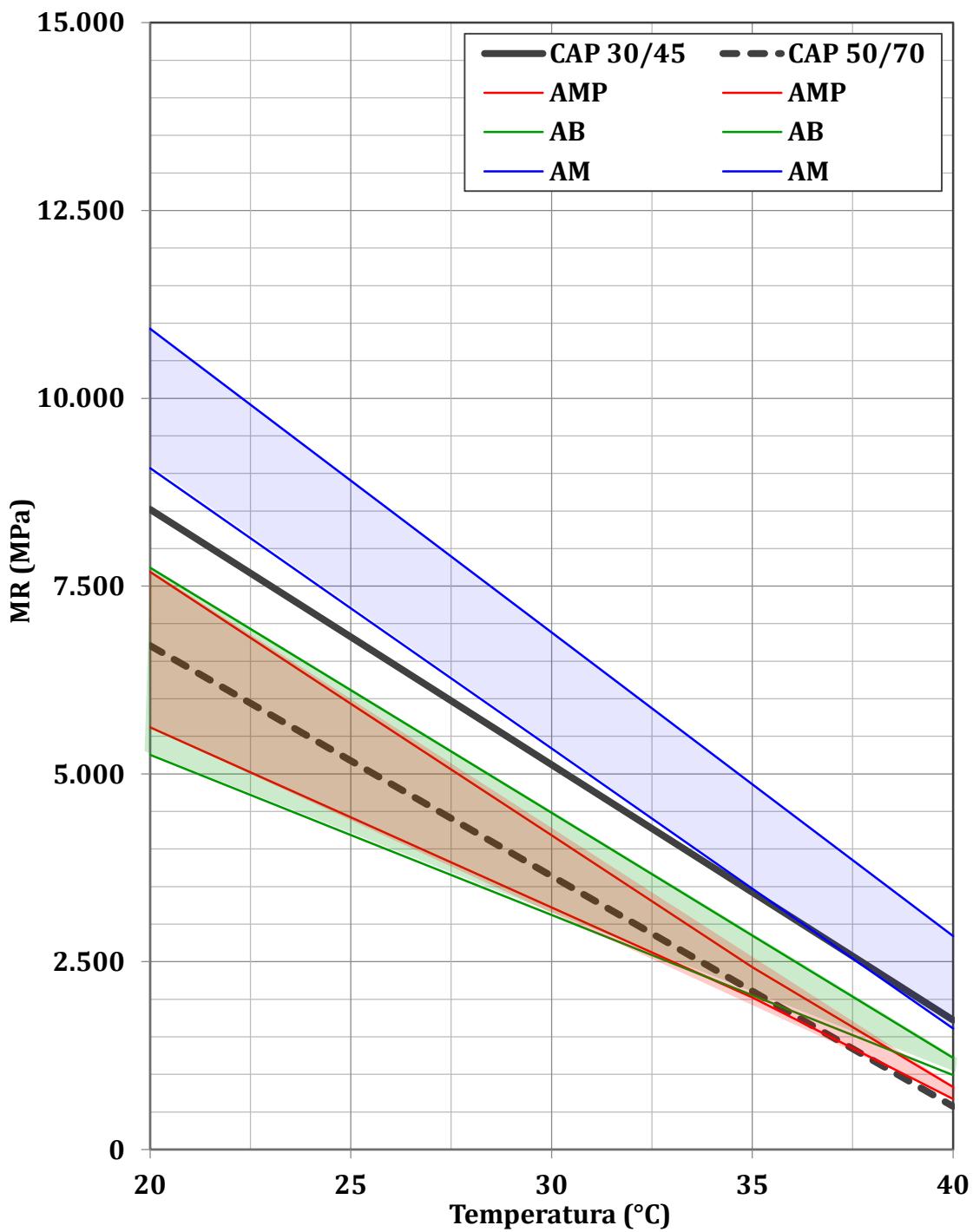


Figura 5.7. Resultados de MR nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo, em função da temperatura de ensaio

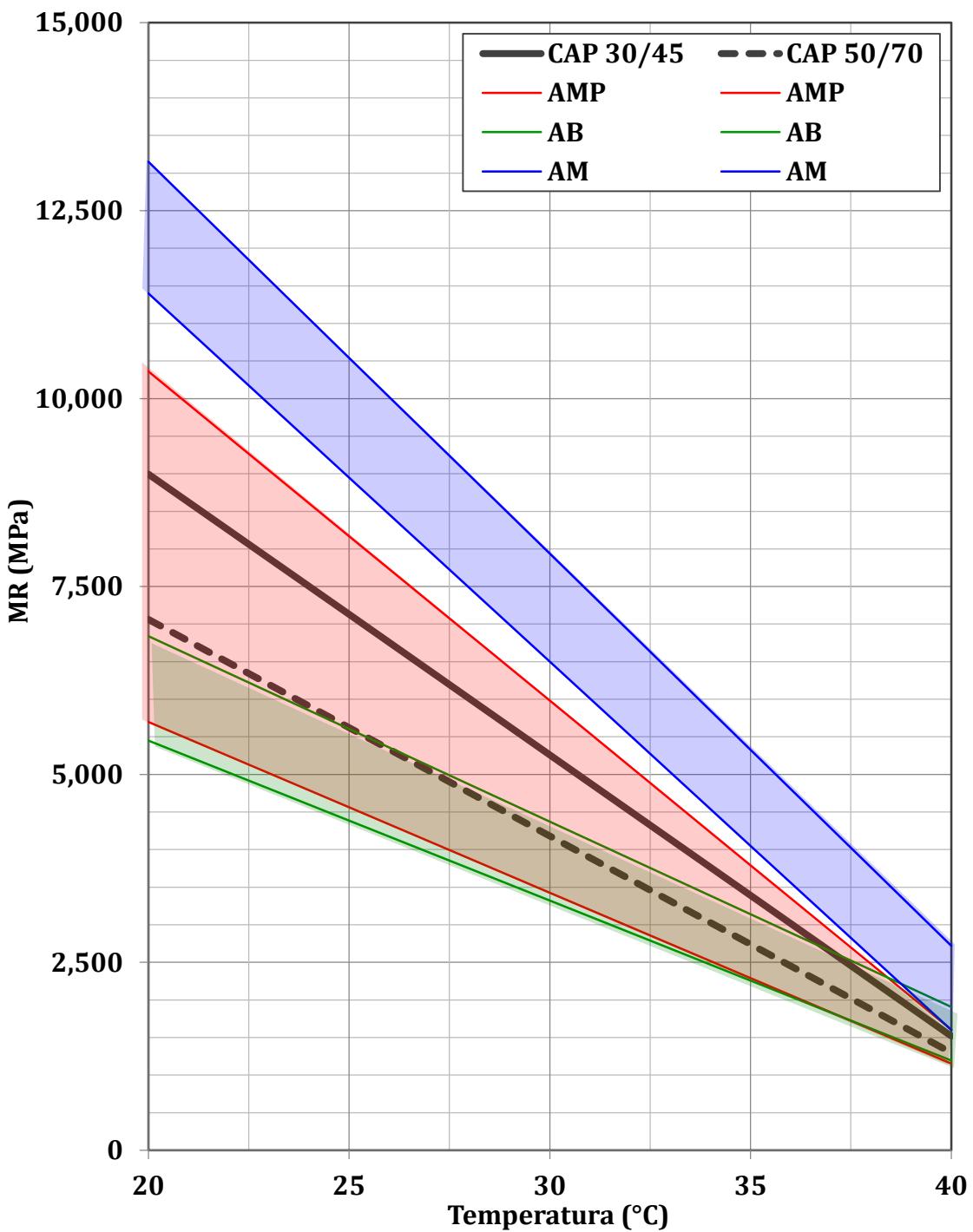


Figura 5.8. Resultados de MR nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro, em função da temperatura de ensaio

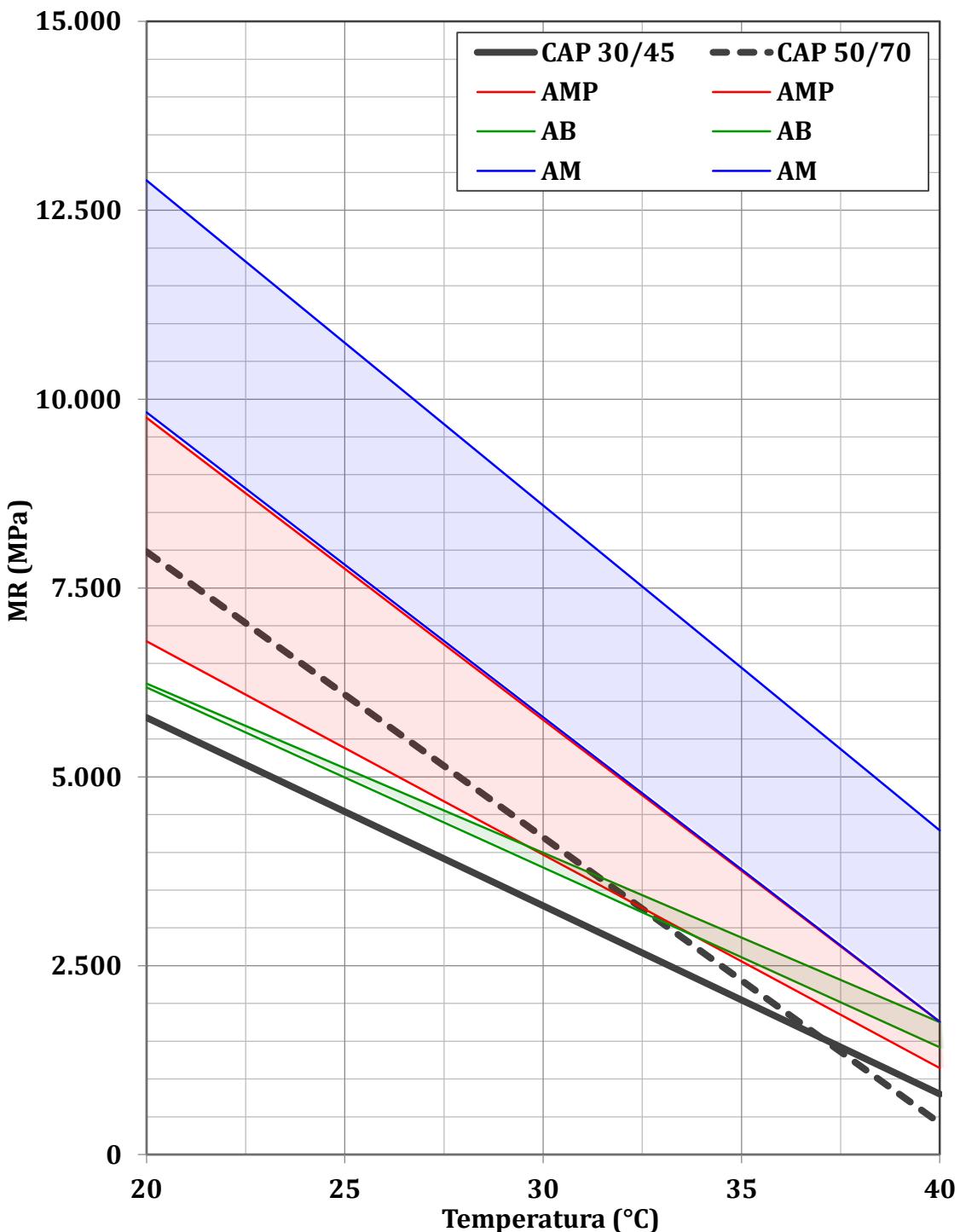


Figura 5.9. Resultados de MR nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo, em função da temperatura de ensaio

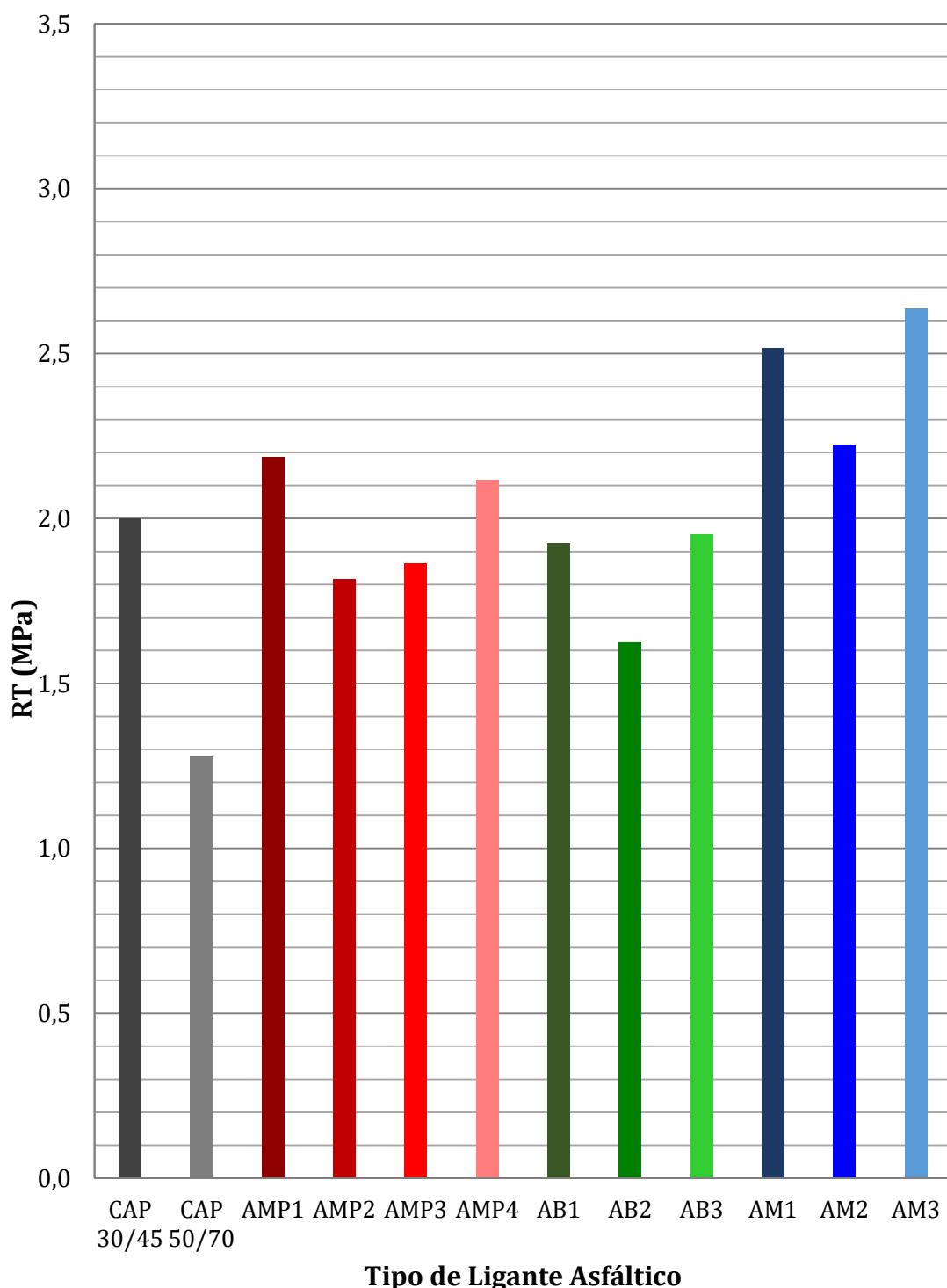


Figura 5.10. Resultados de RT nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo

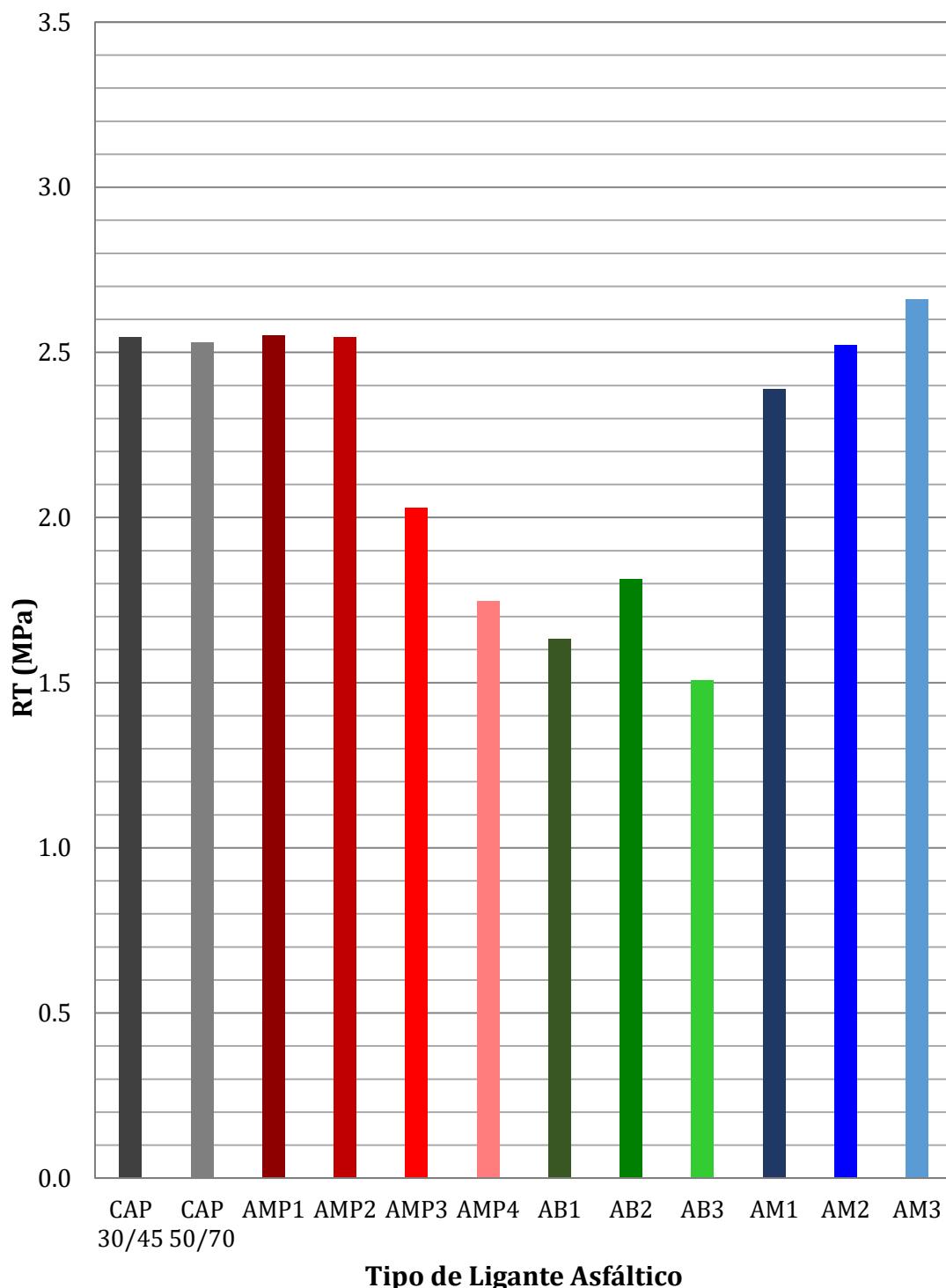


Figura 5.11. Resultados de RT nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

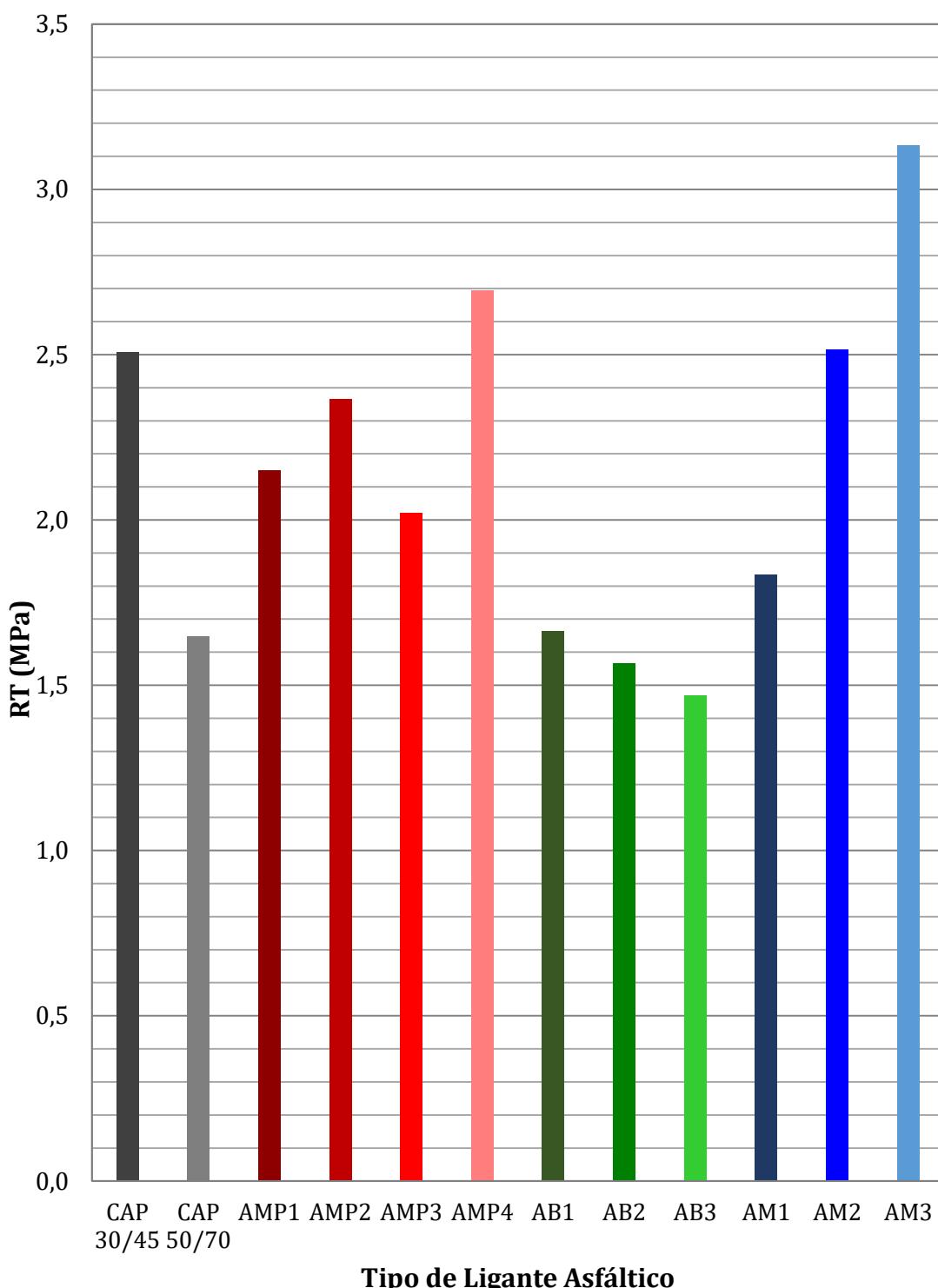


Figura 5.12. Resultados de RT nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo

### 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 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
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.

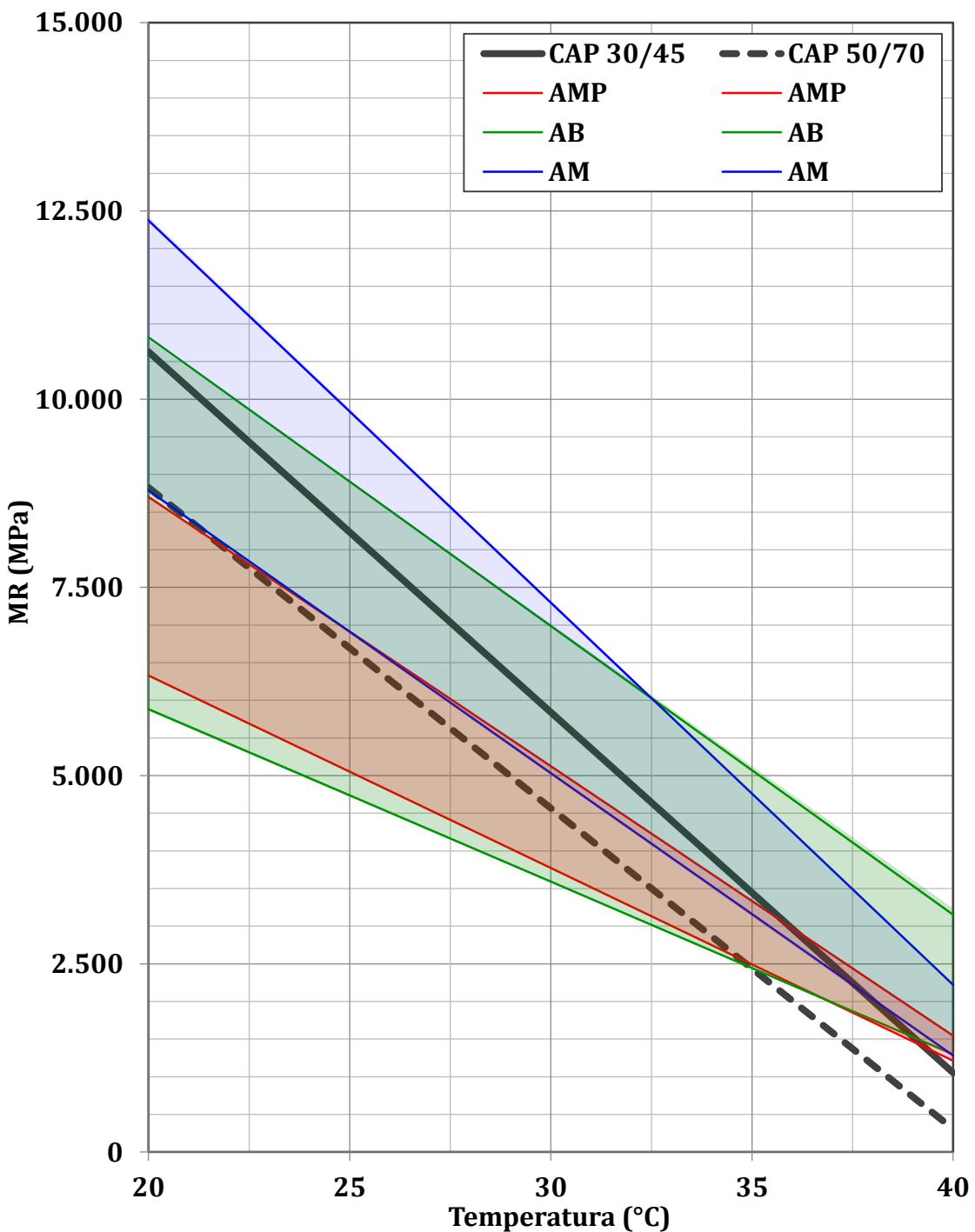


Figura 5.13. Resultados de MR nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo, em função da temperatura de ensaio

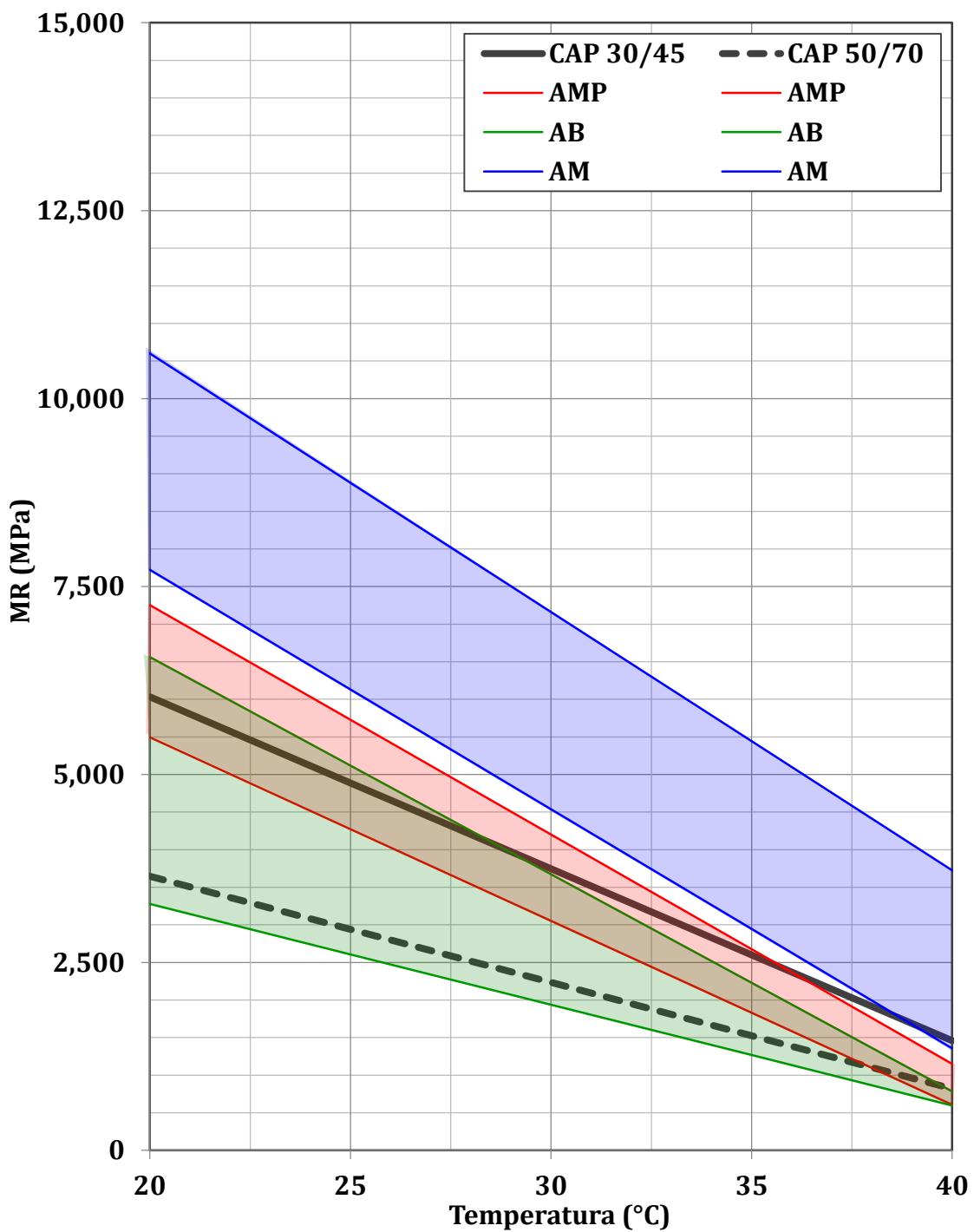


Figura 5.14. Resultados de MR nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro, em função da temperatura de ensaio

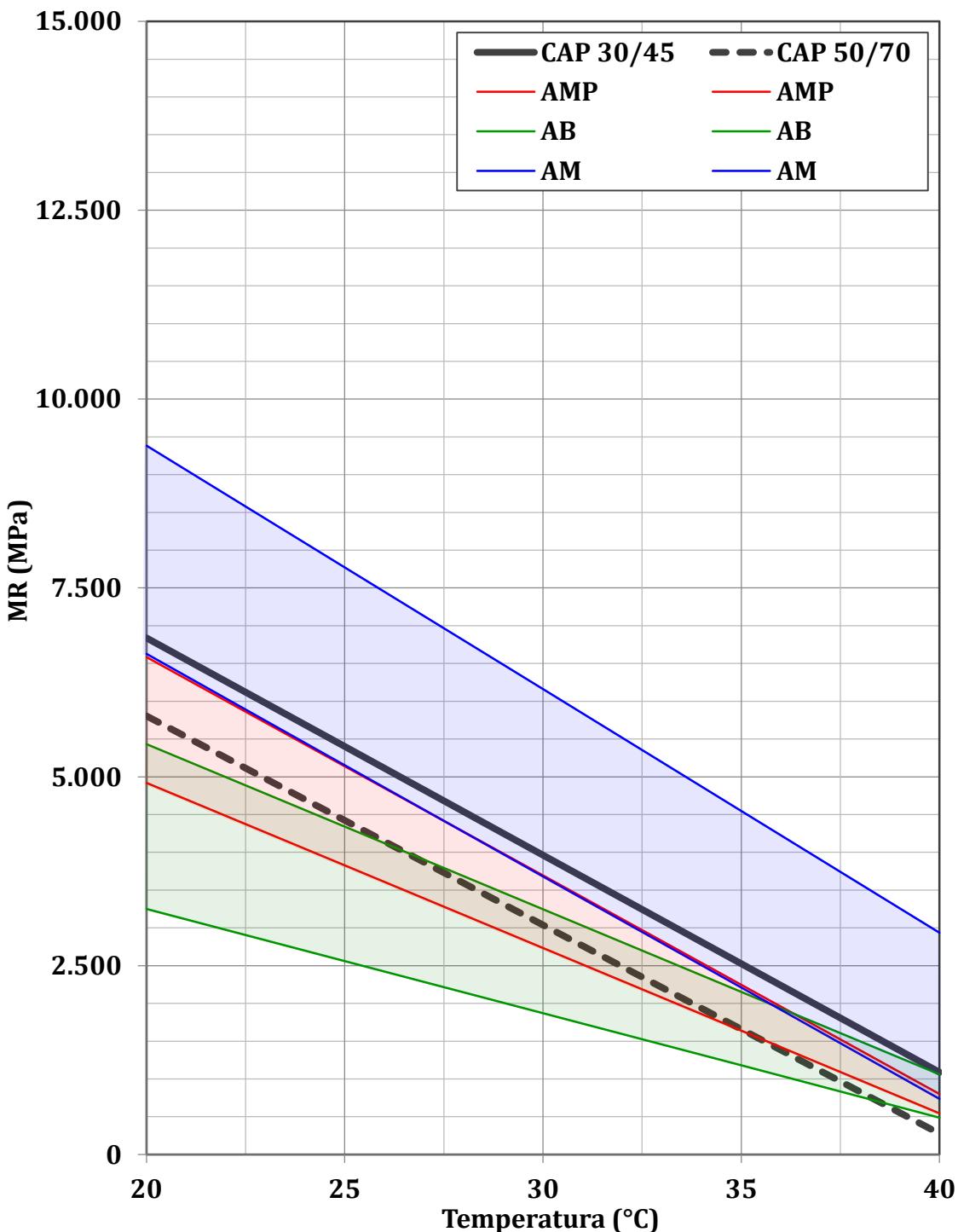


Figura 5.15. Resultados de MR nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo, em função da temperatura de ensaio

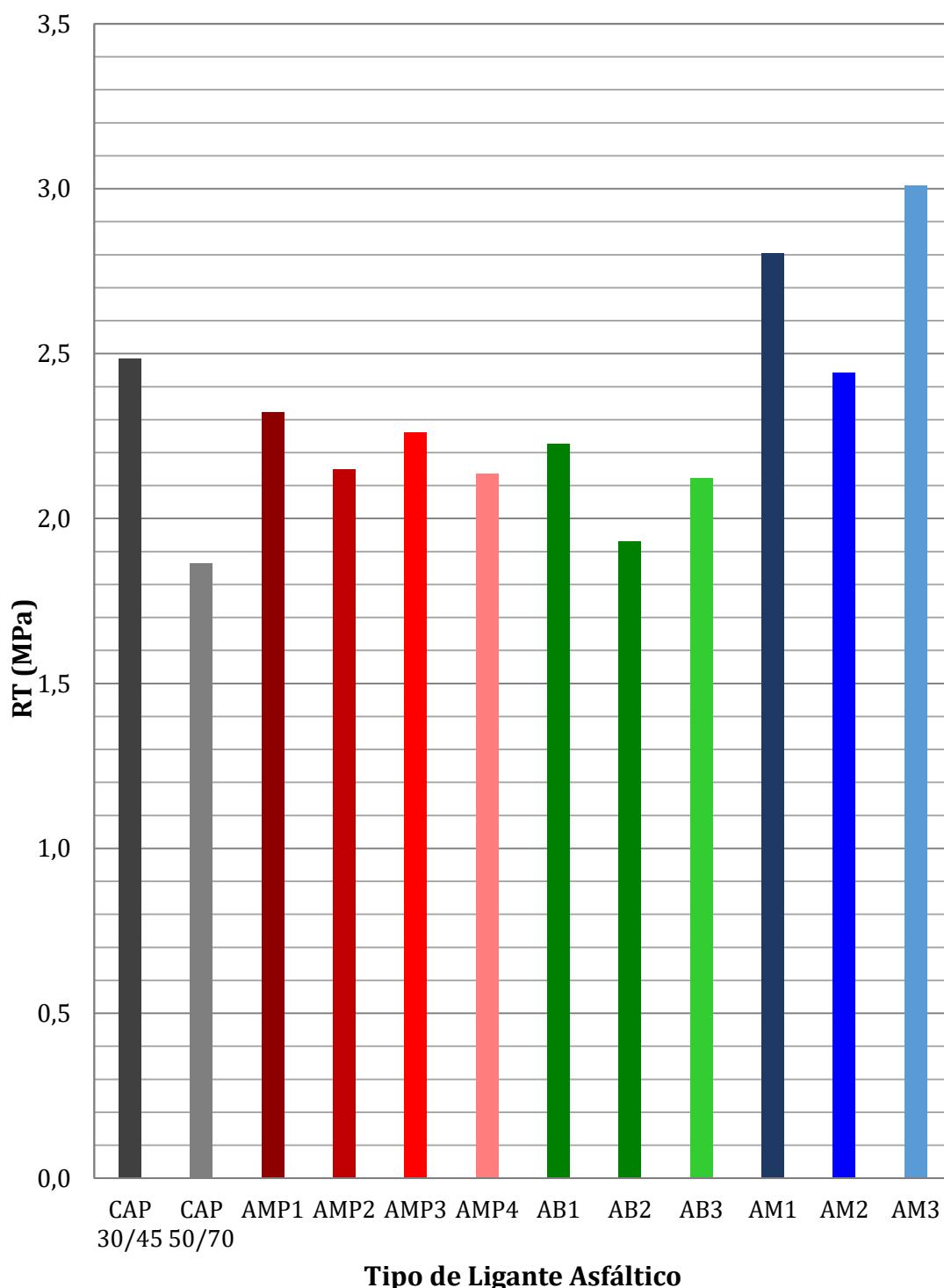


Figura 5.16. Resultados de RT nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo

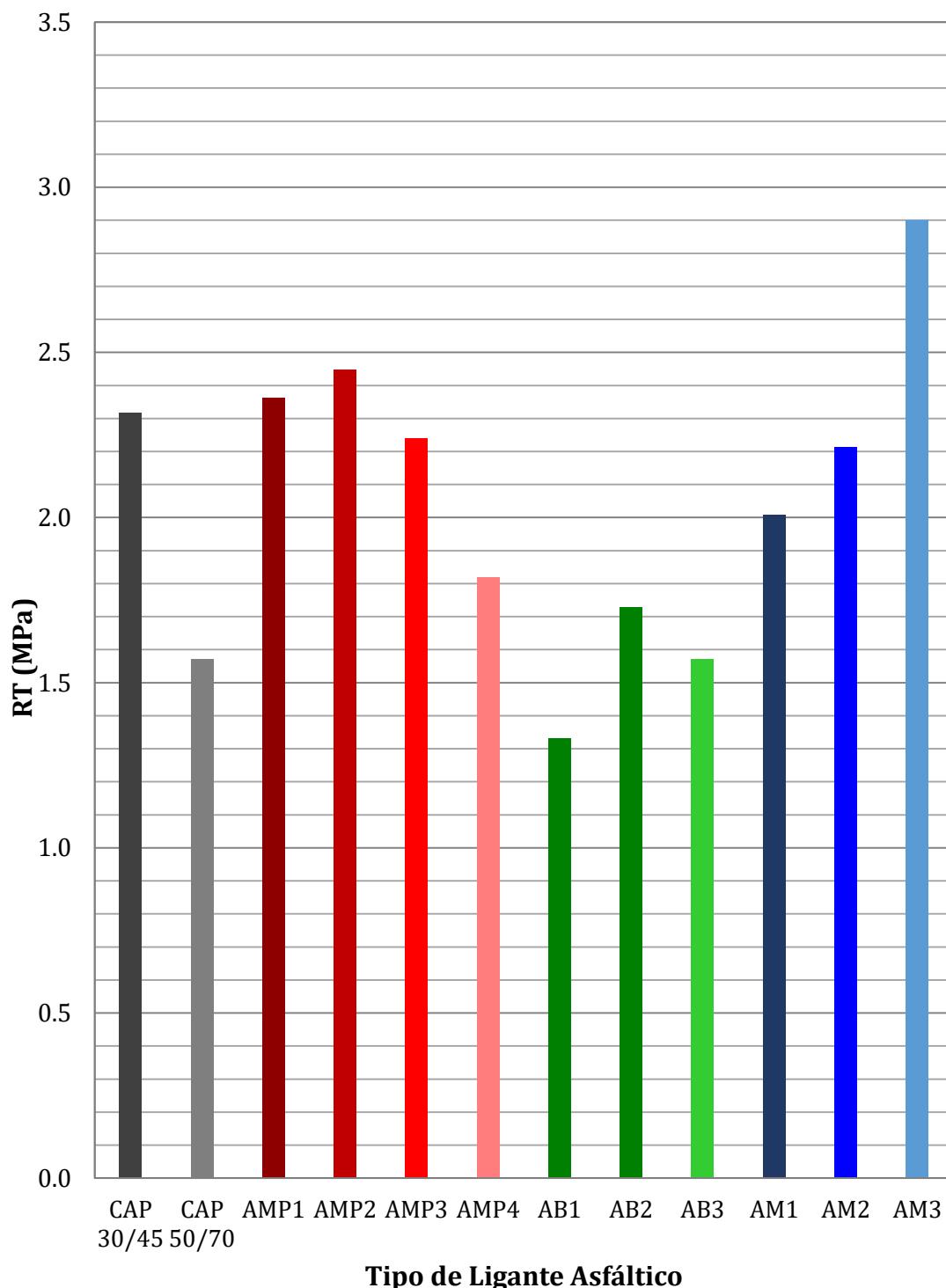


Figura 5.17. Resultados de RT nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

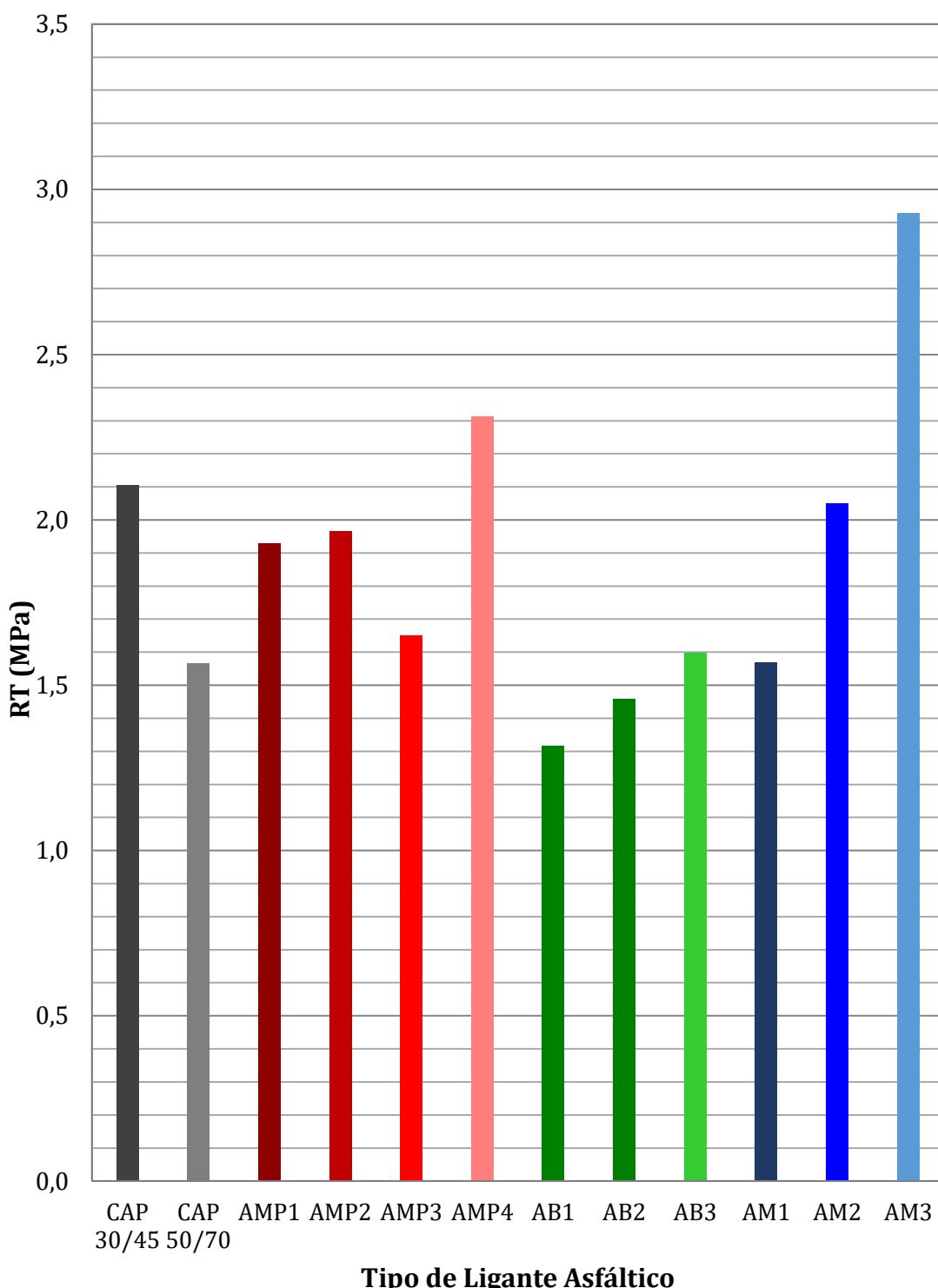


Figura 5.18. Resultados de RT nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo

#### 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.

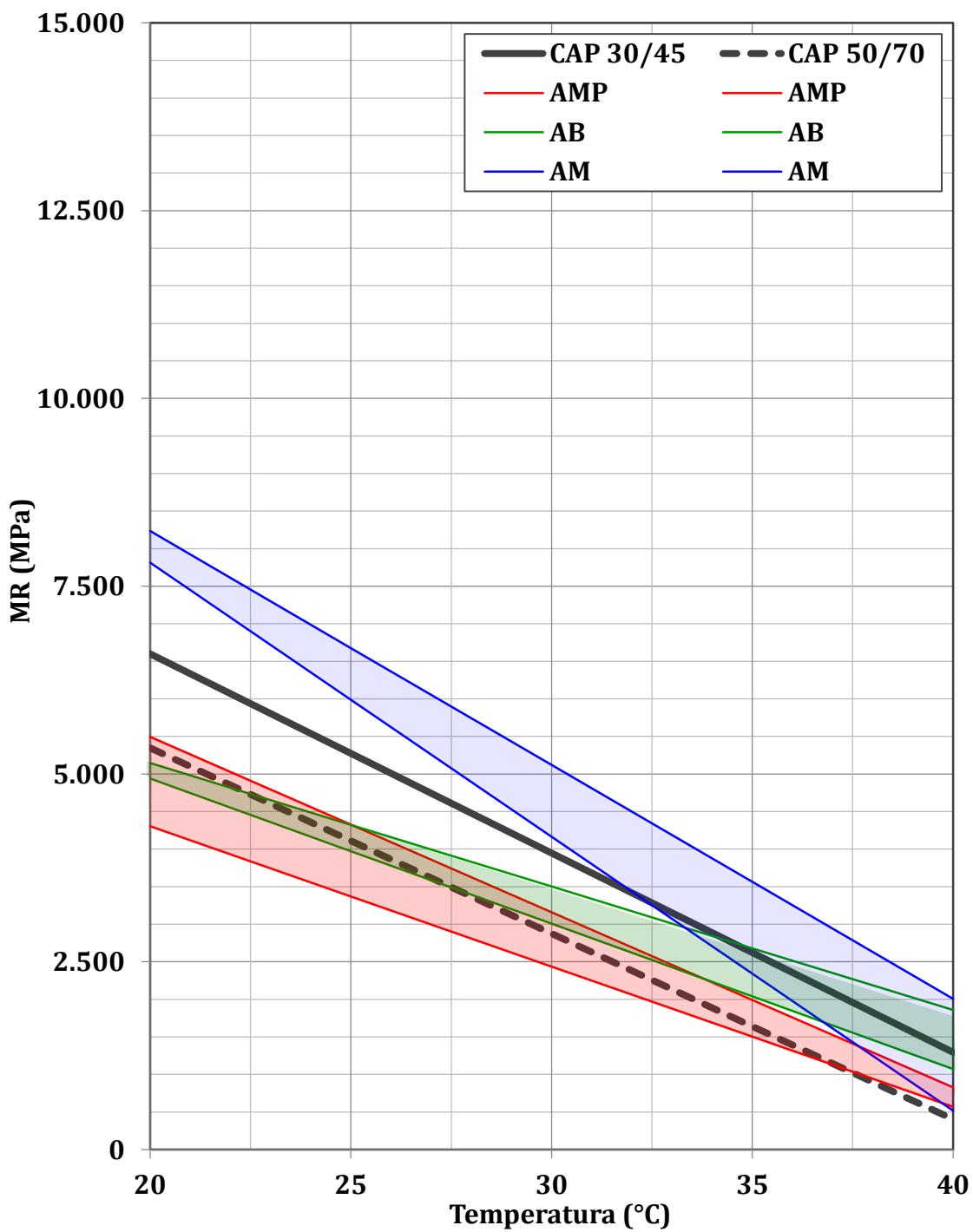


Figura 5.19. Resultados de MR nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado de São Paulo, em função da temperatura de ensaio

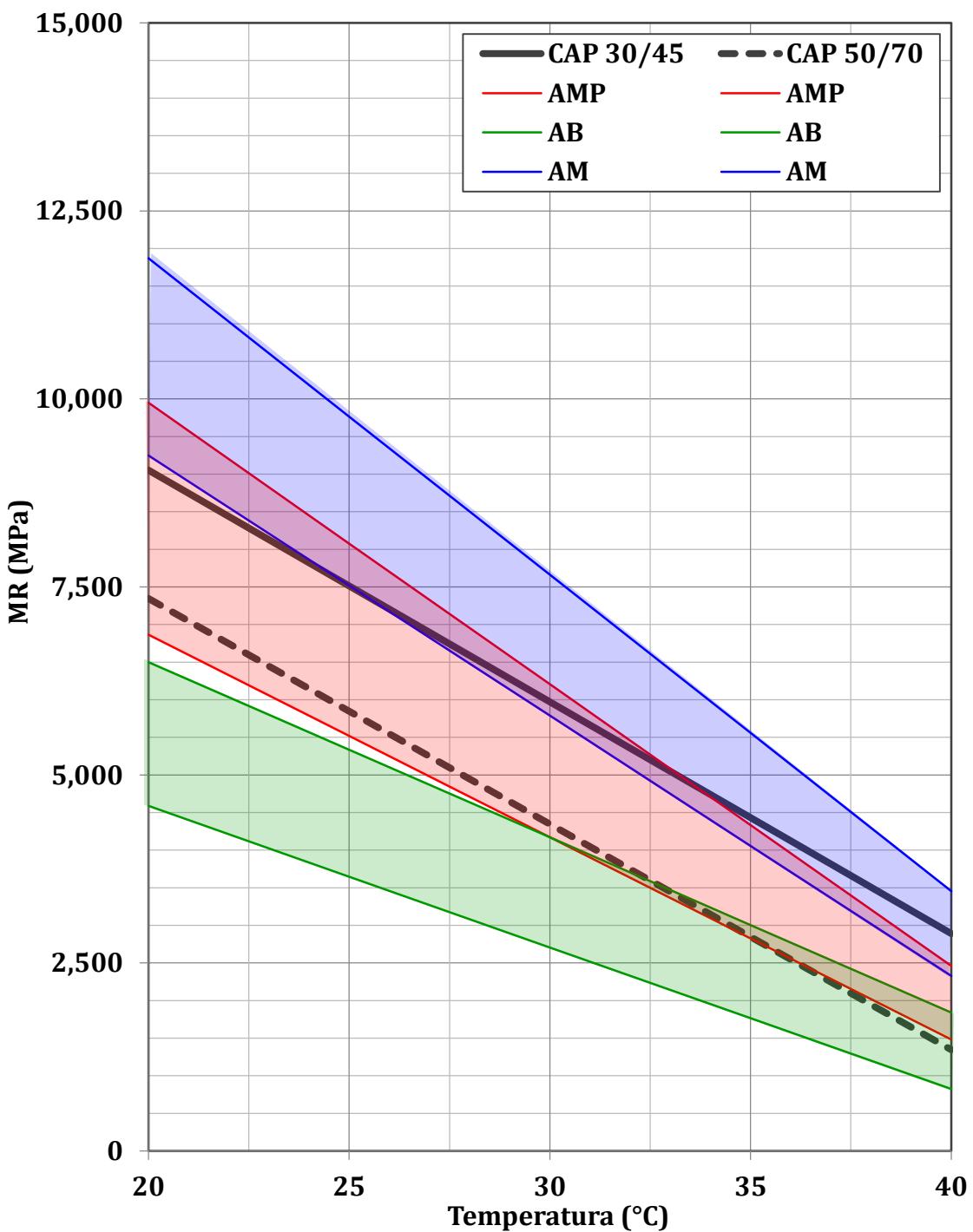


Figura 5.20. Resultados de MR nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro, em função da temperatura de ensaio

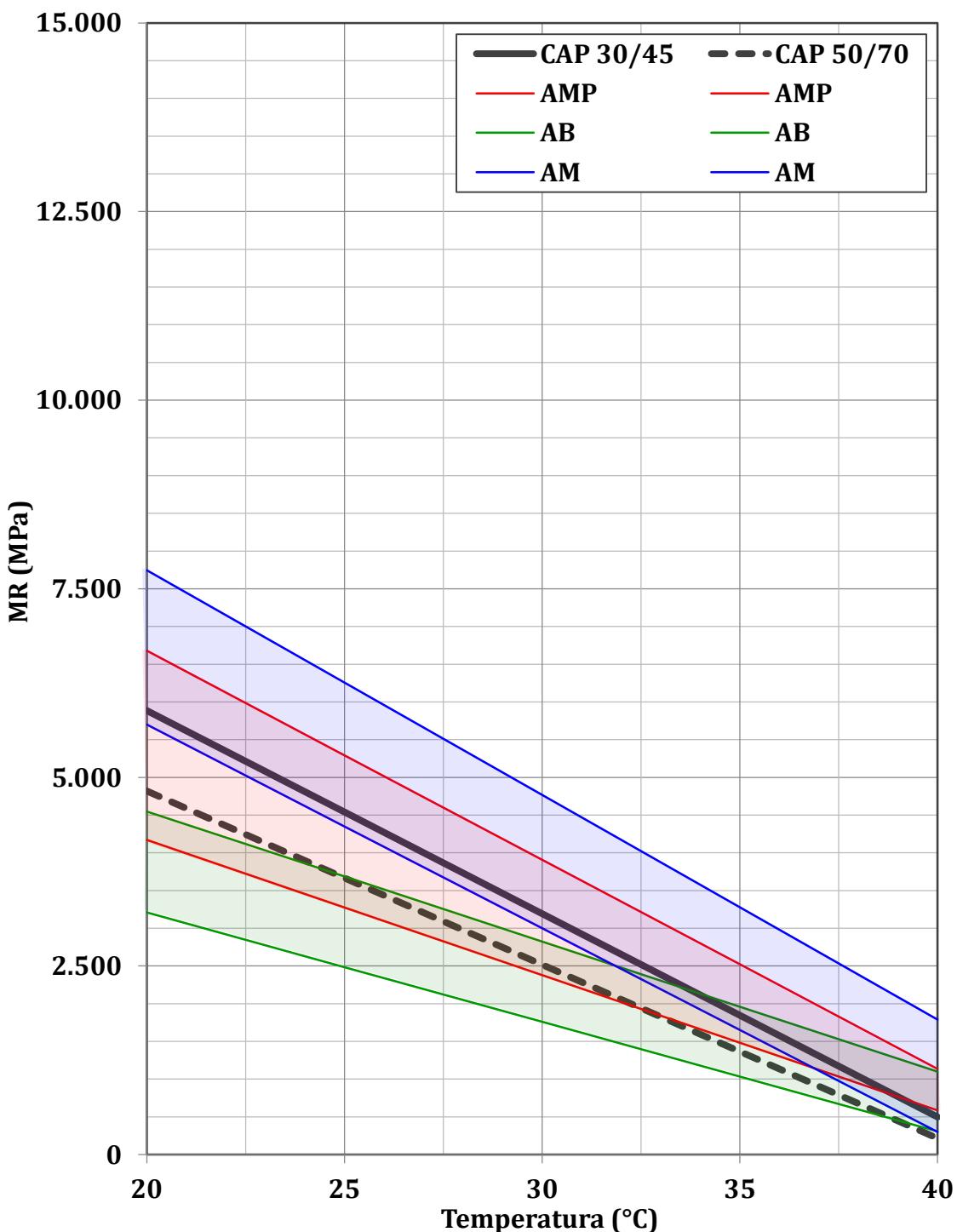


Figura 5.21. Resultados de MR nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos do Estado de São Paulo, em função da temperatura de ensaio

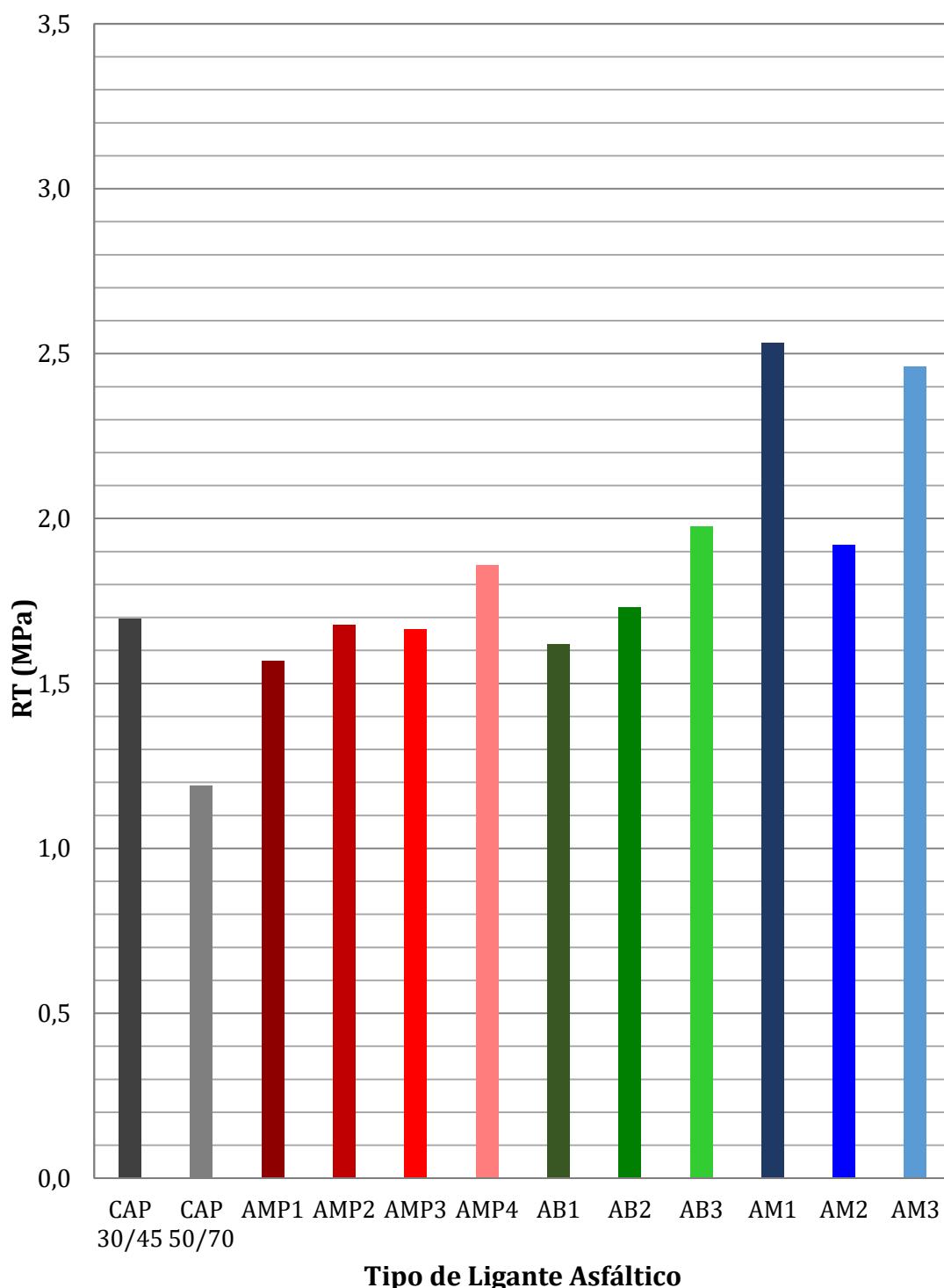


Figura 5.22: Resultados de RT nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado de São Paulo

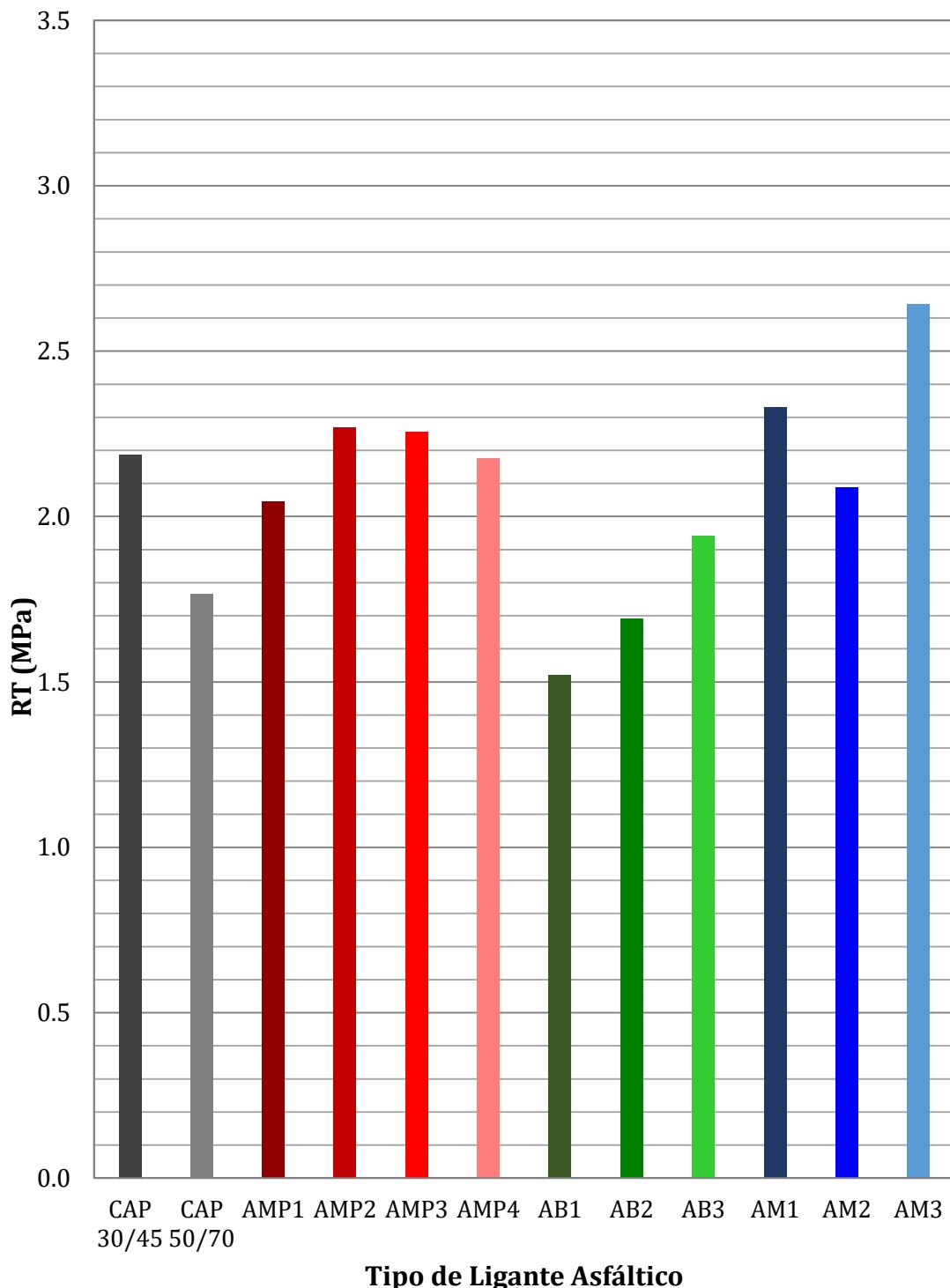


Figura 5.23: Resultados de RT nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

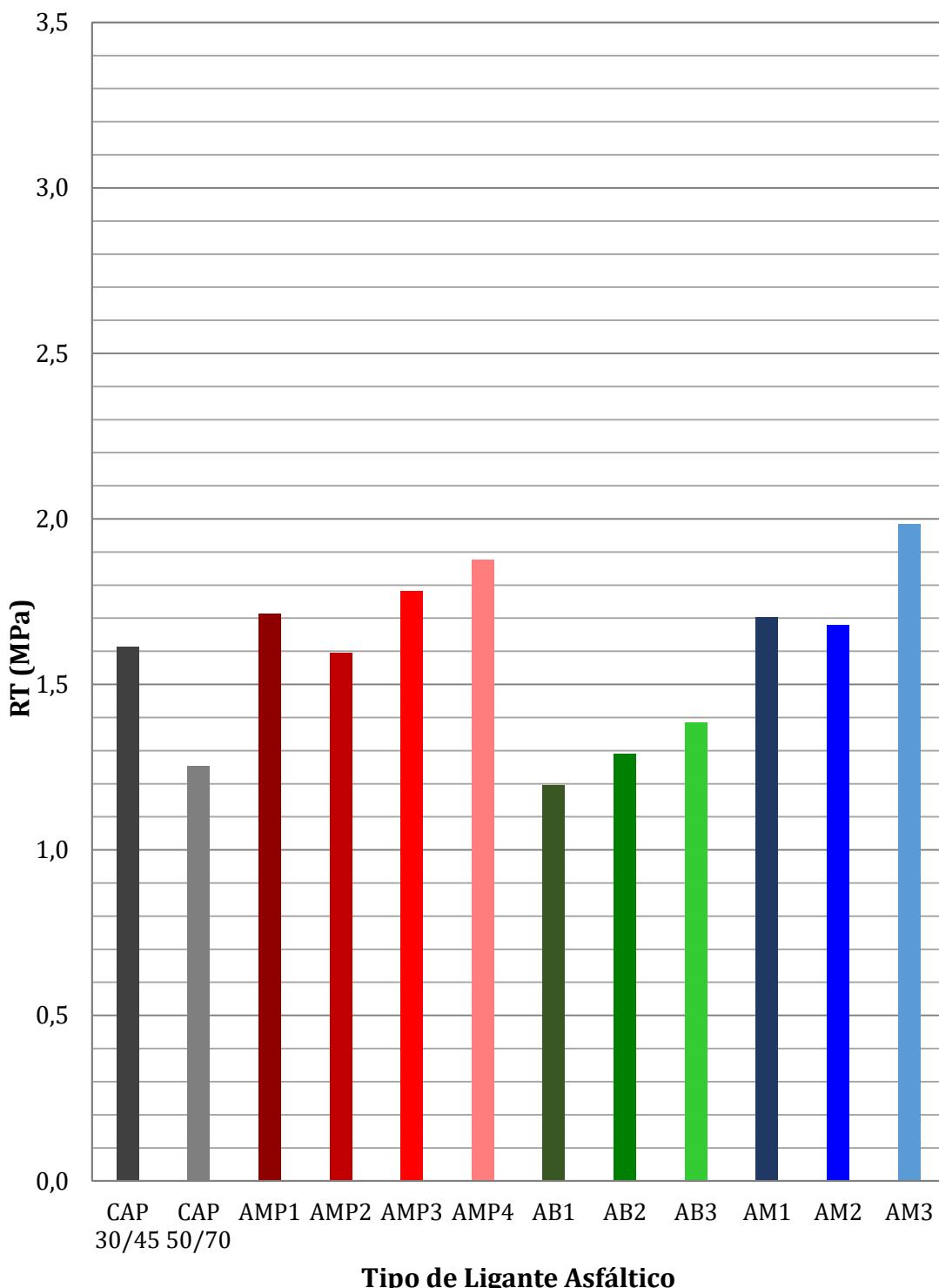


Figura 5.24. Resultados de RT nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos do Estado de São Paulo

## 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 Asfáltica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ligante Asfáltico	CAP 30/45	CAP 50/70	AMP1	AMP2	AMP3	AMP4	AB1	AB2	AB3	AM1	AM2	AM3
Frequência Reduzida (Hz)	$E^*$ (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

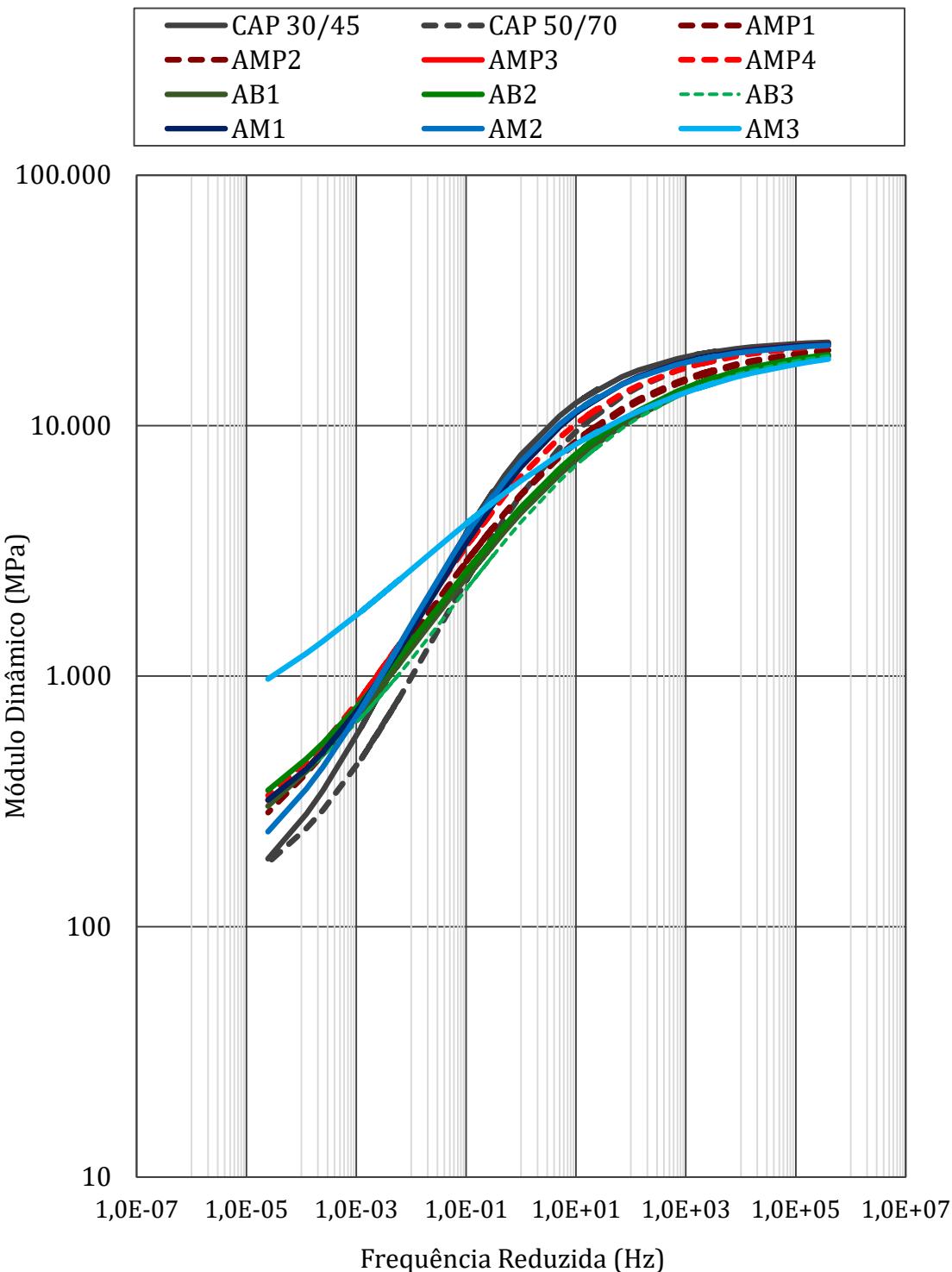


Figura 5.25: Curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo e os ligantes asfálticos estudados

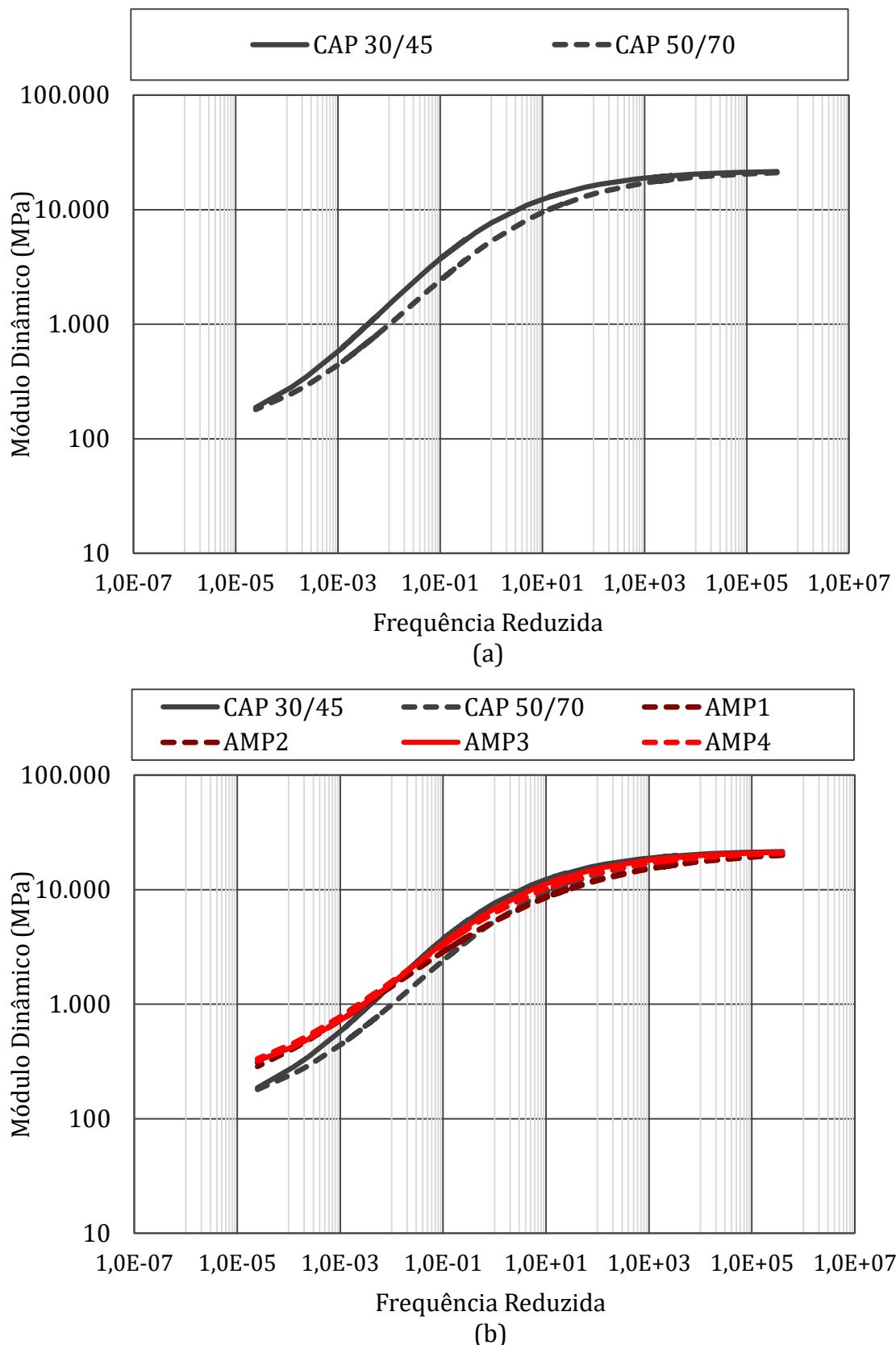


Figura 5.26: Curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos (SP)

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

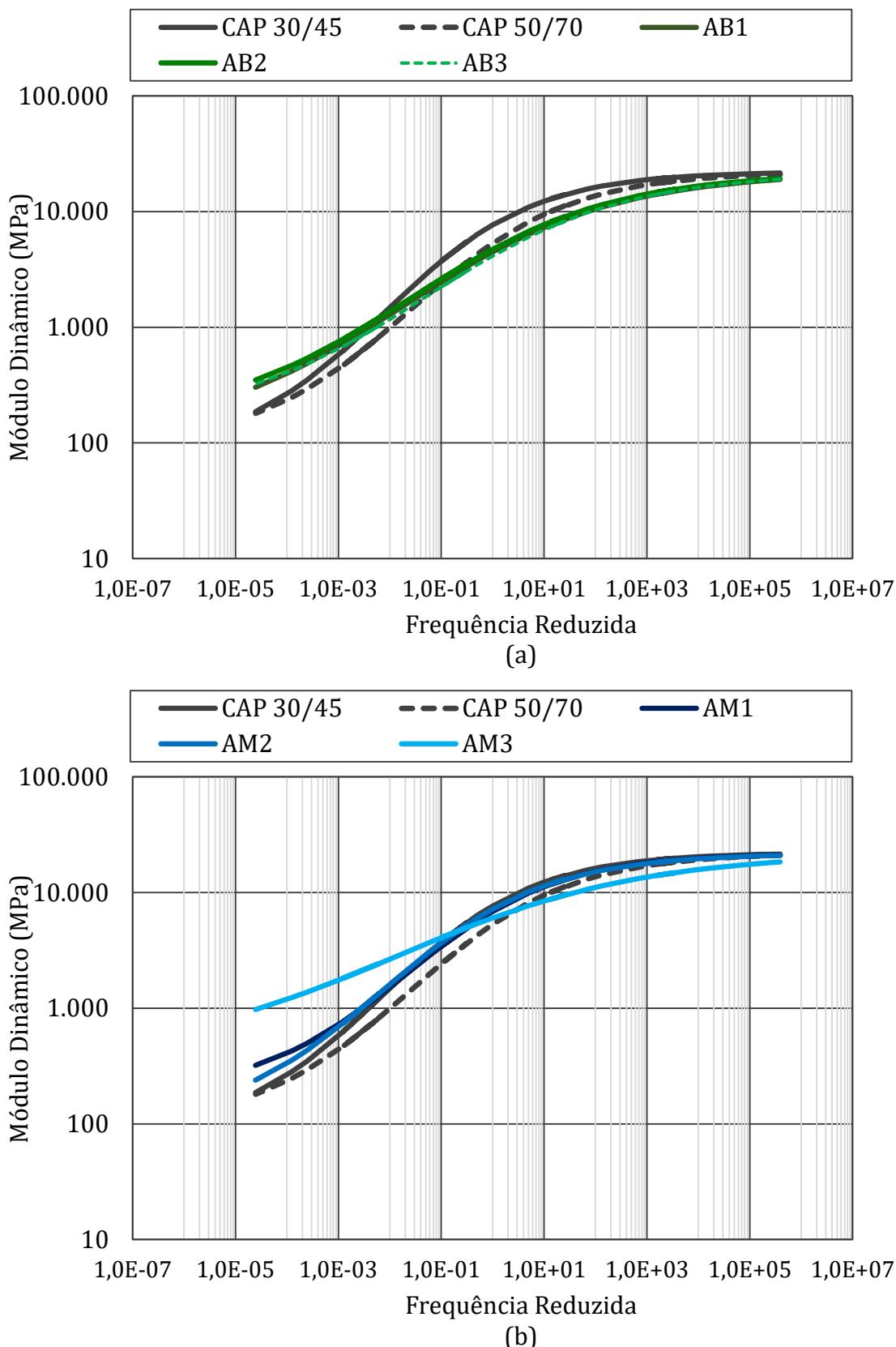


Figura 5.27: Curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos (SP)

(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)											
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

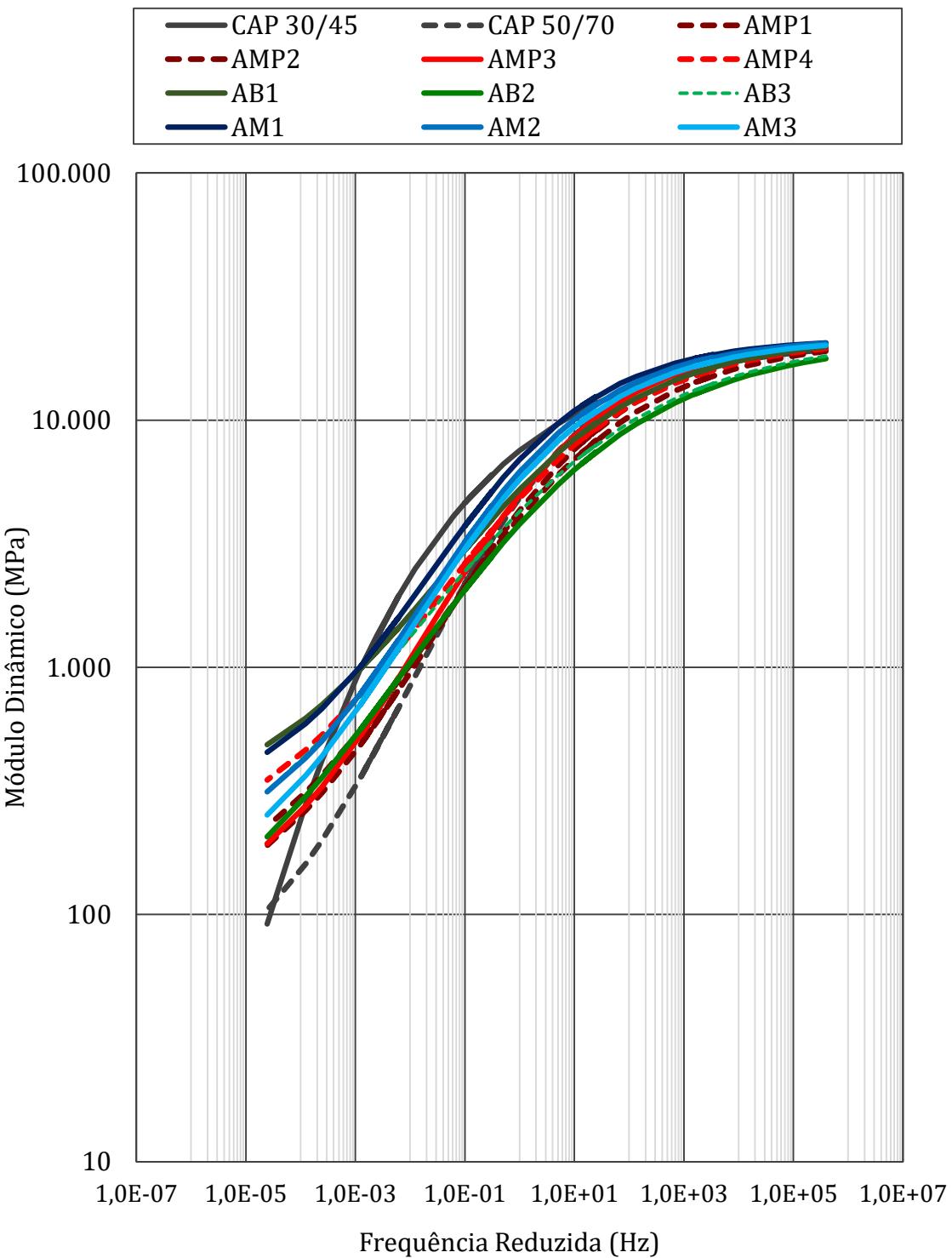


Figura 5.28: Curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de Rio de Janeiro e os ligantes asfálticos estudados

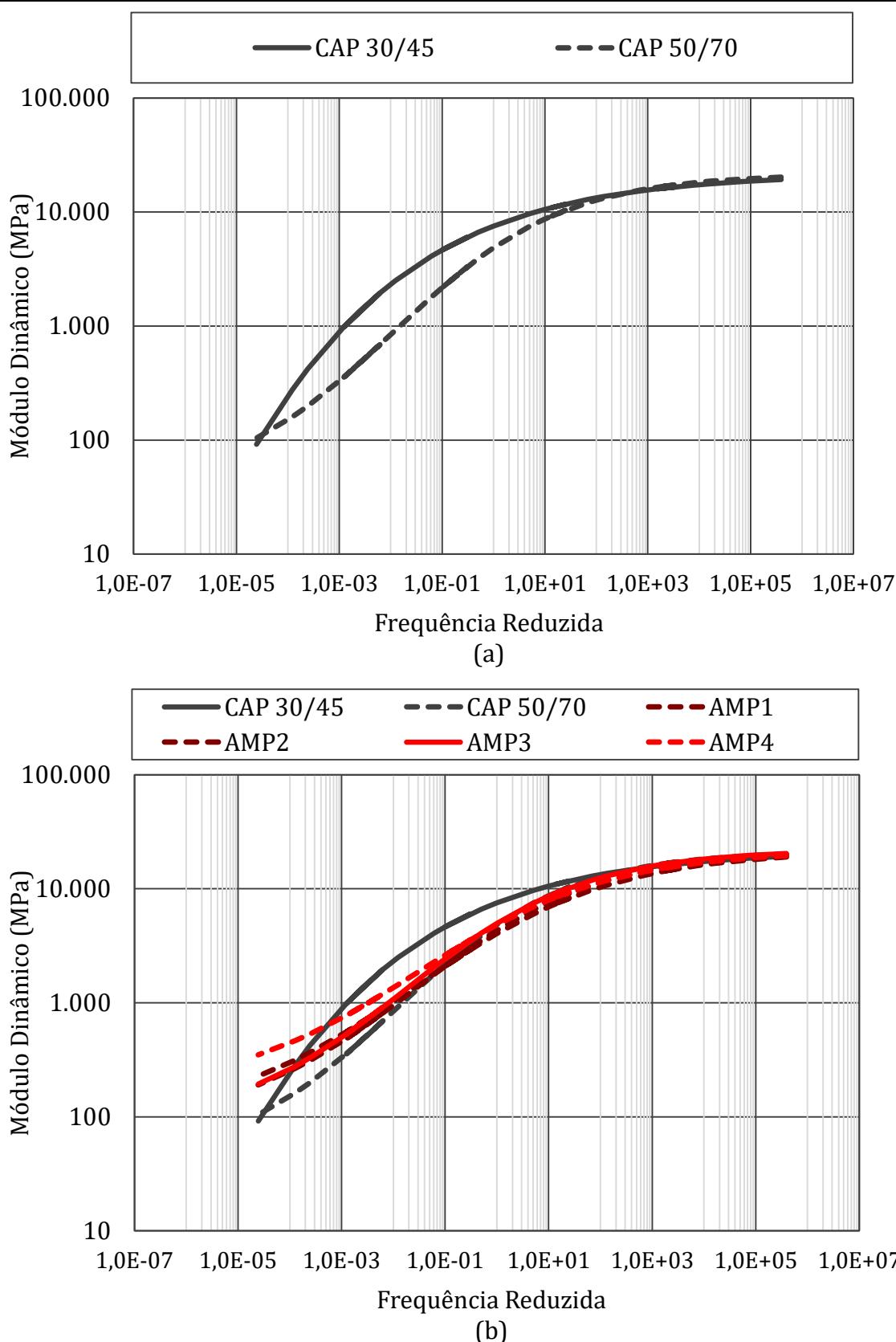
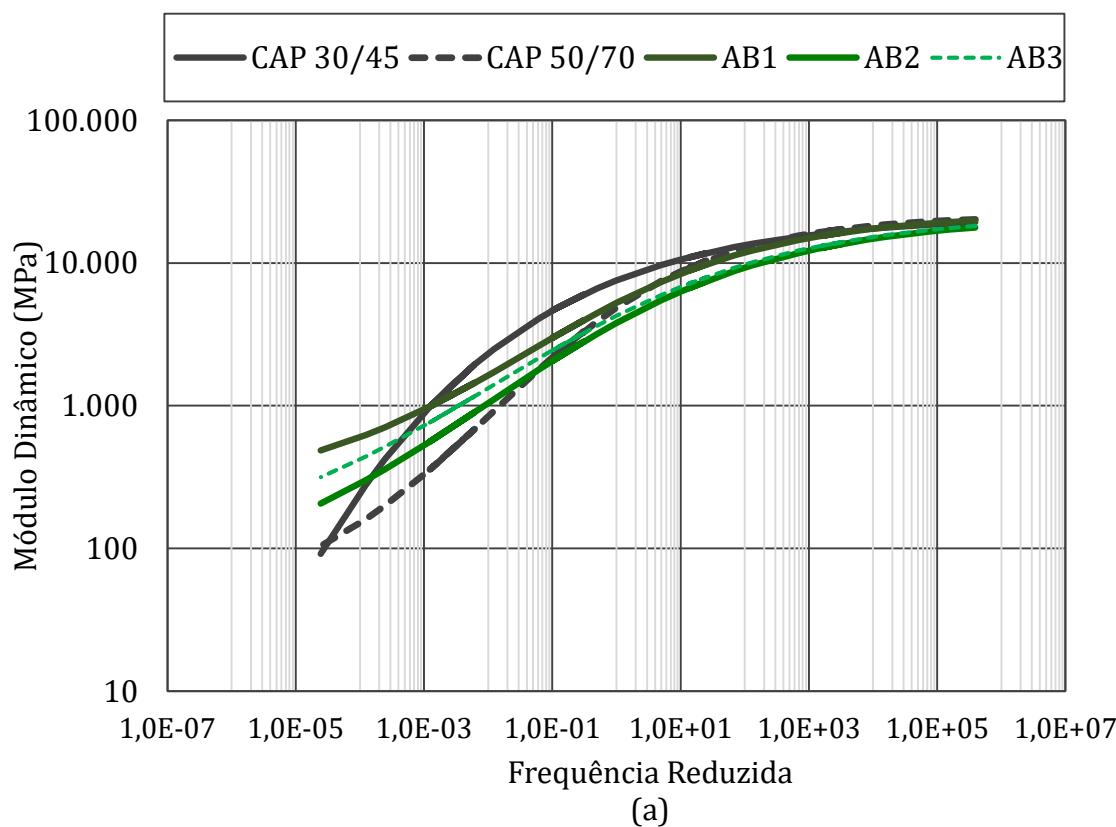
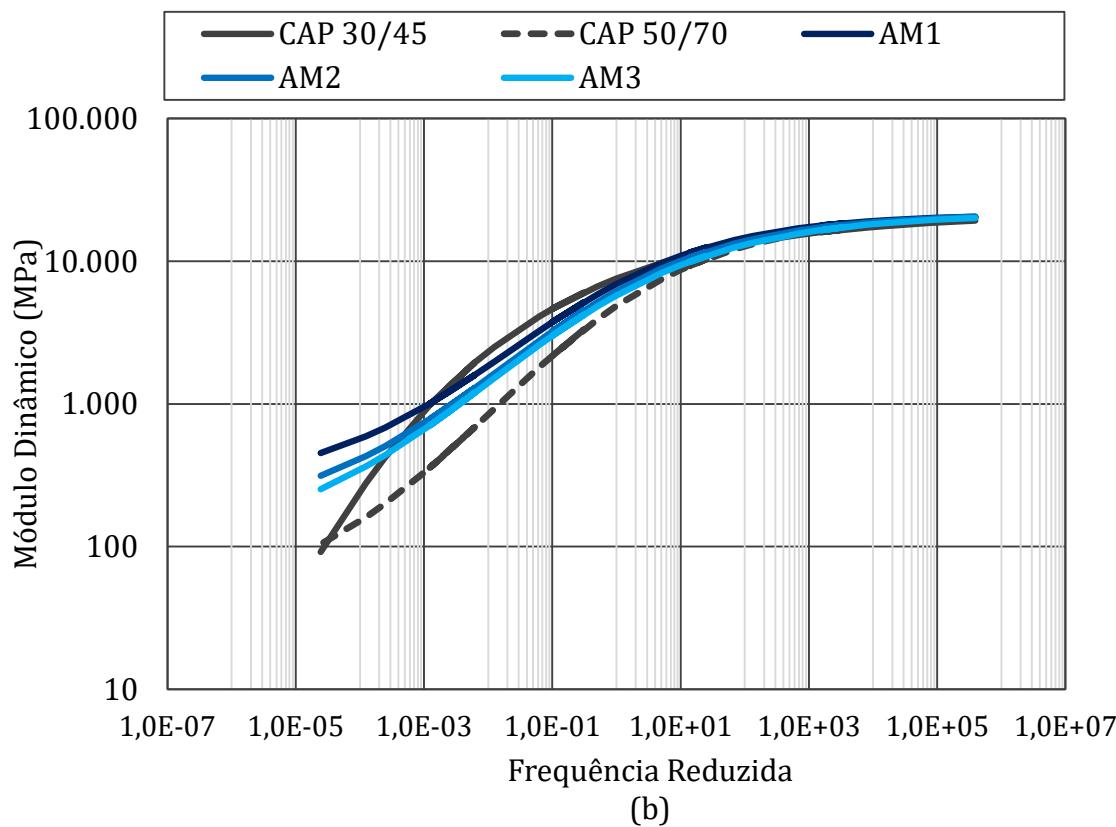


Figura 5.29: Curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos (RJ)

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



(a)



(b)

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)											
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

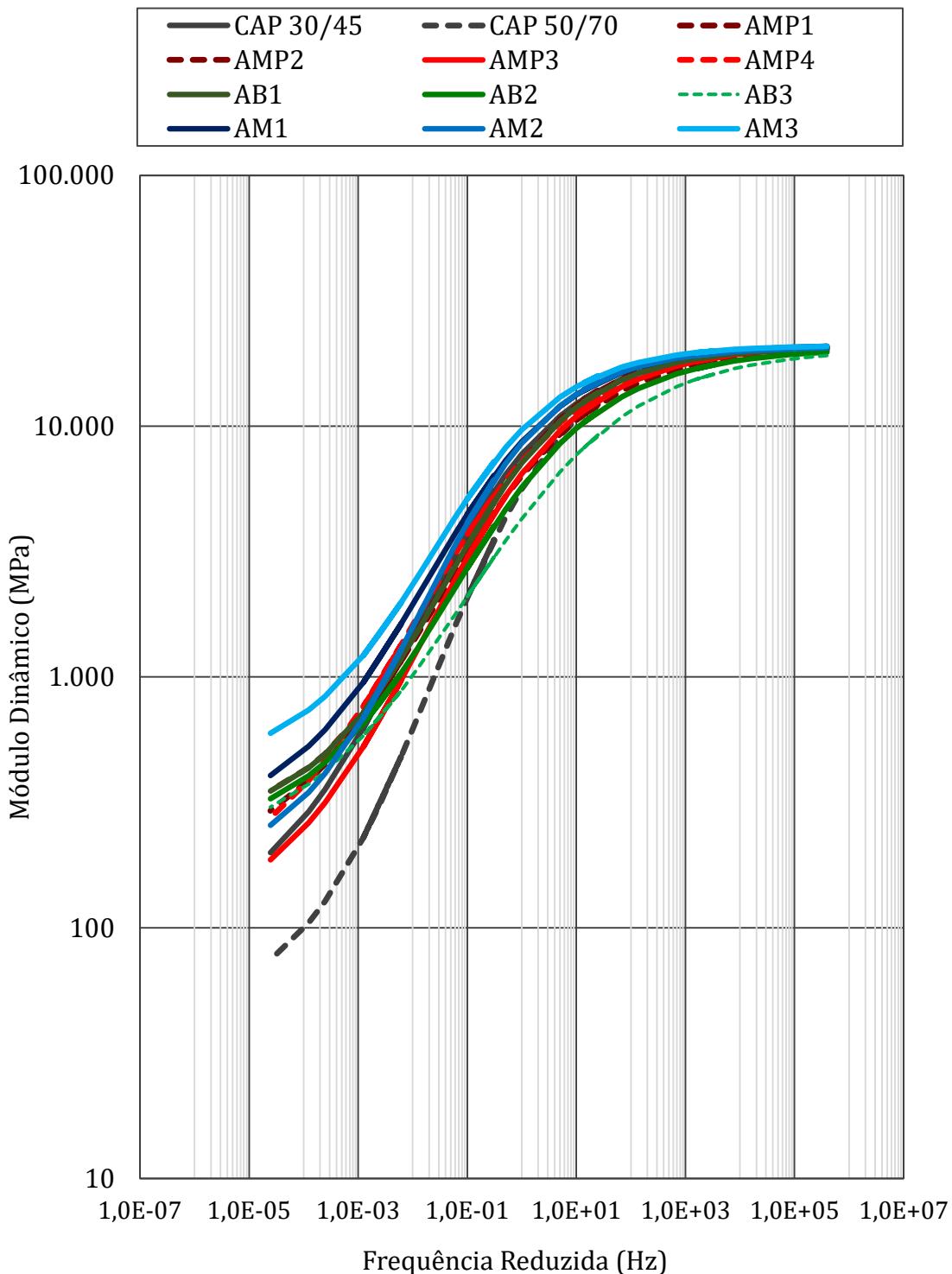


Figura 5.31: Curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos do Estado de São Paulo e os ligantes asfálticos estudados

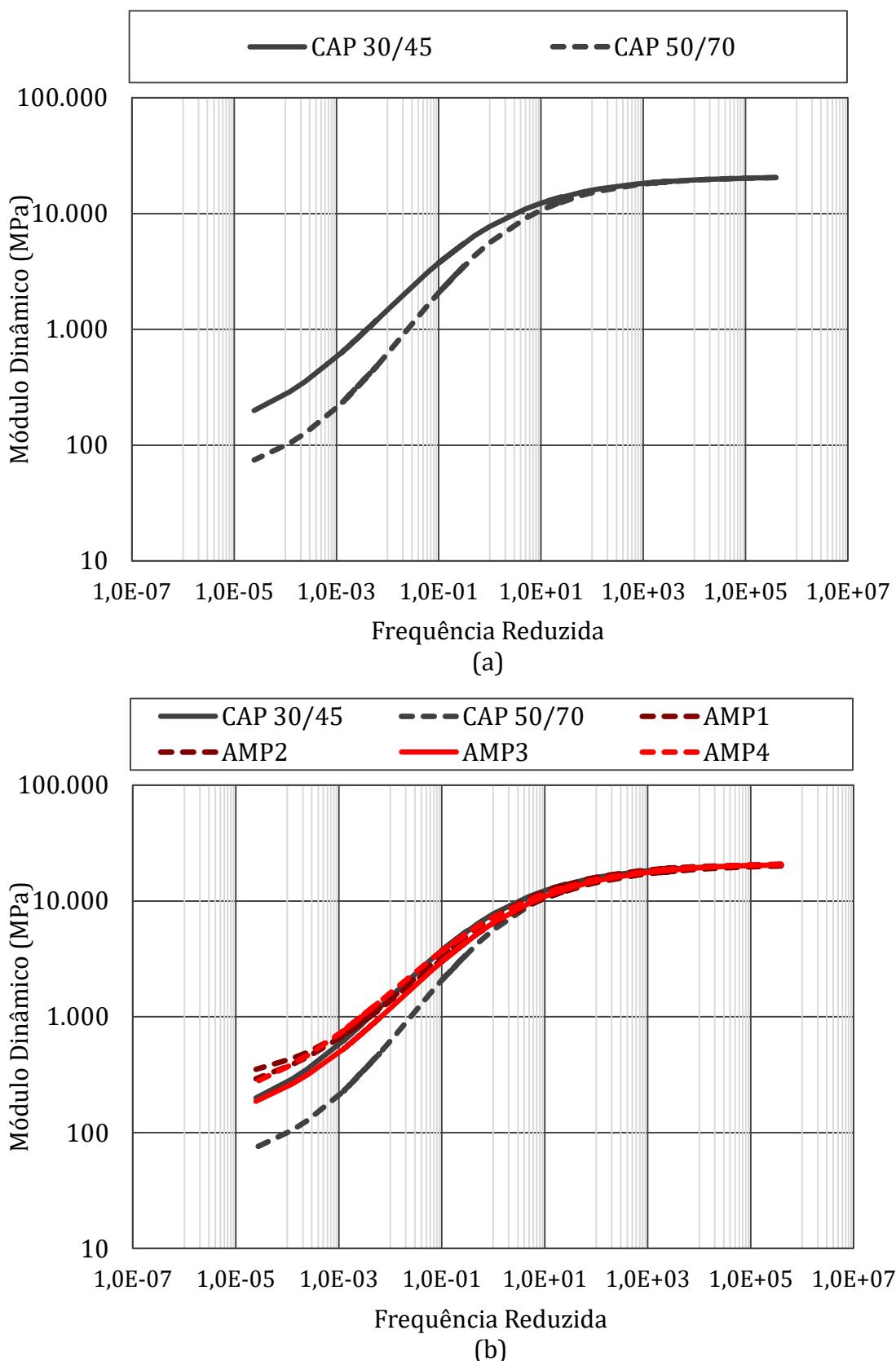


Figura 5.32: Curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos (SP)

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

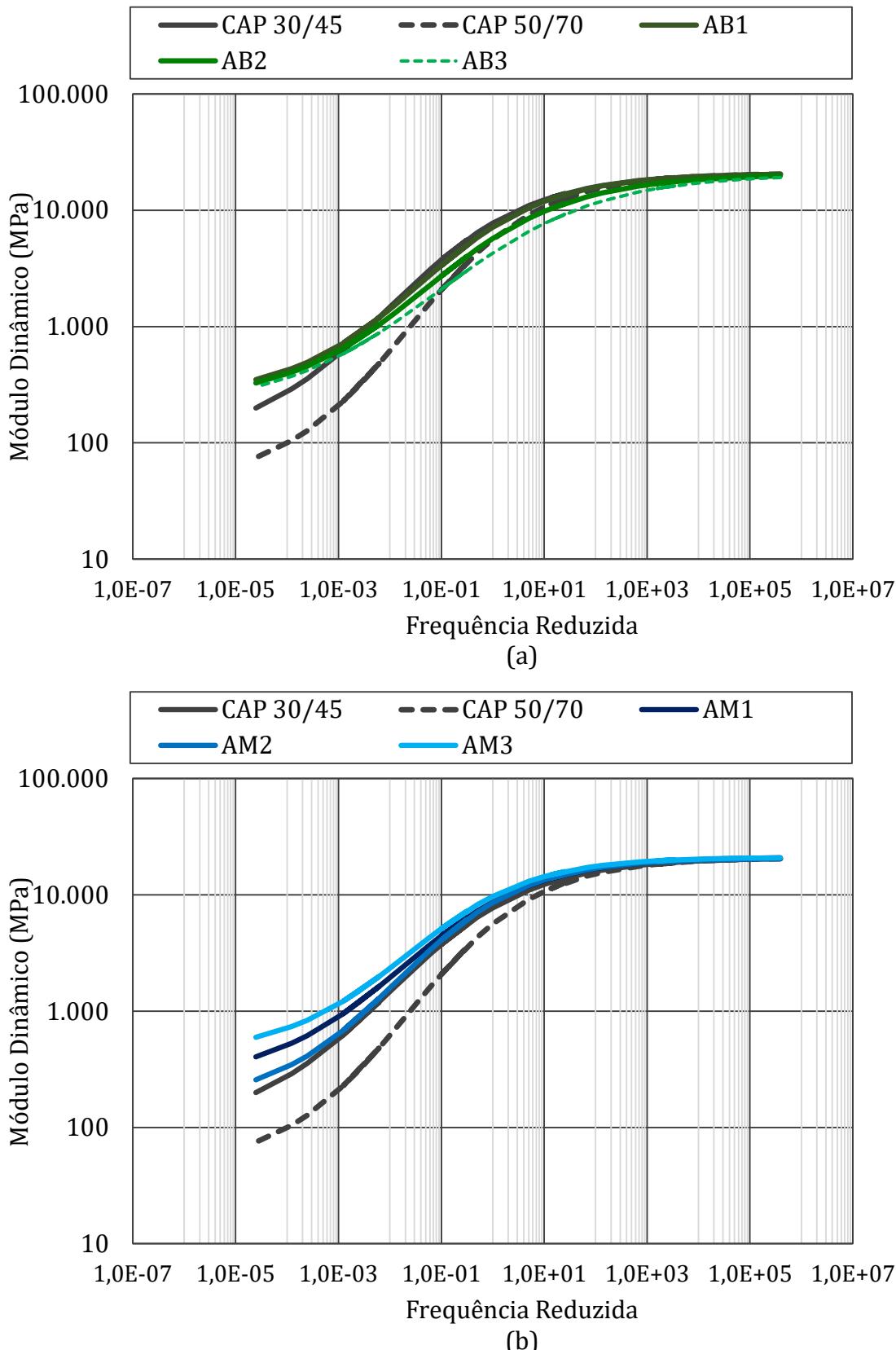


Figura 5.33: Curvas mestre das misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos (SP)

(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)											
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

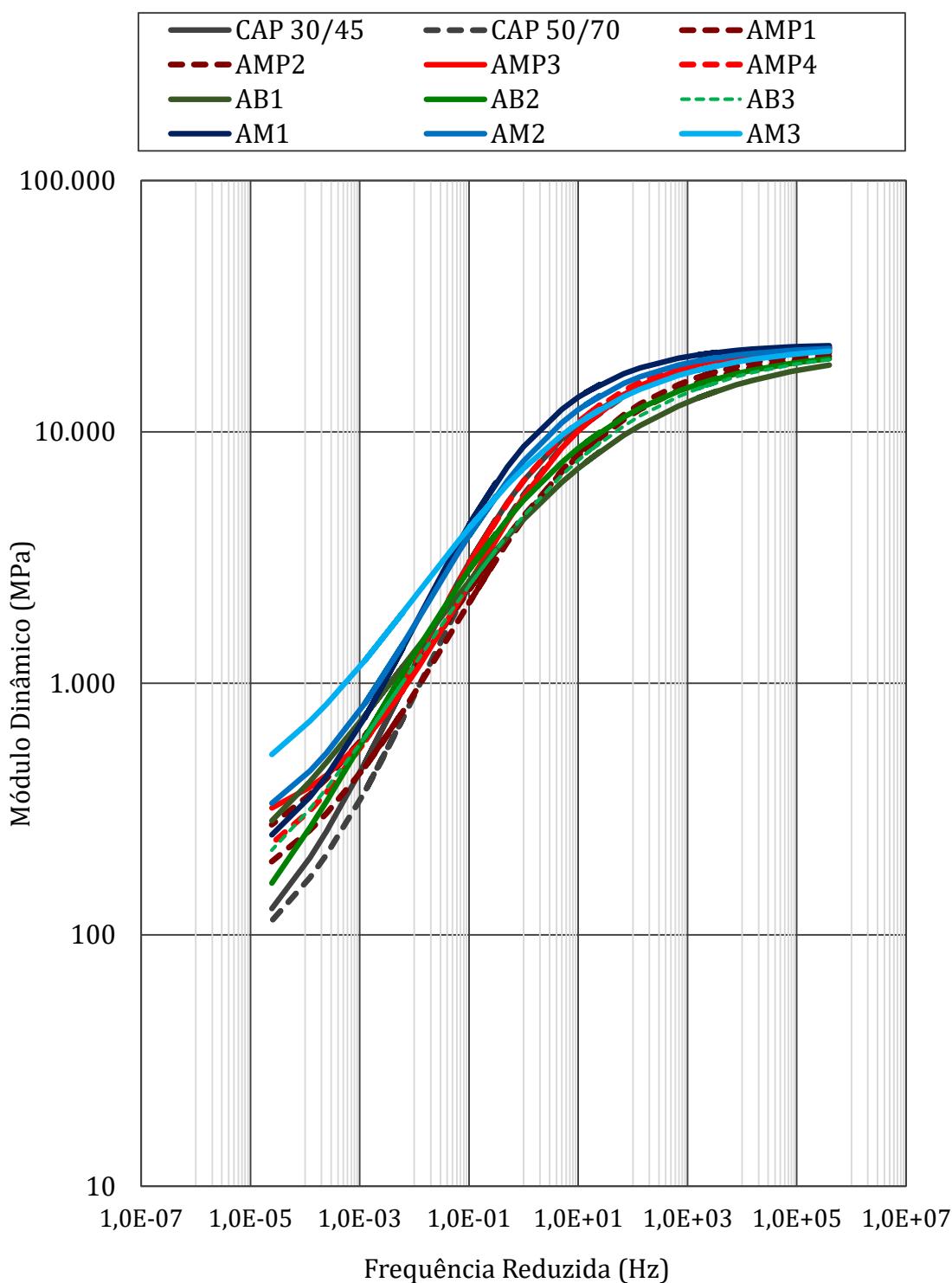


Figura 5.34: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo e os ligantes asfálticos estudados

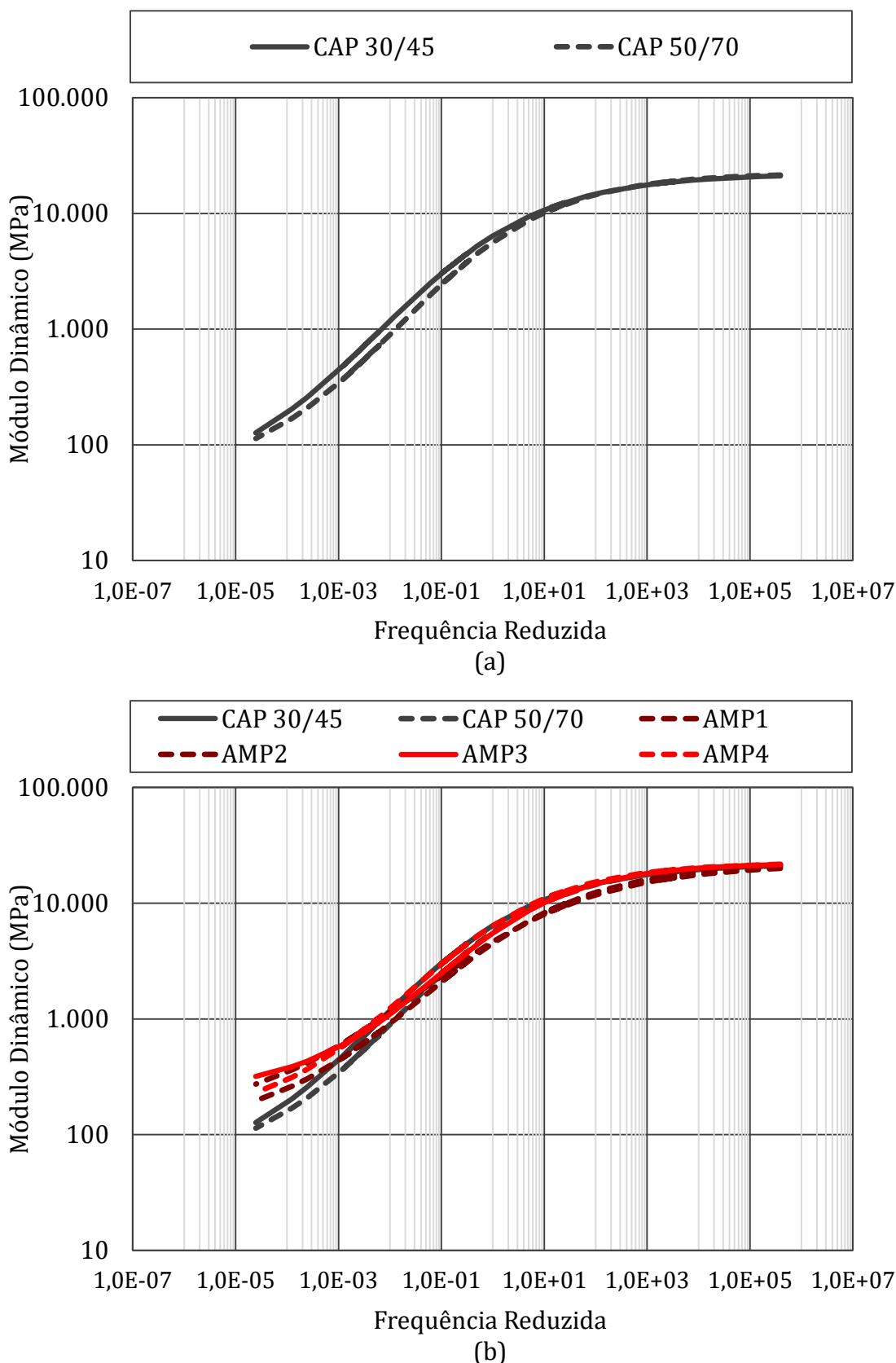
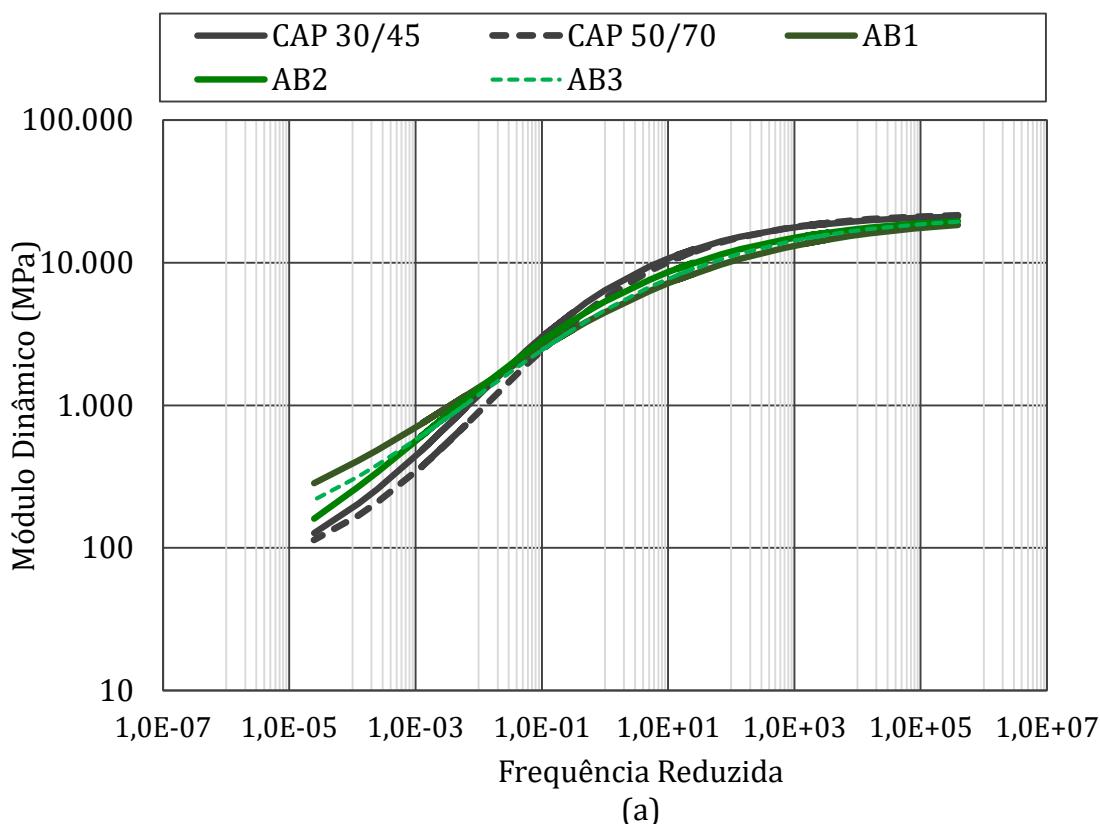
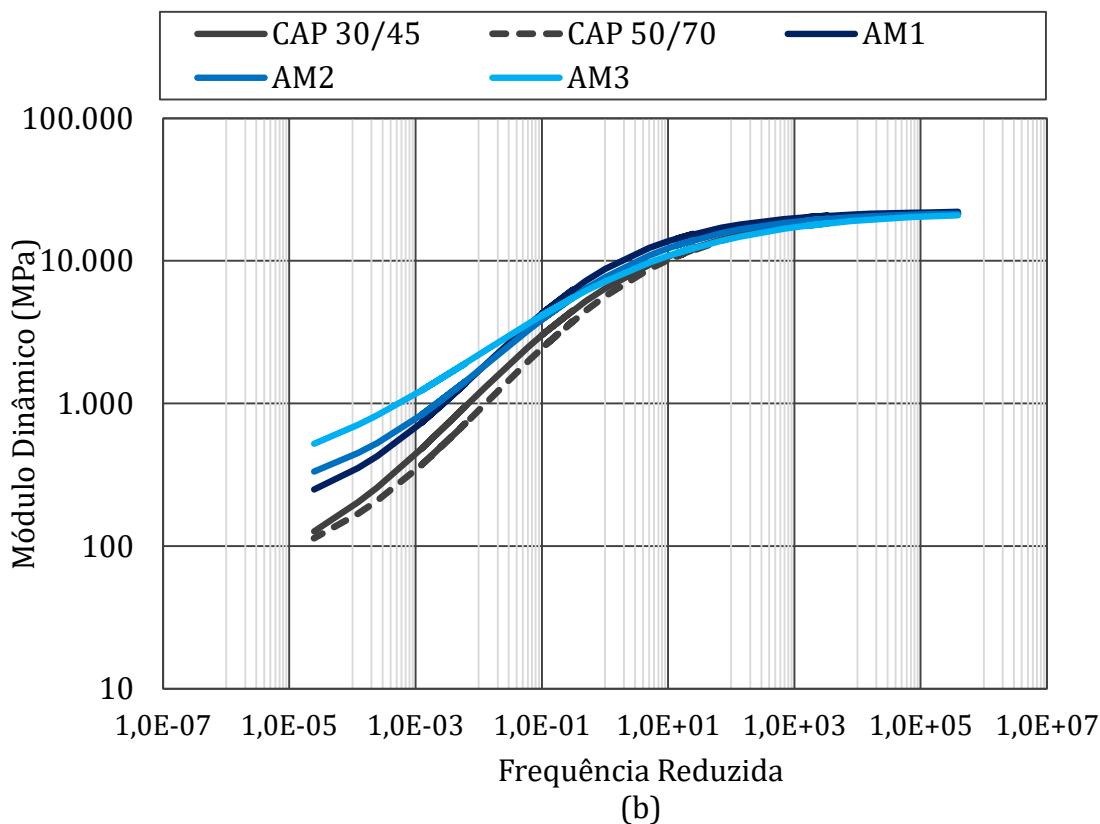


Figura 5.35: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos (SP)

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



(a)



(b)

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)											
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

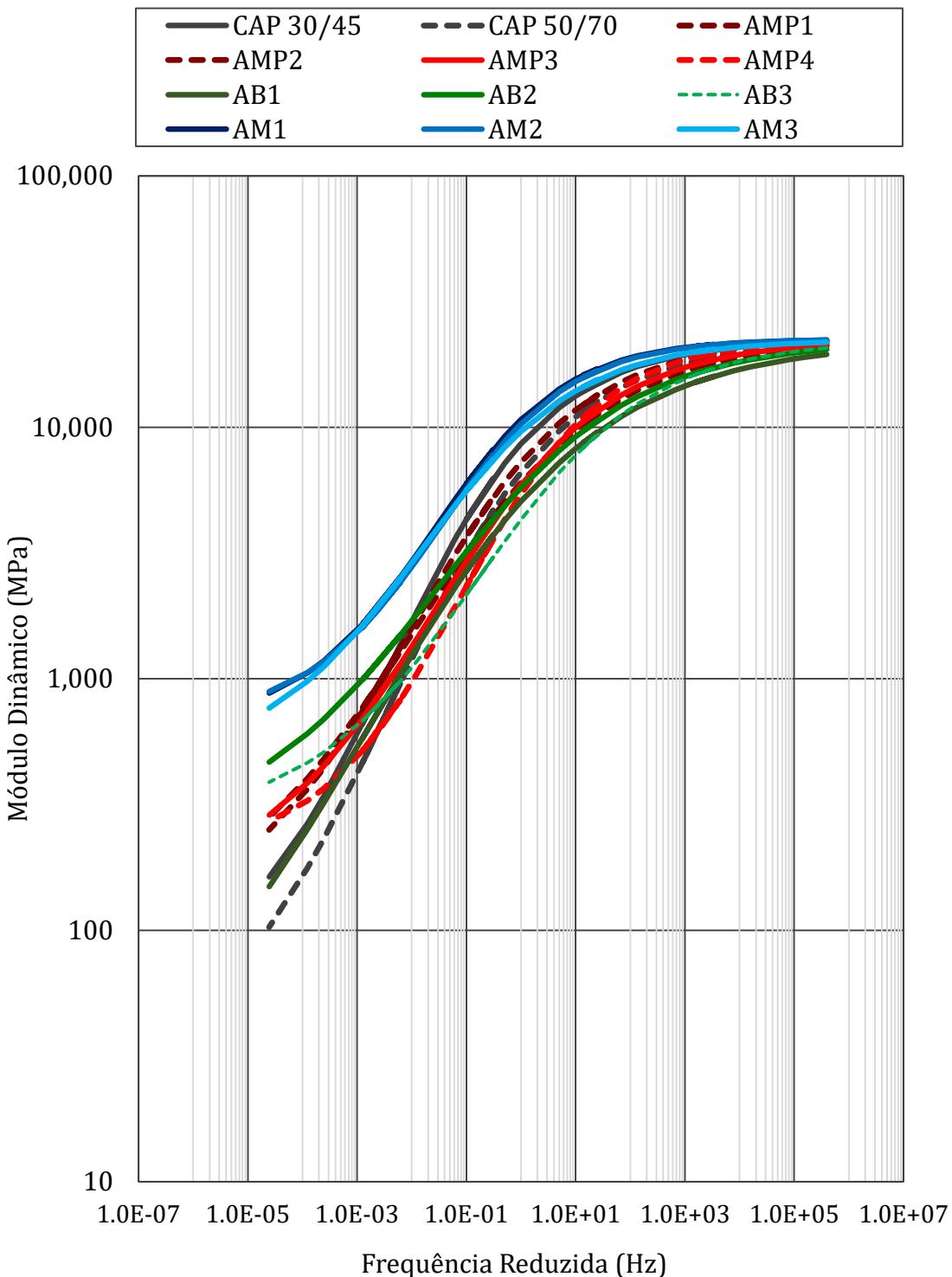


Figura 5.37: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro e os ligantes asfálticos estudados

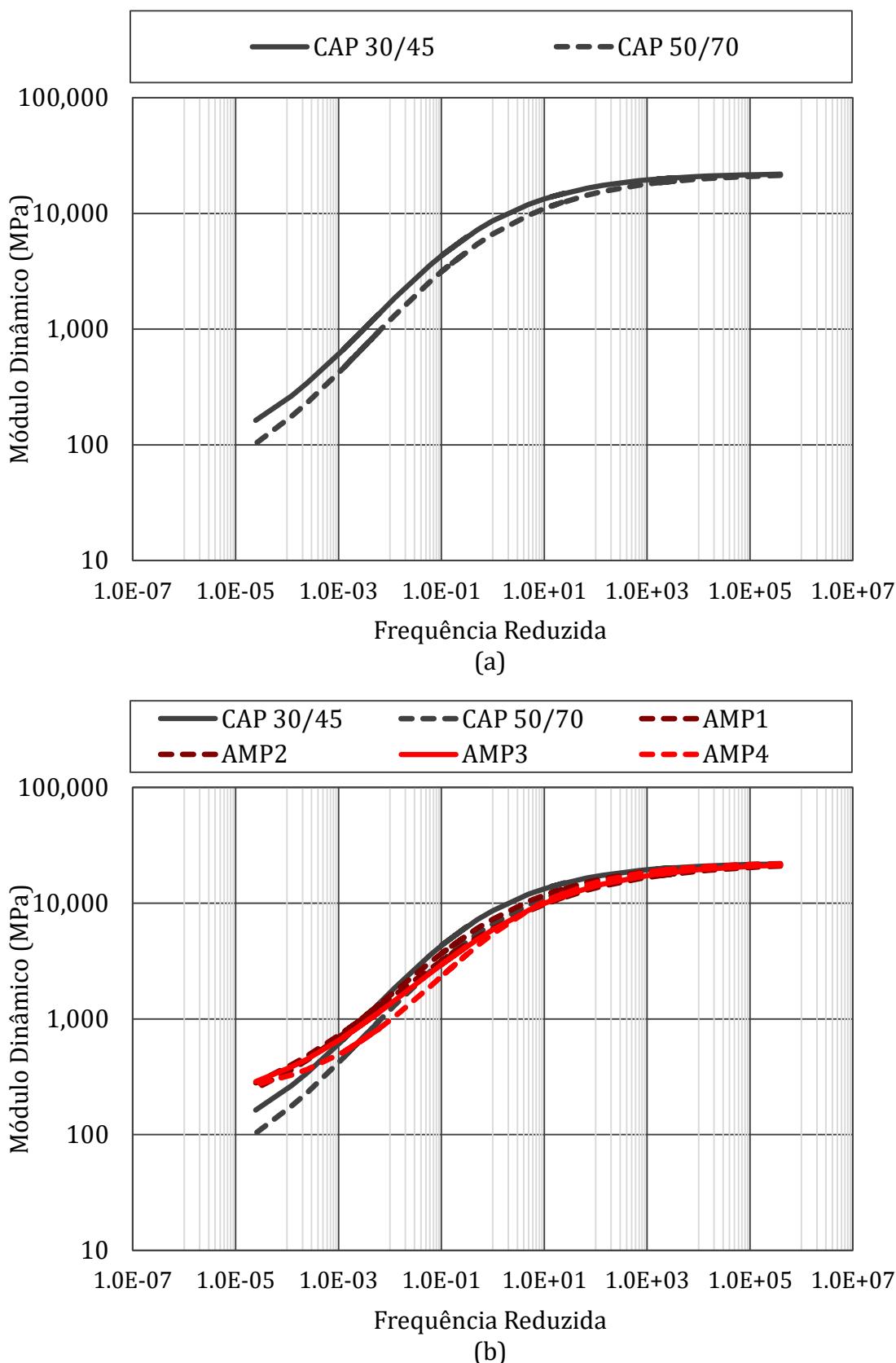


Figura 5.38: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos (RJ)

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

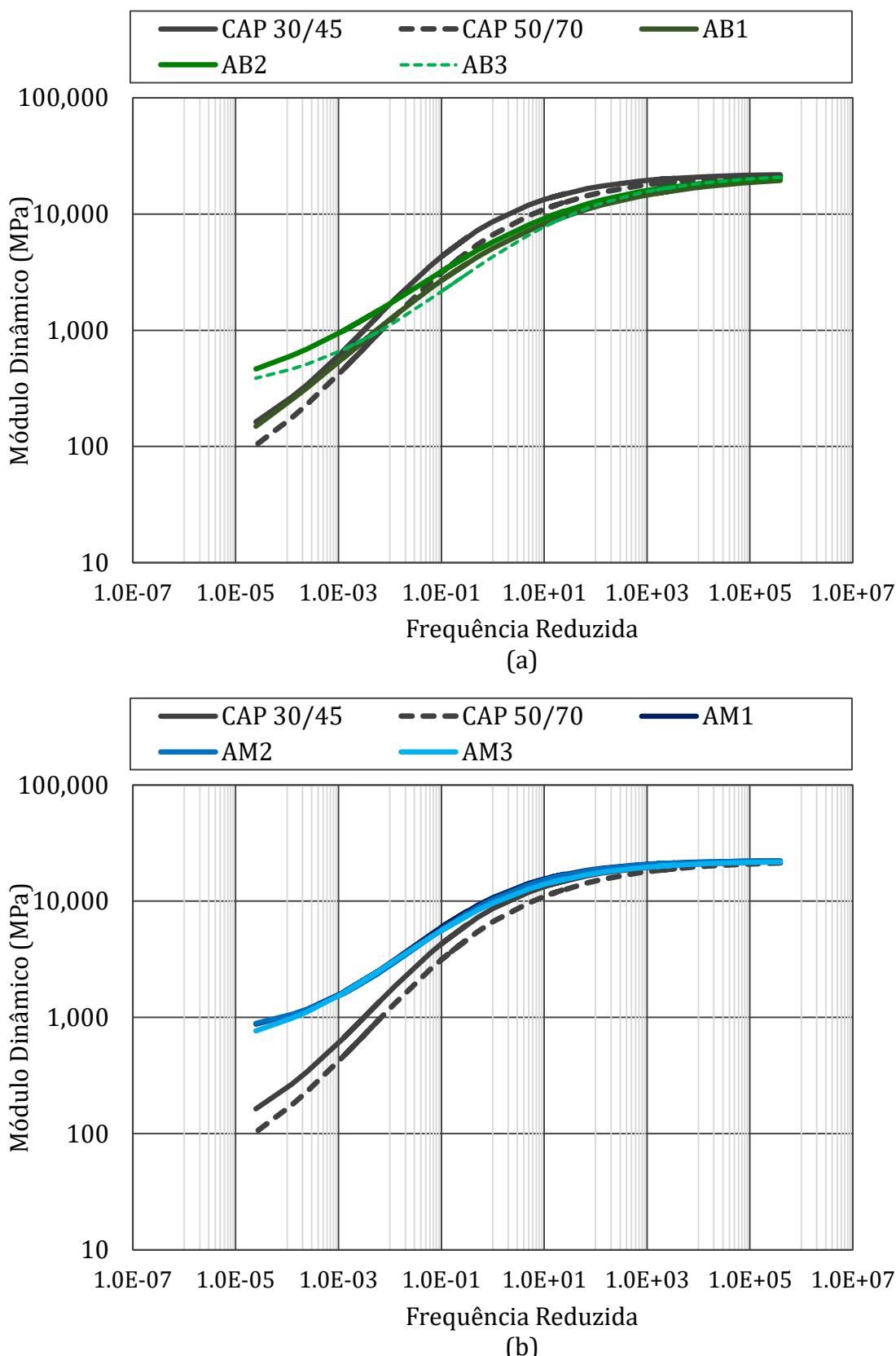


Figura 5.39: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos (RJ)

(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)											
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

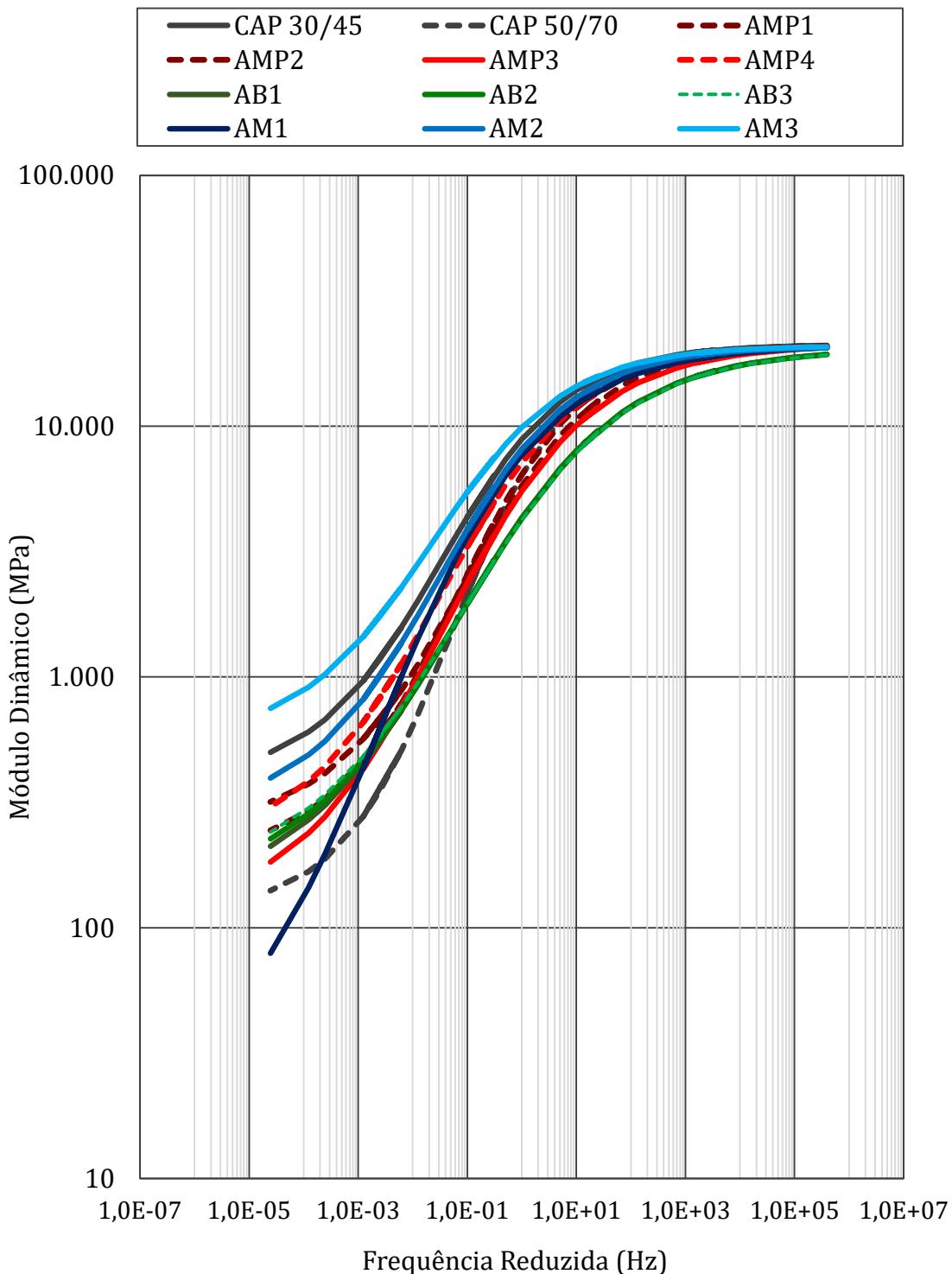


Figura 5.40: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo e os ligantes asfálticos estudados

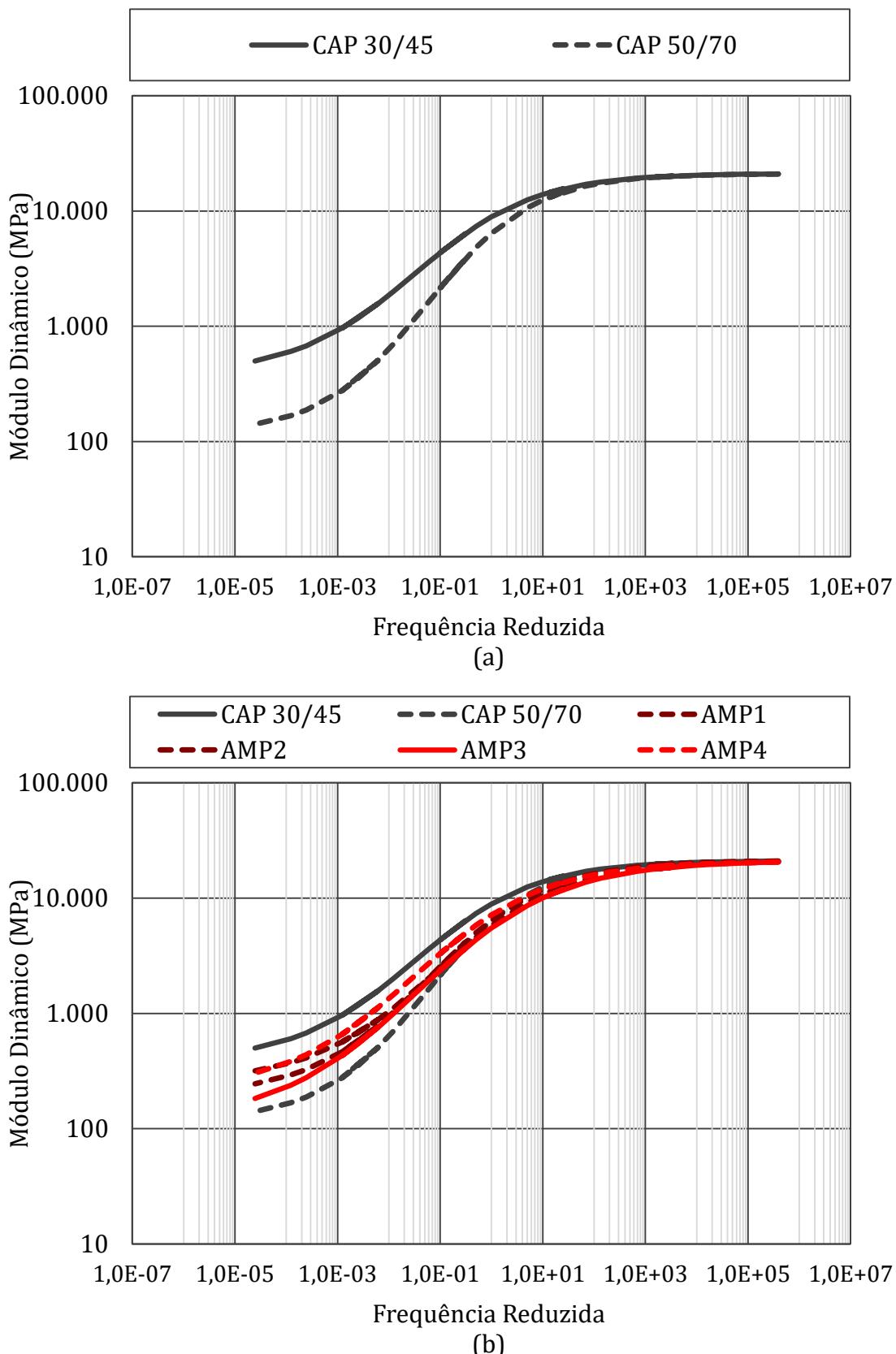


Figura 5.41: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados basálticos (SP)

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

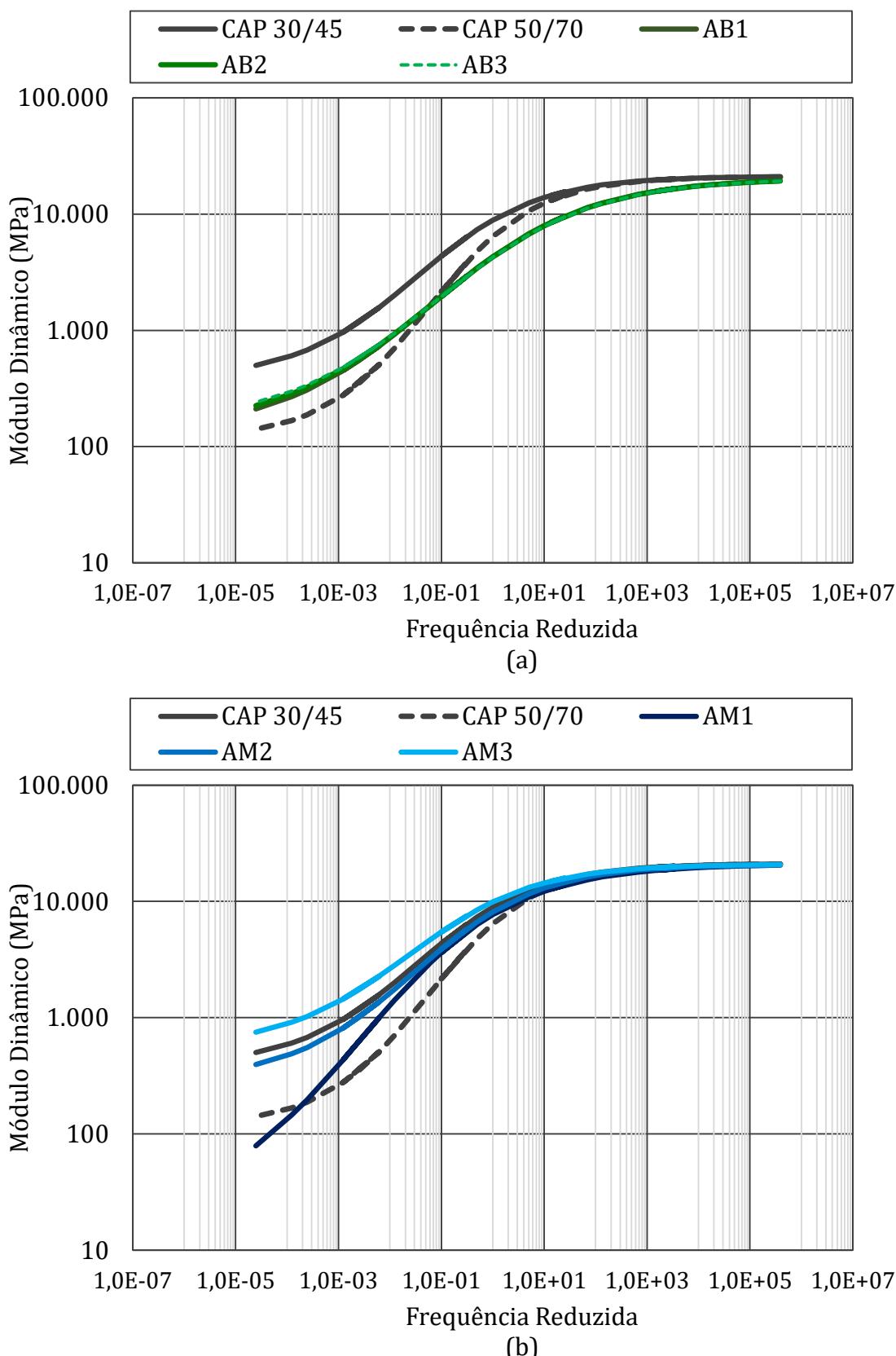


Figura 5.42: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados basálticos (SP)

(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)											
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

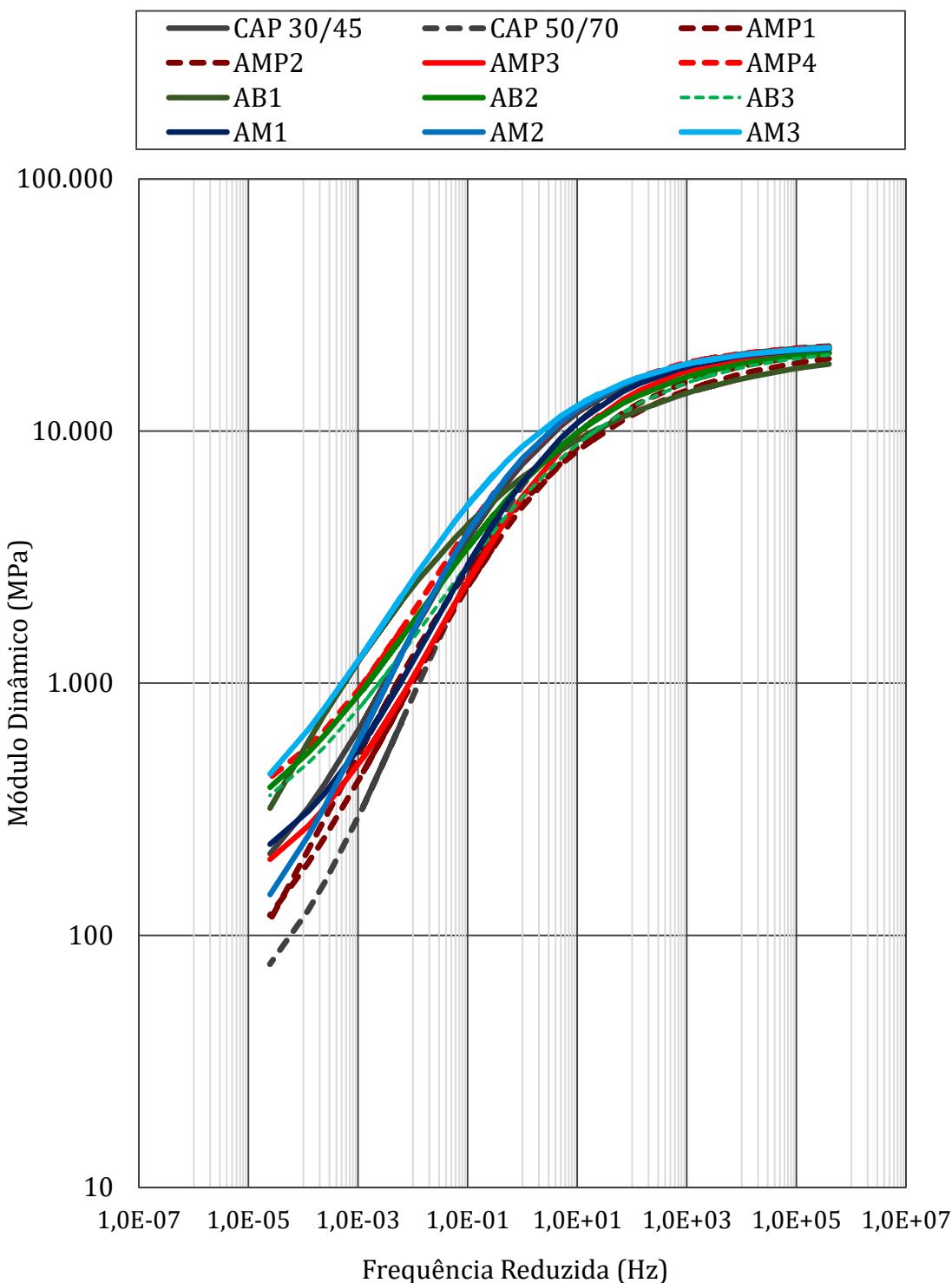


Figura 5.43: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo e os ligantes asfálticos estudados

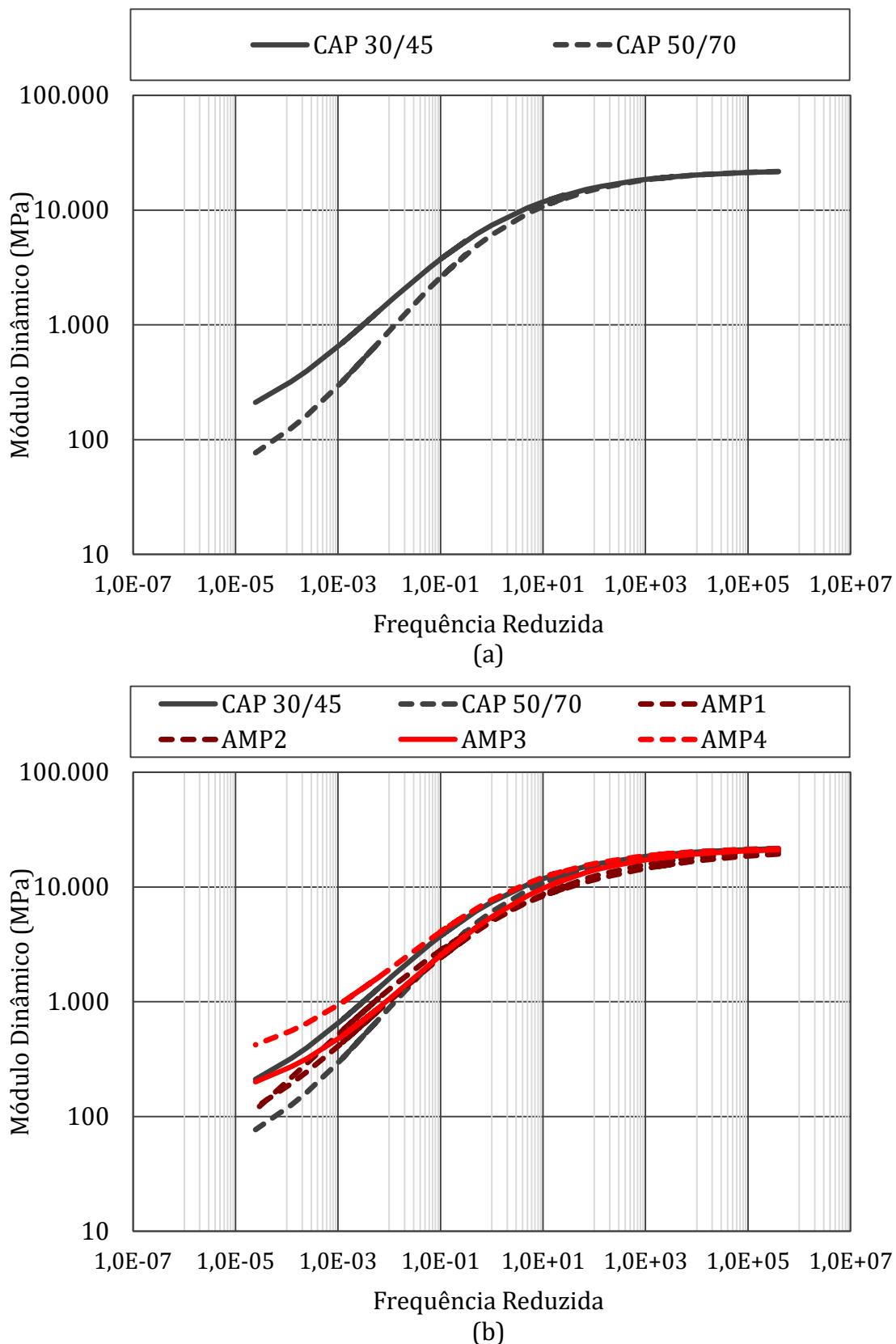


Figura 5.44: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos (SP)

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

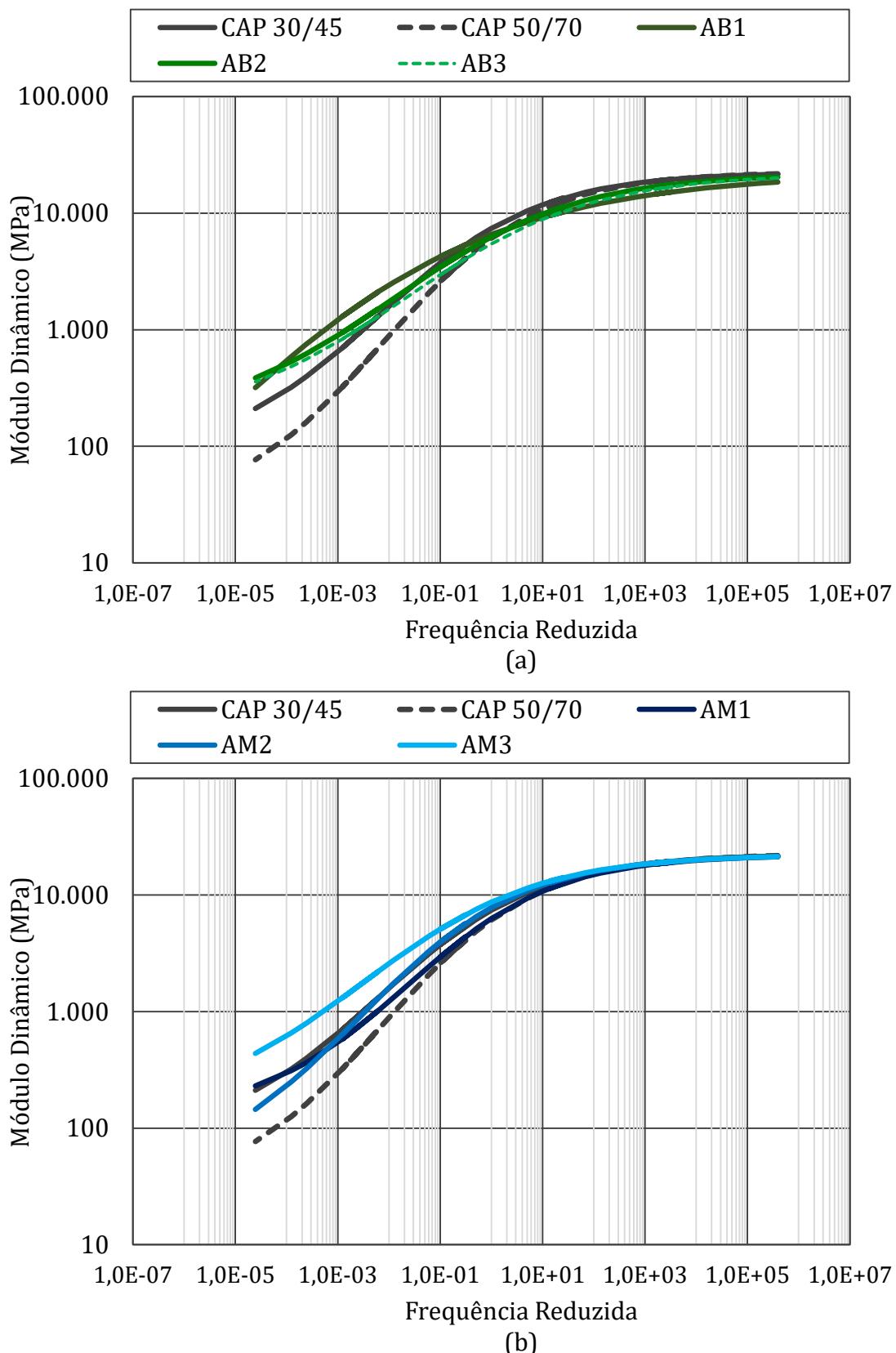


Figura 5.45: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos (SP)

(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)											
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

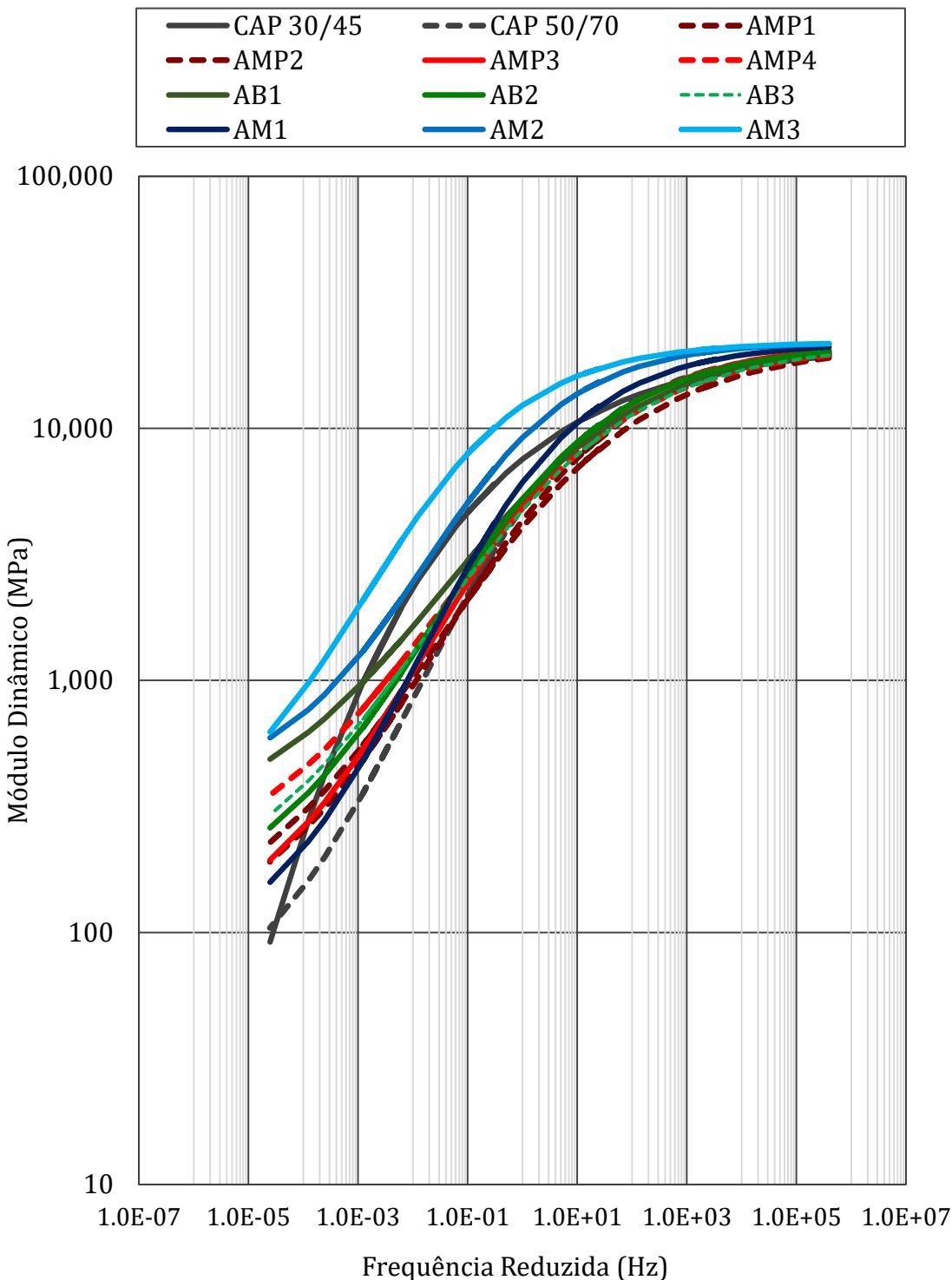


Figura 5.46: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro e os ligantes asfálticos estudados

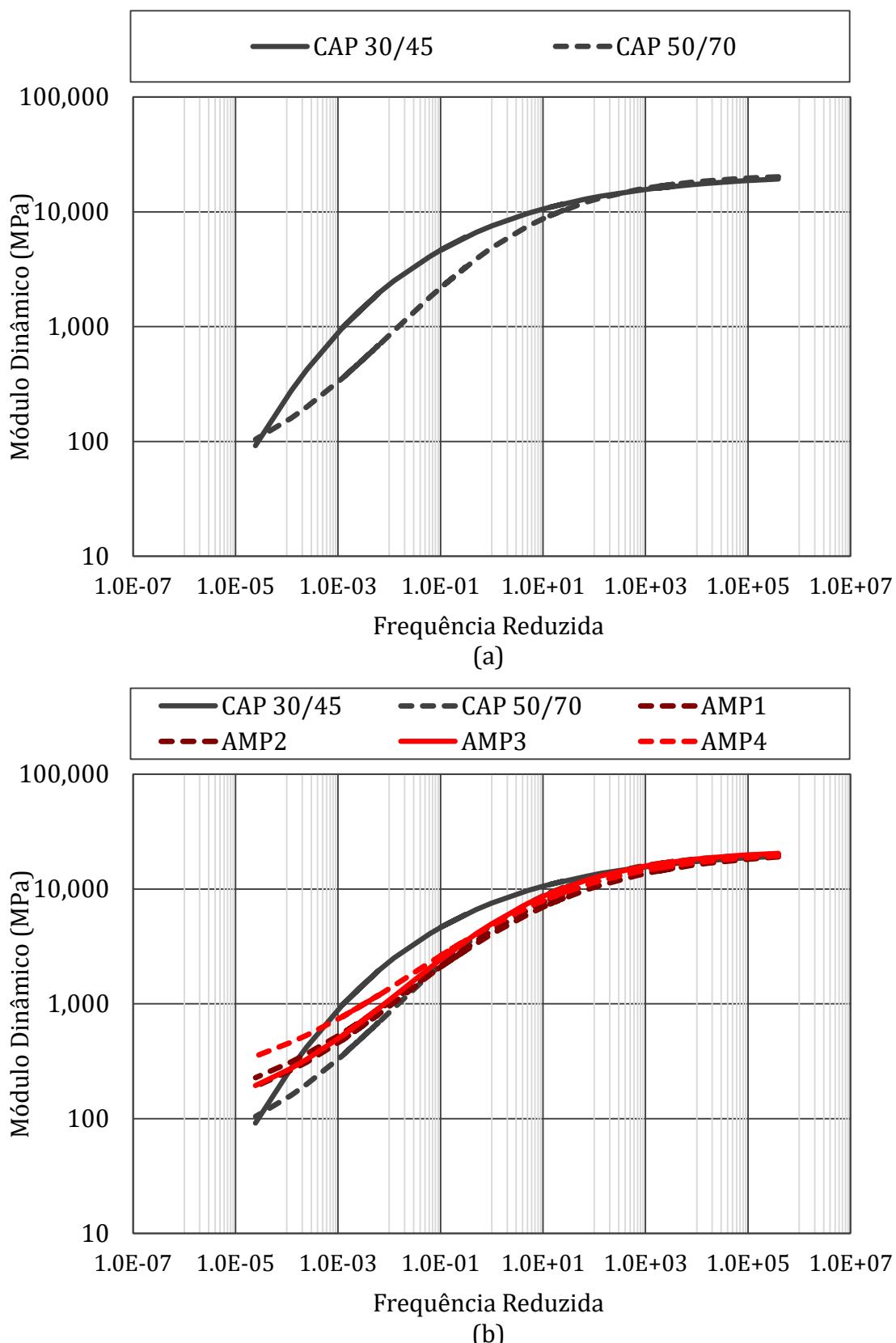


Figura 5.47: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos (RJ)

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

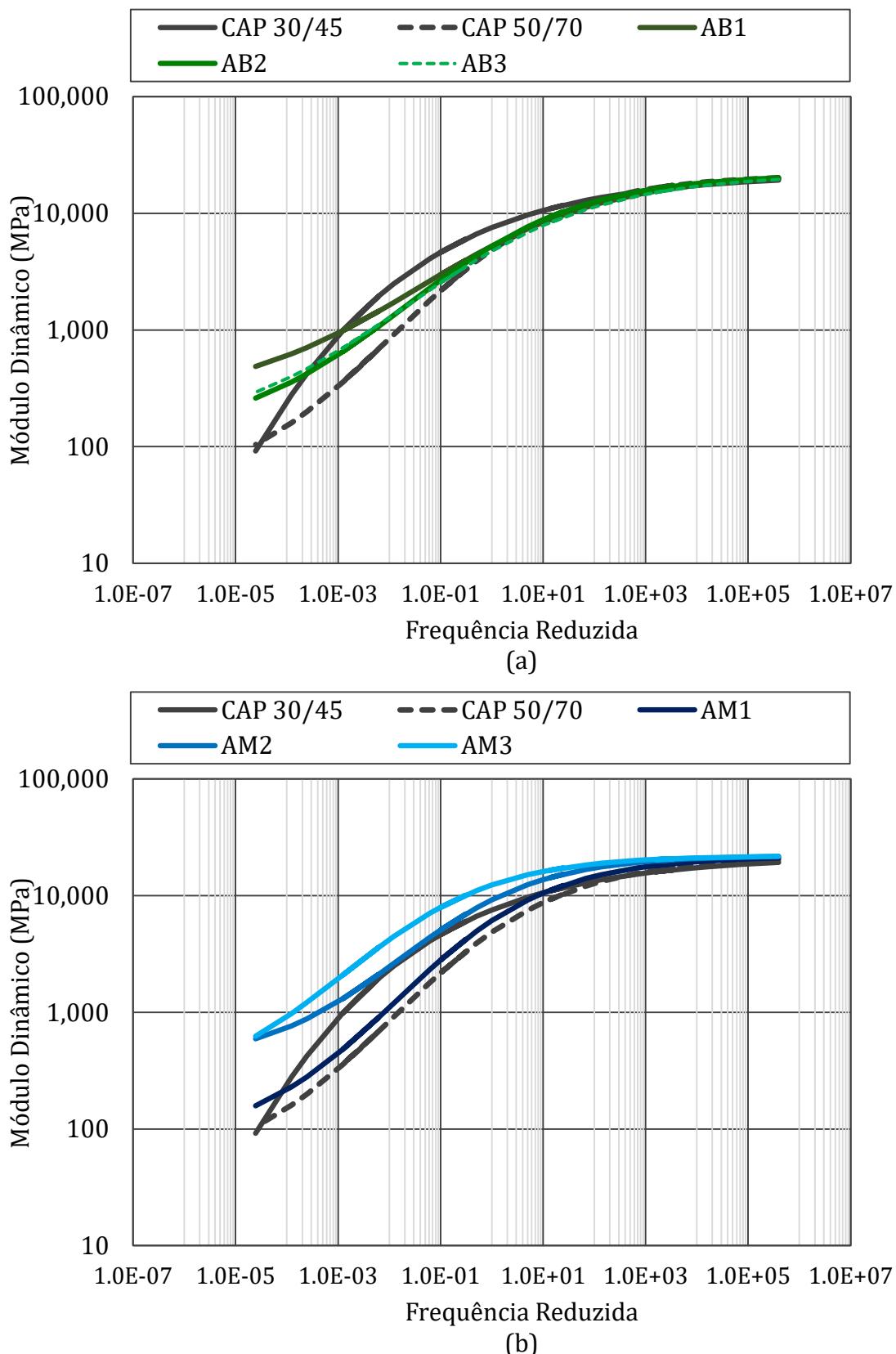


Figura 5.48: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos (RJ)

(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)											
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

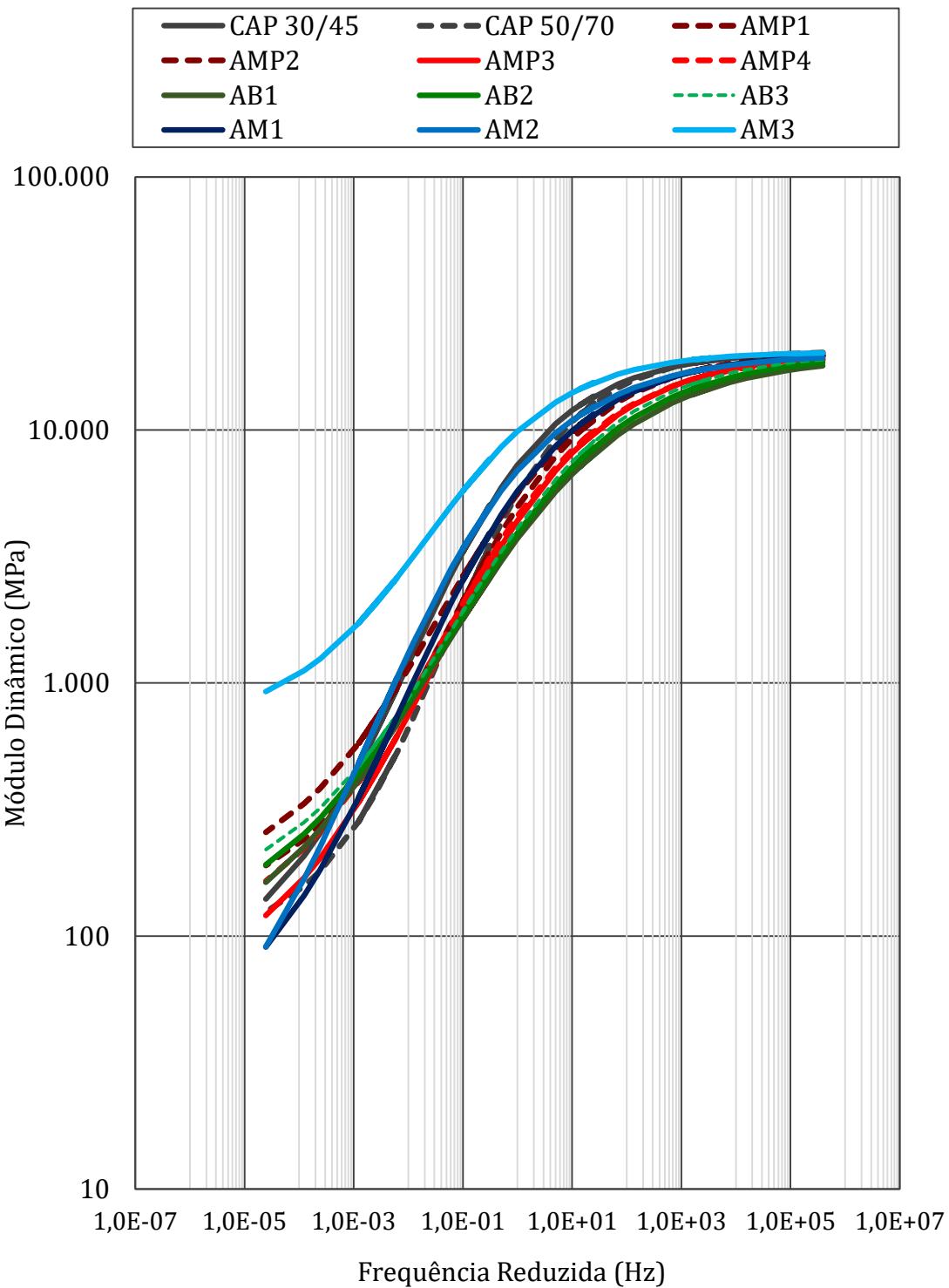


Figura 5.49: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo e os ligantes asfálticos estudados

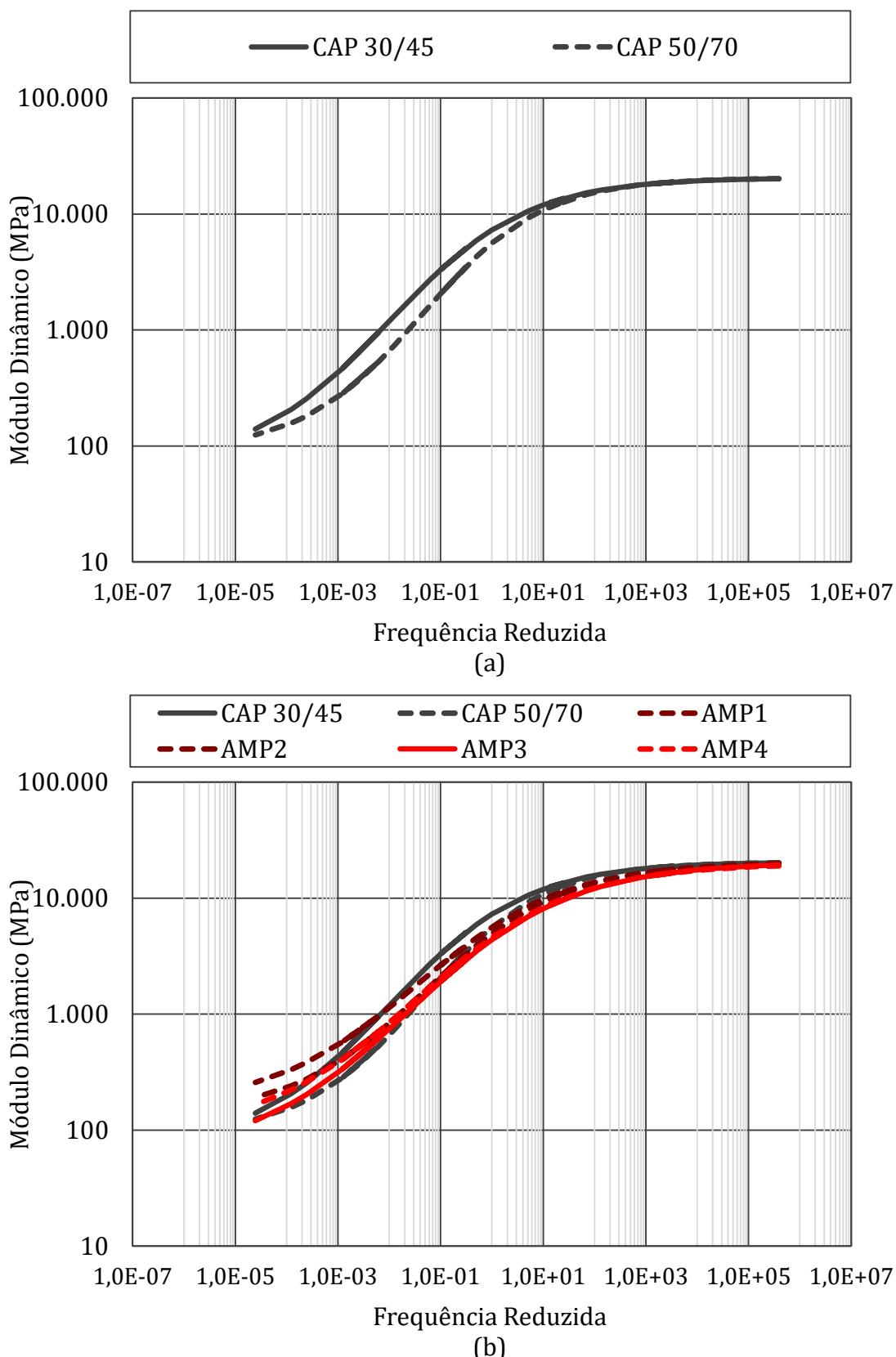


Figura 5.50: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados basálticos (SP)

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

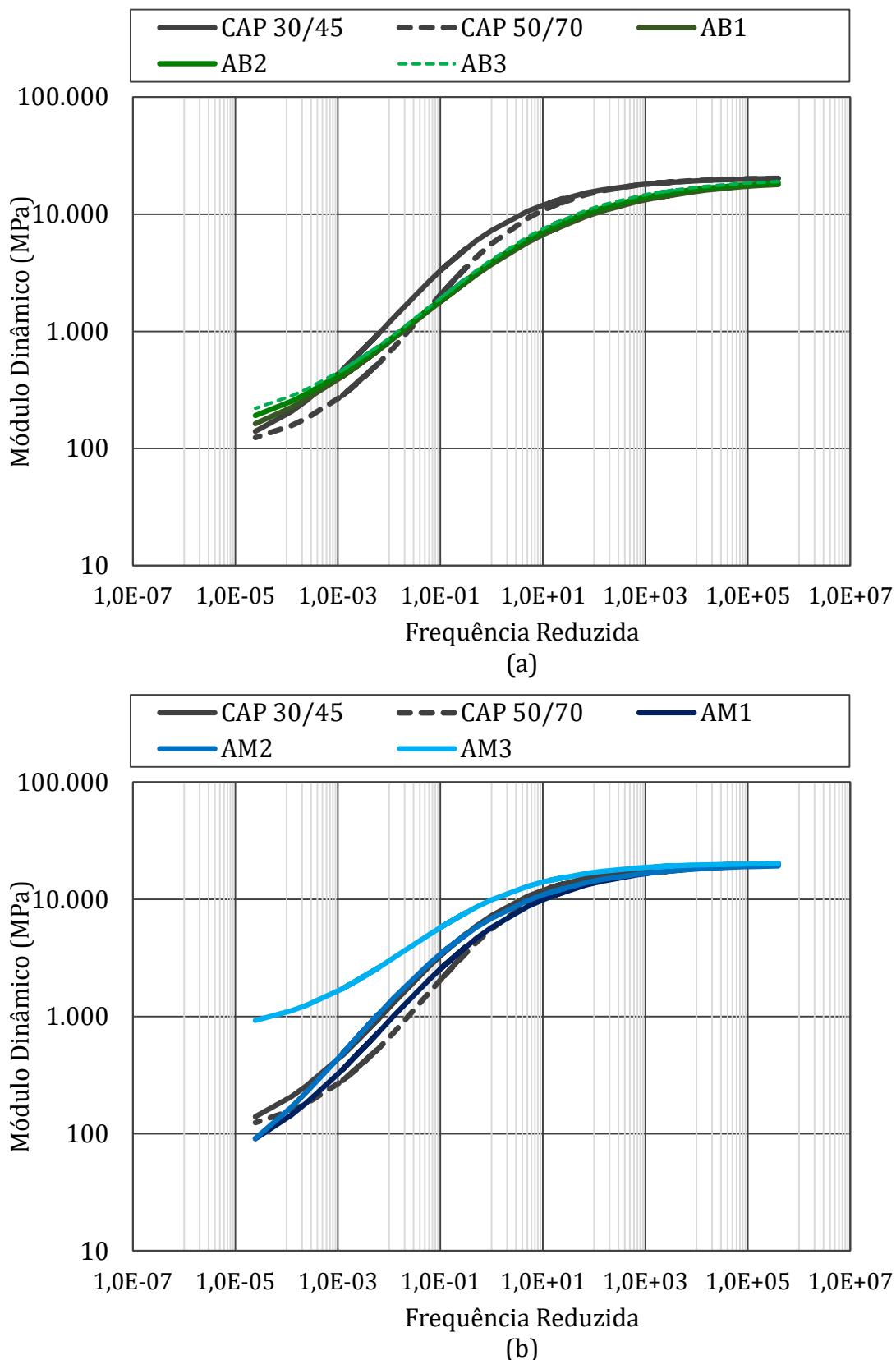


Figura 5.51: Curvas mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados basálticos (SP)

(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)											
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

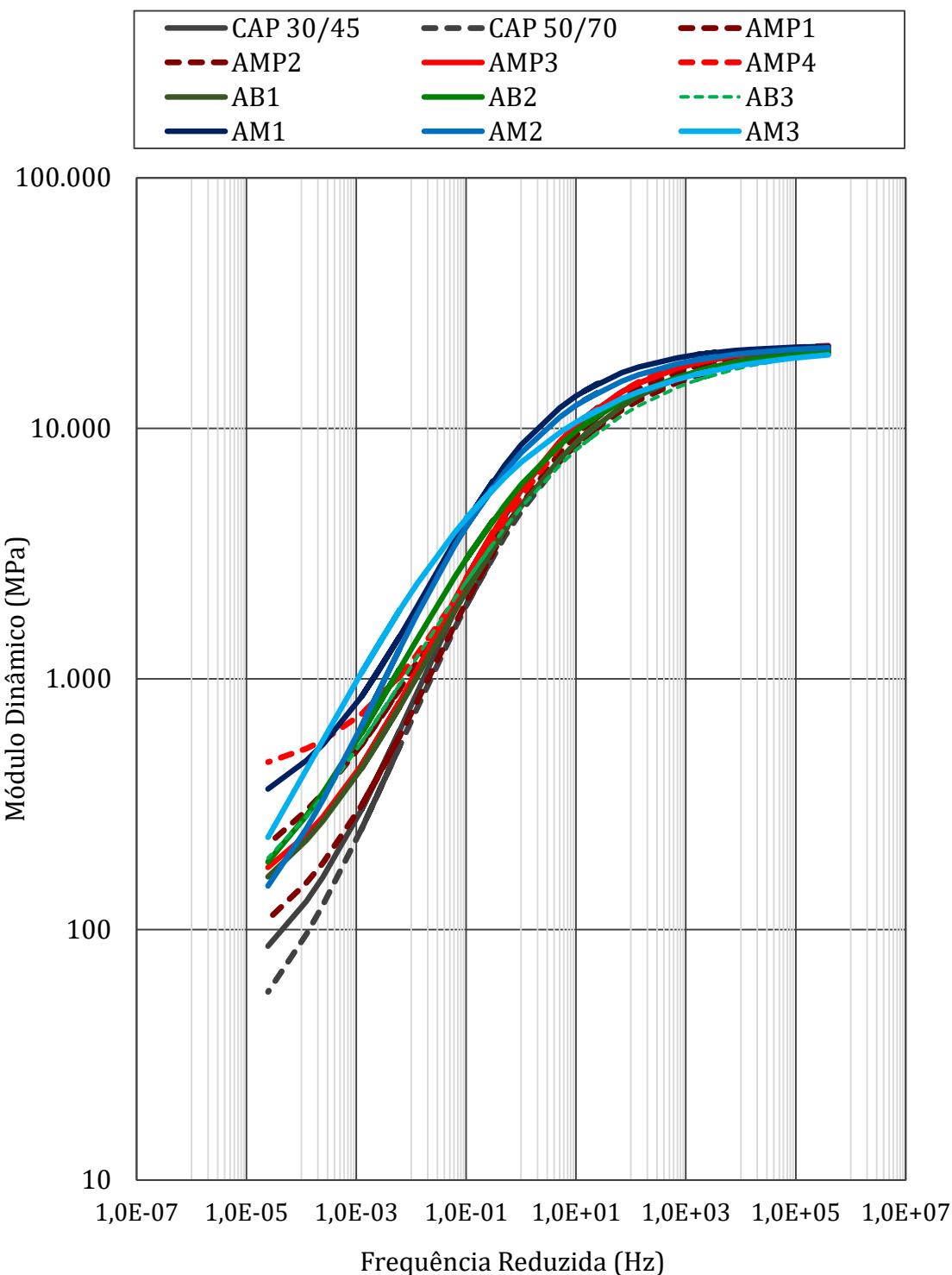


Figura 5.52: Curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado de São Paulo e os ligantes asfálticos estudados

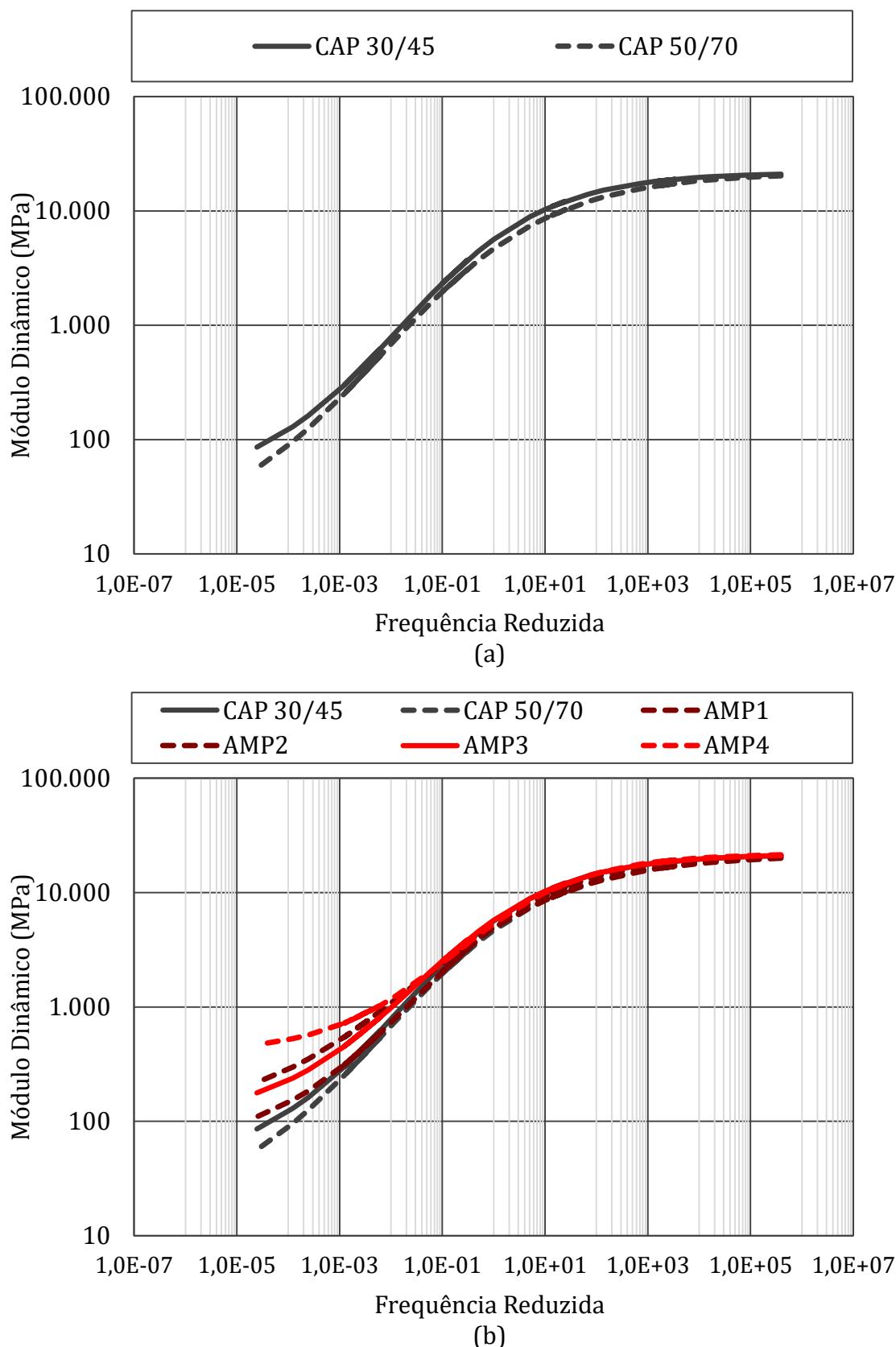


Figura 5.53: Curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos (SP)

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

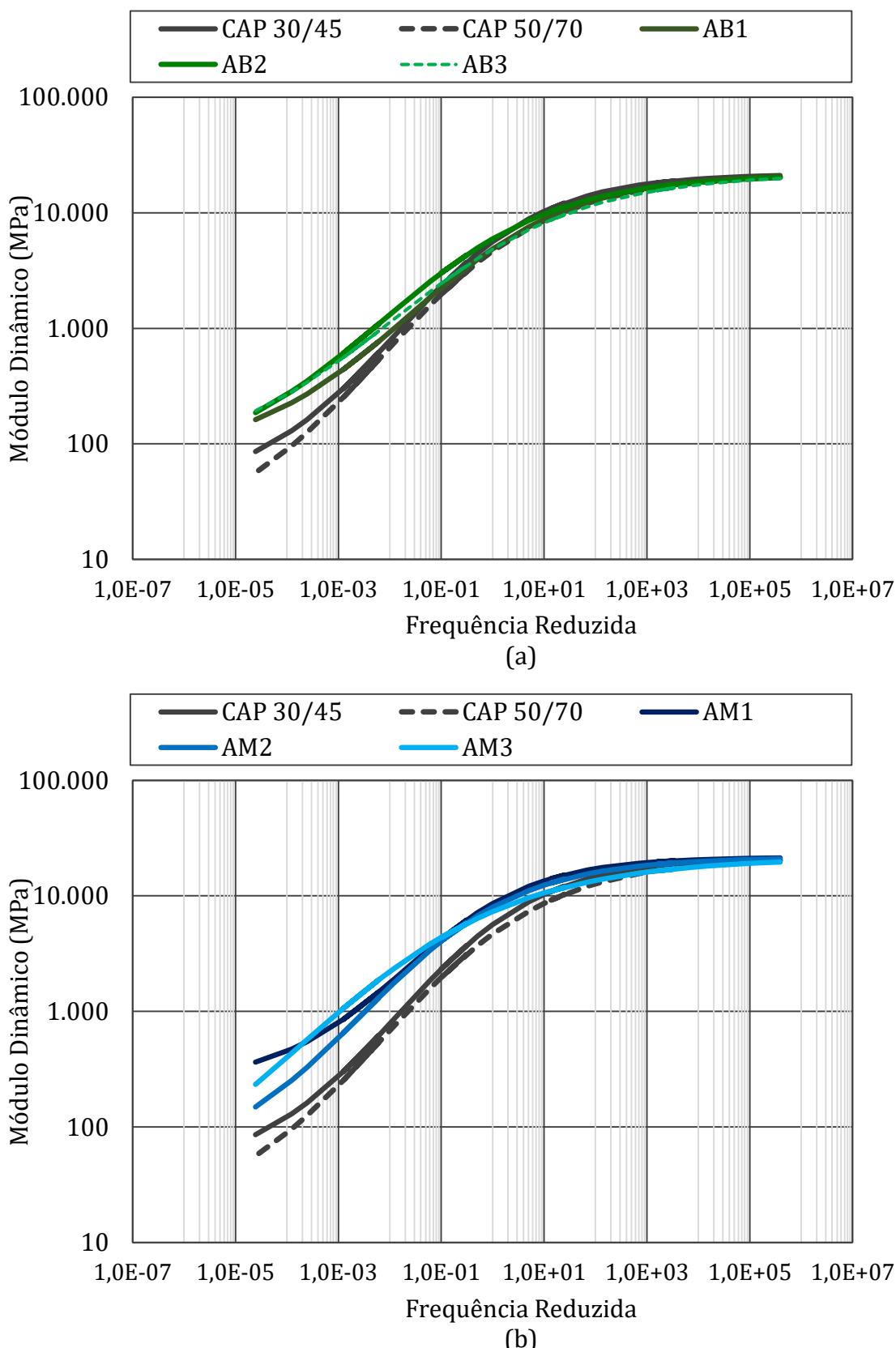


Figura 5.54: Curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos (SP)

(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)											
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

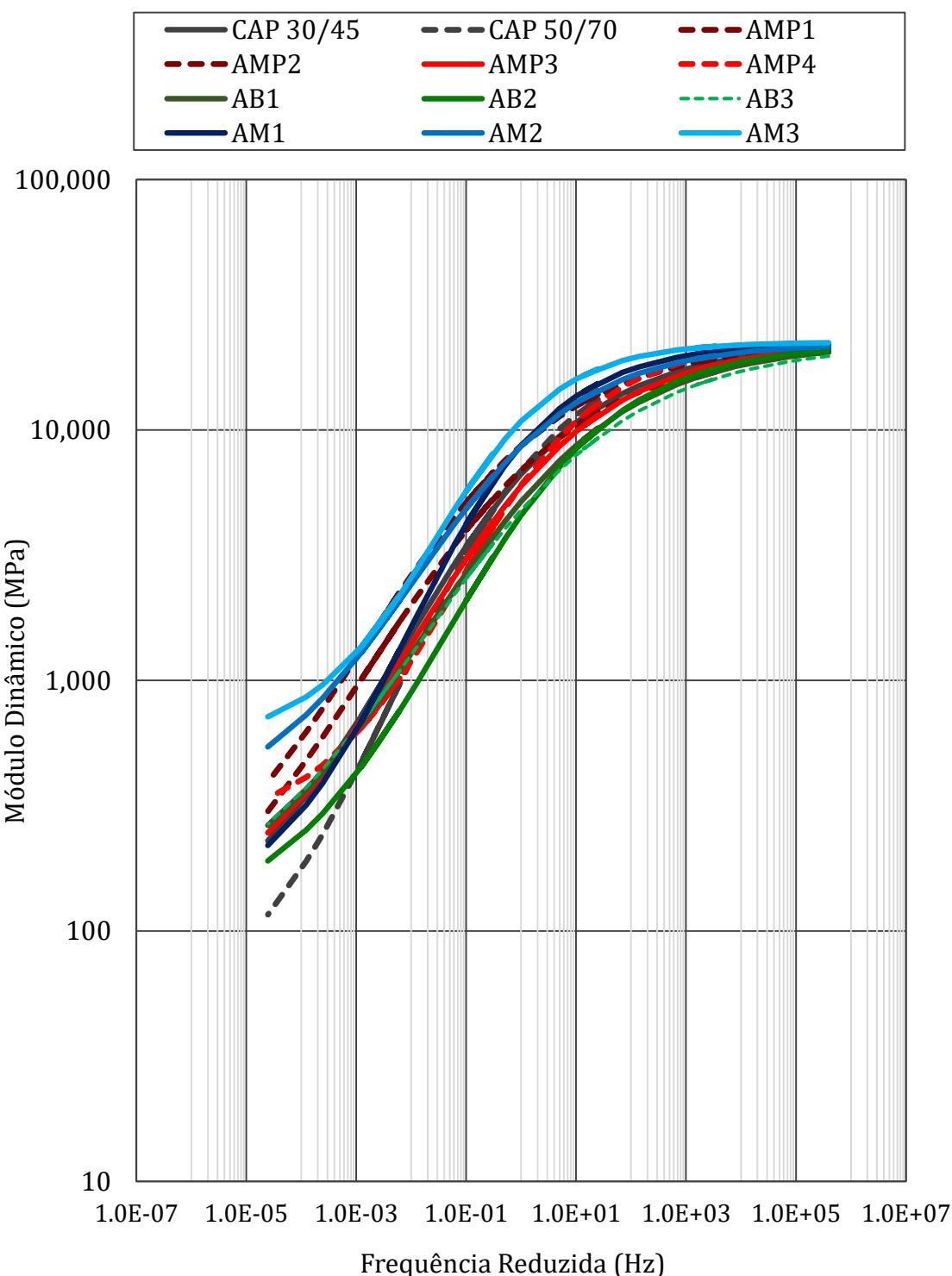


Figura 5.55: Curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Rio de Janeiro e os ligantes asfálticos estudados

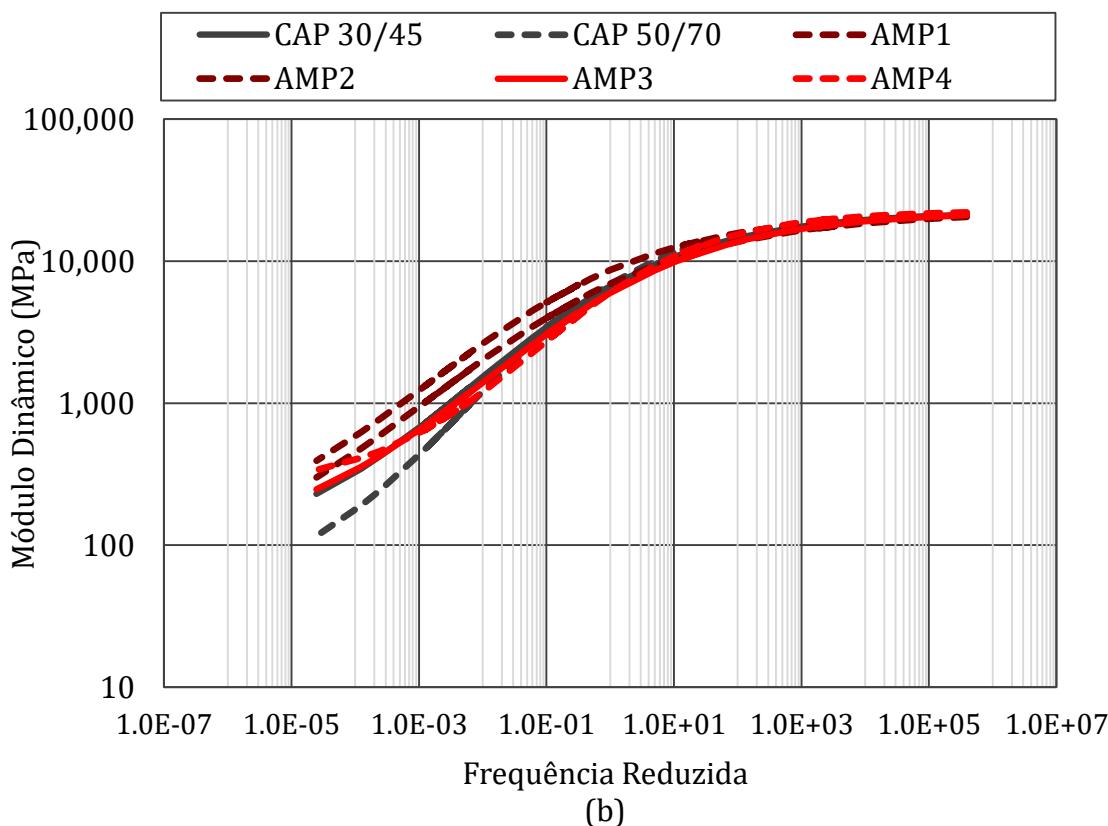
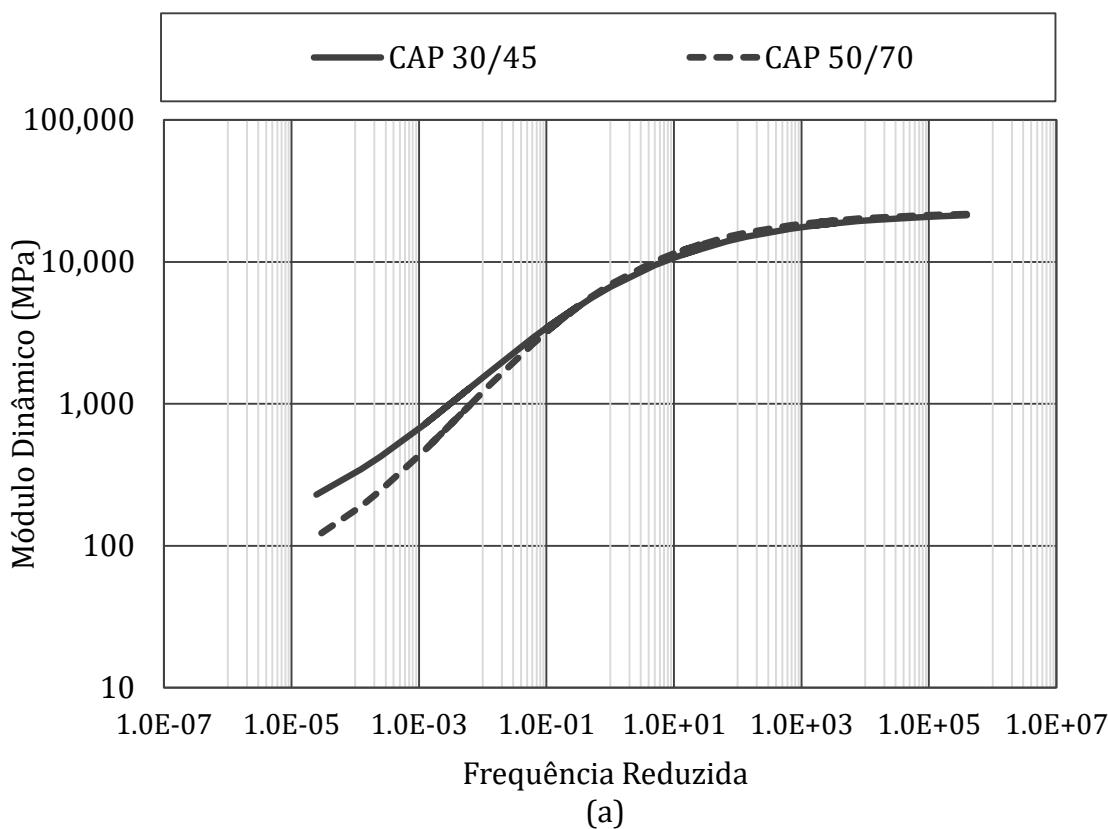


Figura 5.56: Curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos (RJ)

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

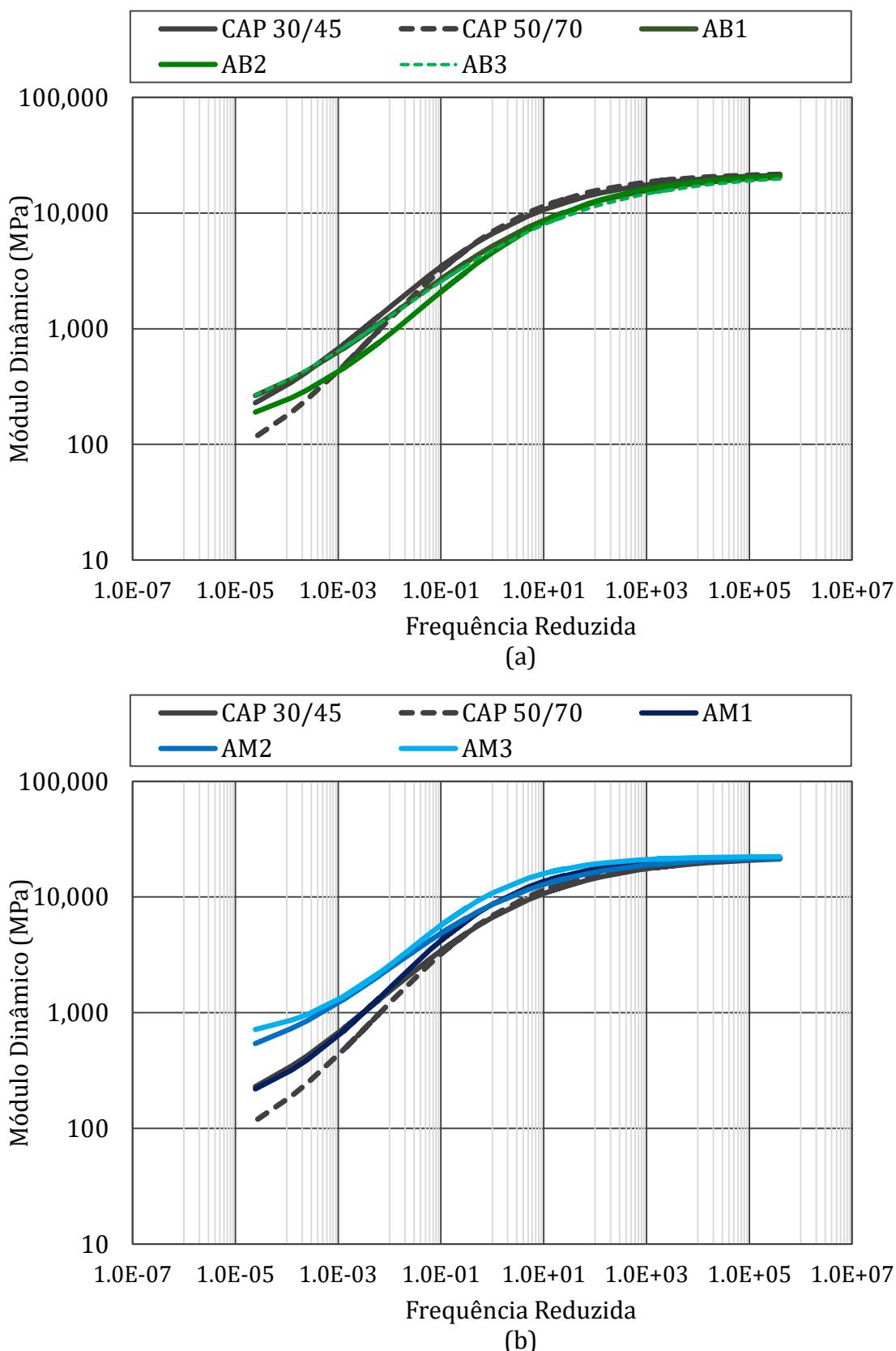


Figura 5.57: Curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos (RJ)  
 (a) Com ligante asfáltico modificado por borracha; (b) Com ligantes asfálticos de alto módulo

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)											
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

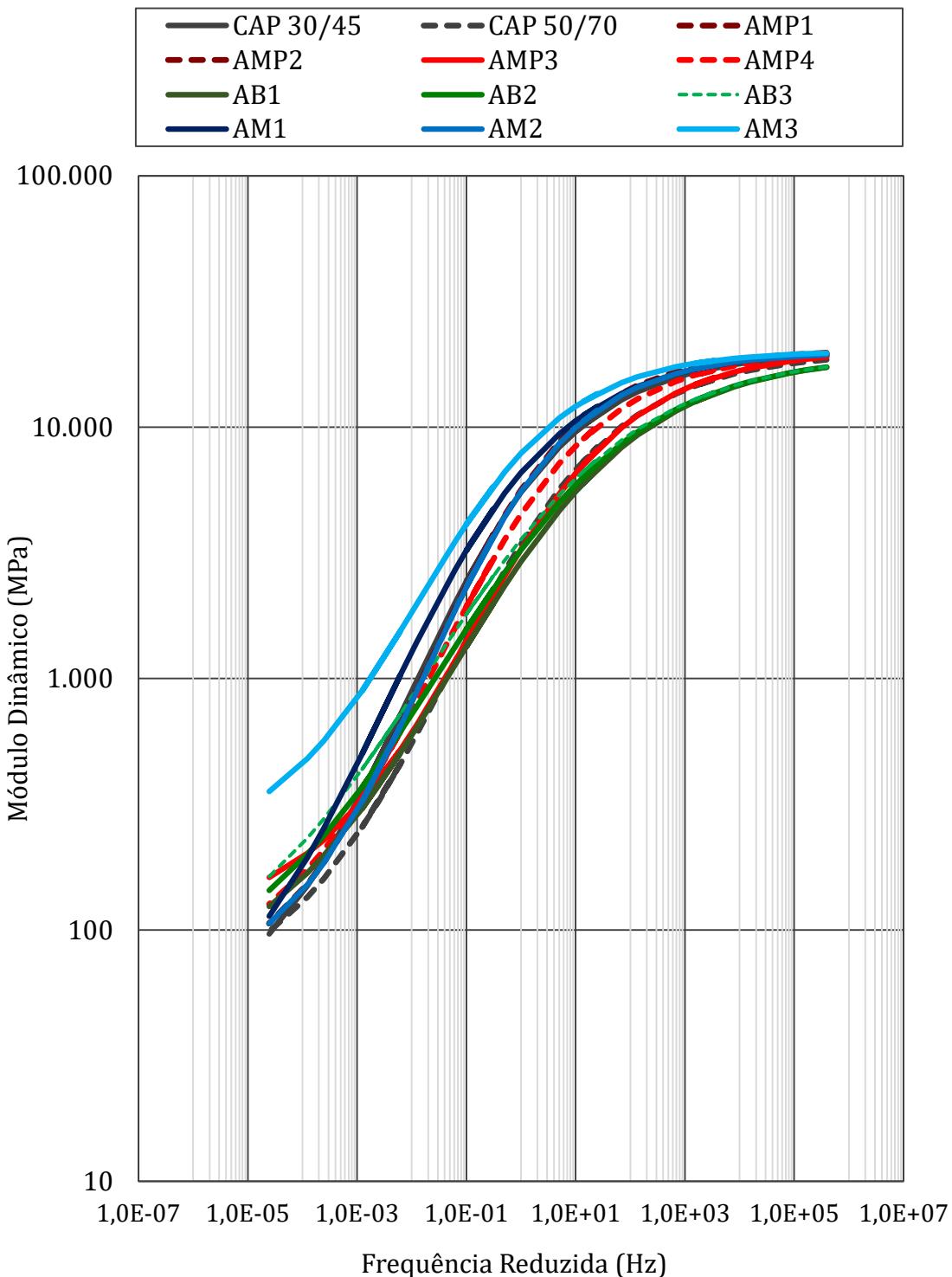


Figura 5.58: Curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos do Estado de São Paulo e os ligantes asfálticos estudados

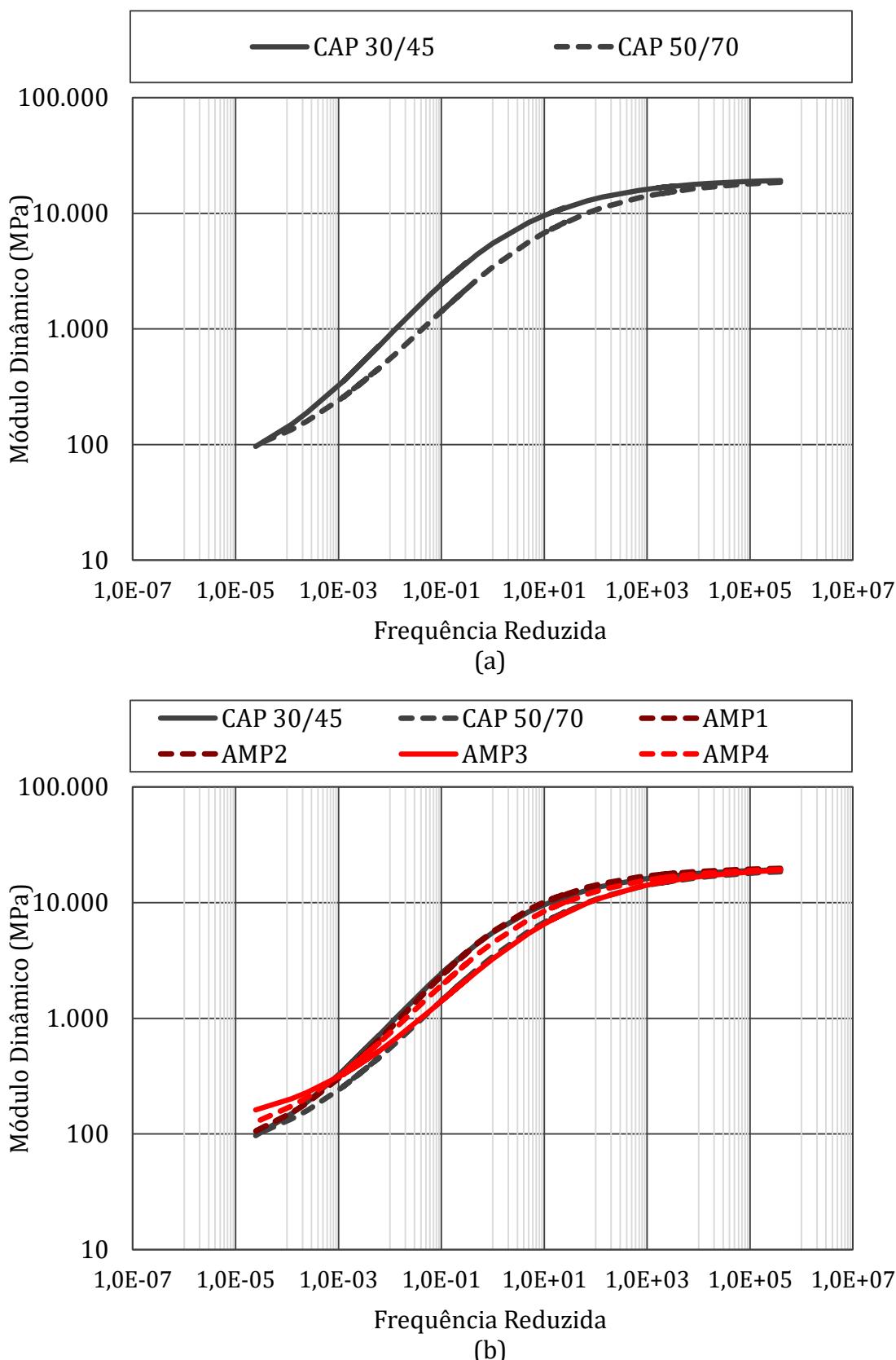


Figura 5.59: Curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos (SP)

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

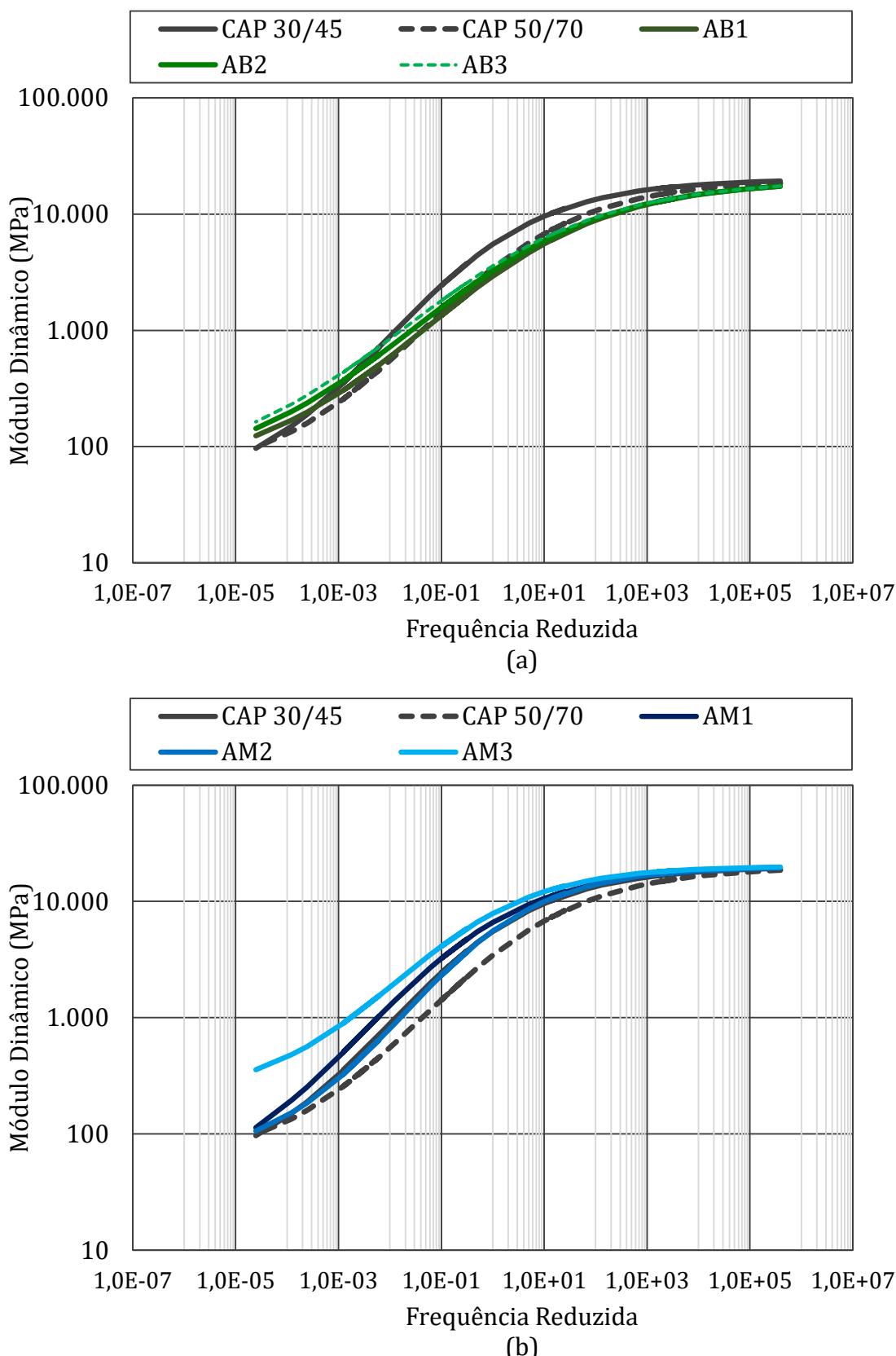


Figura 5.60: Curvas mestre das misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos (SP)

(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 Asfáltica	Faixa Granulométrica	Ligante Asfáltico	Ponto de Fluência (Ciclos)		Ciclos até obter 5% de deformação	
			Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio 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

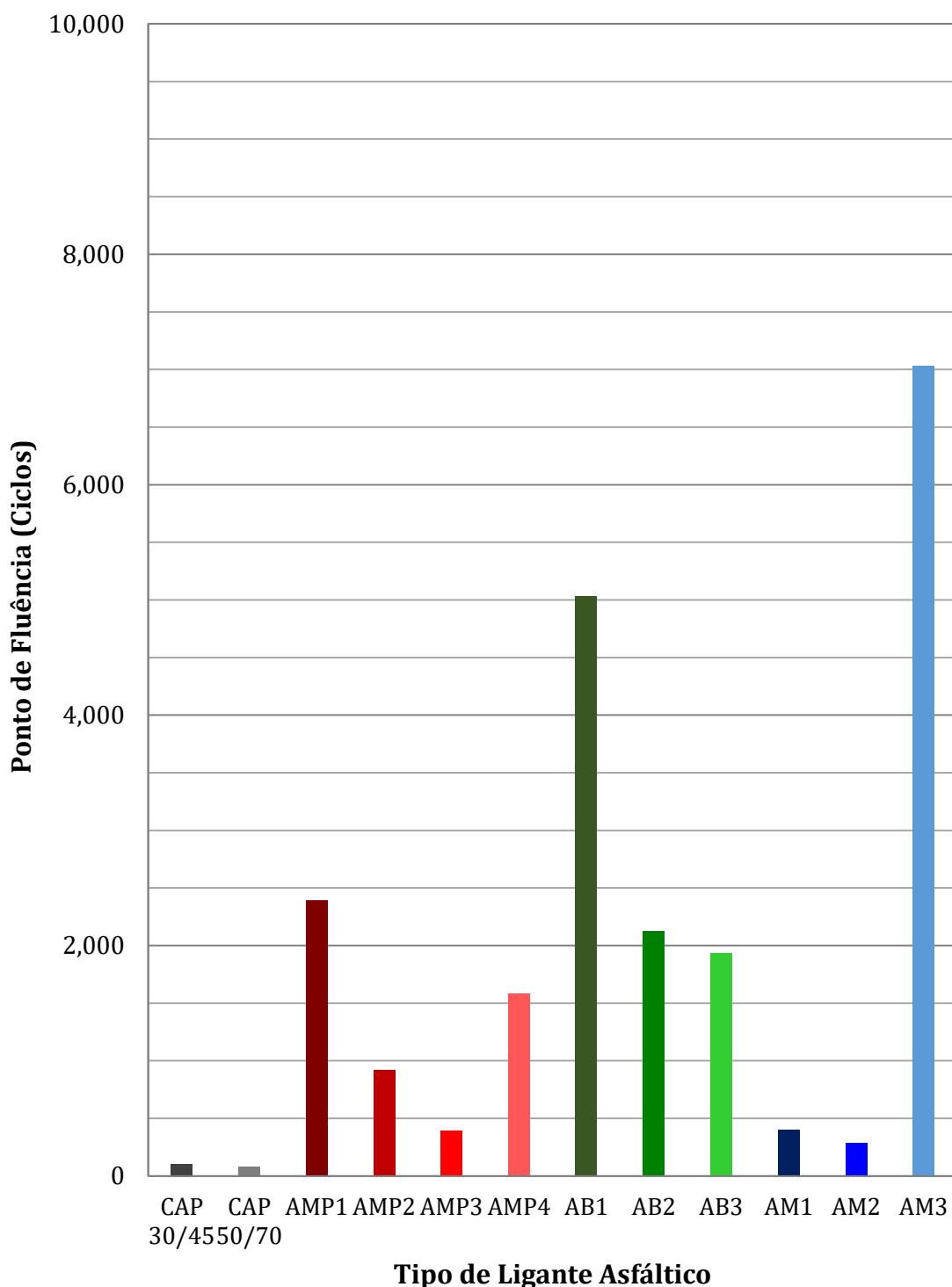


Figura 5.61: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado de São Paulo

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 Asfáltica	Faixa Granulométrica	Ligante Asfáltico	Ponto de Fluência (Ciclos)		Ciclos até obter 5% de deformação	
			Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio 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

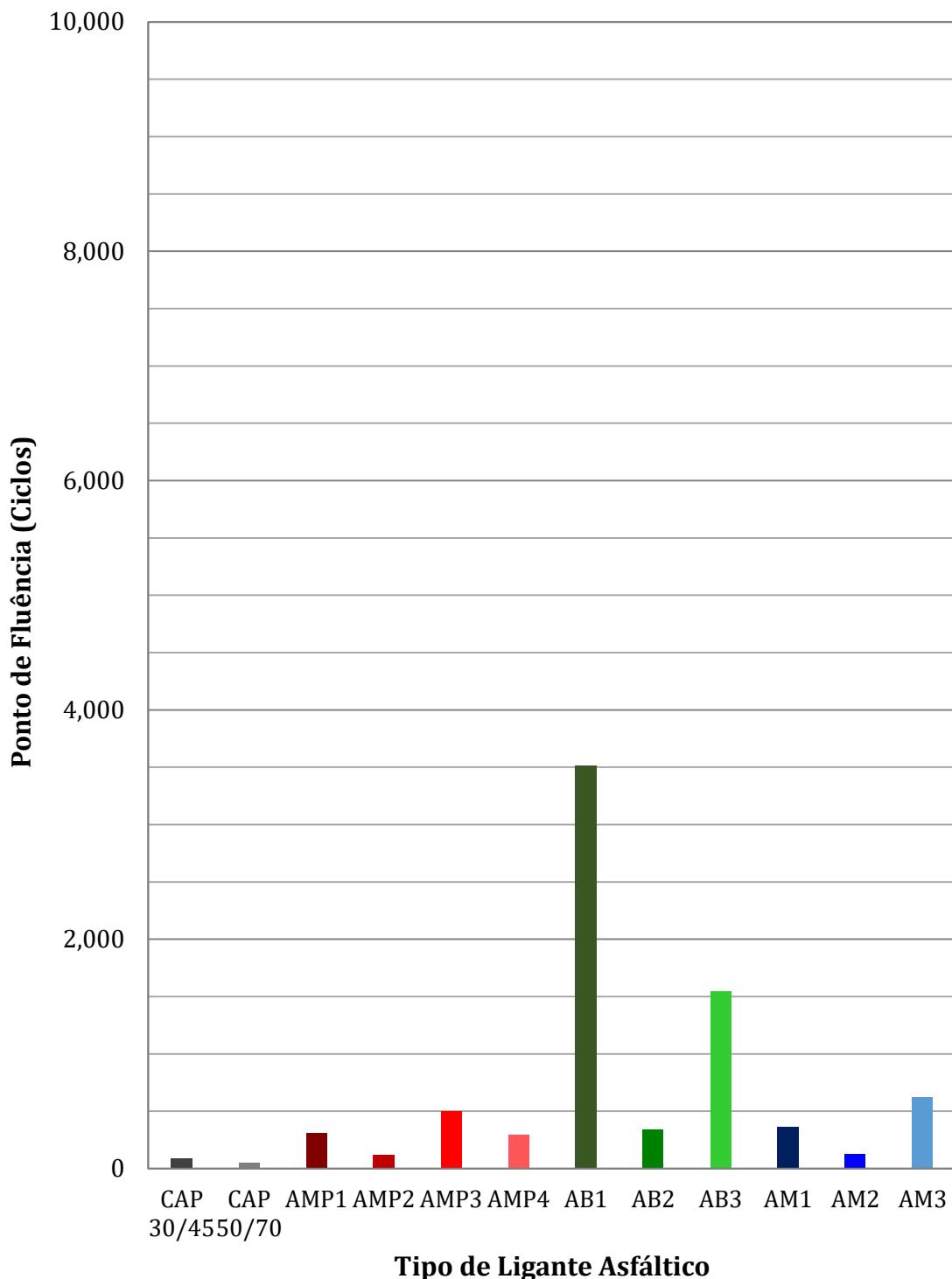


Figura 5.62: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

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

Mistura Asfáltica	Faixa Granulométrica	Ligante Asfáltico	Ponto de Fluência (Ciclos)		Ciclos até obter 5% de deformação	
			Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio 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

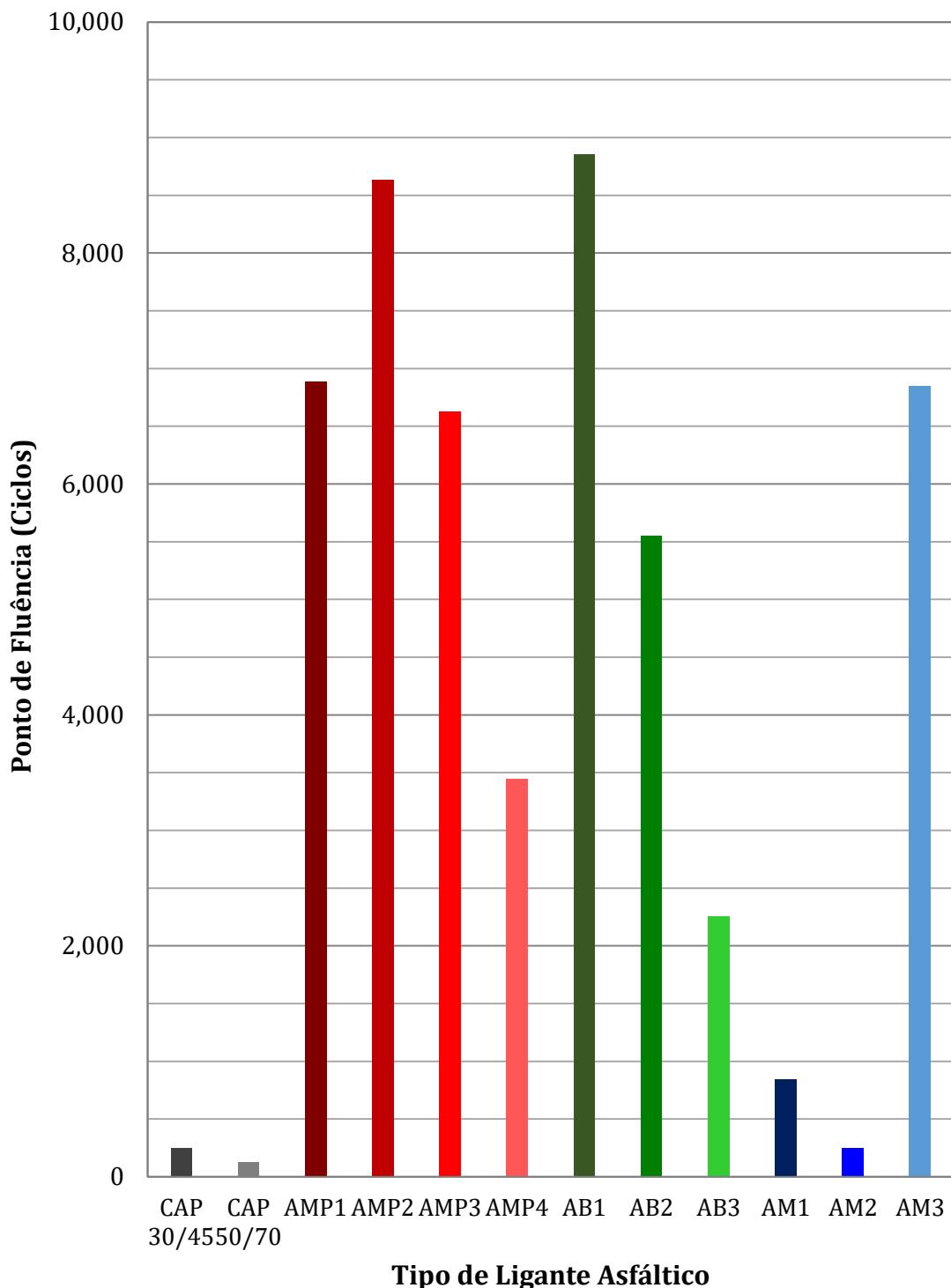


Figura 5.63: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas Faixa III-DERSA com agregados basálticos do Estado de São Paulo

### 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

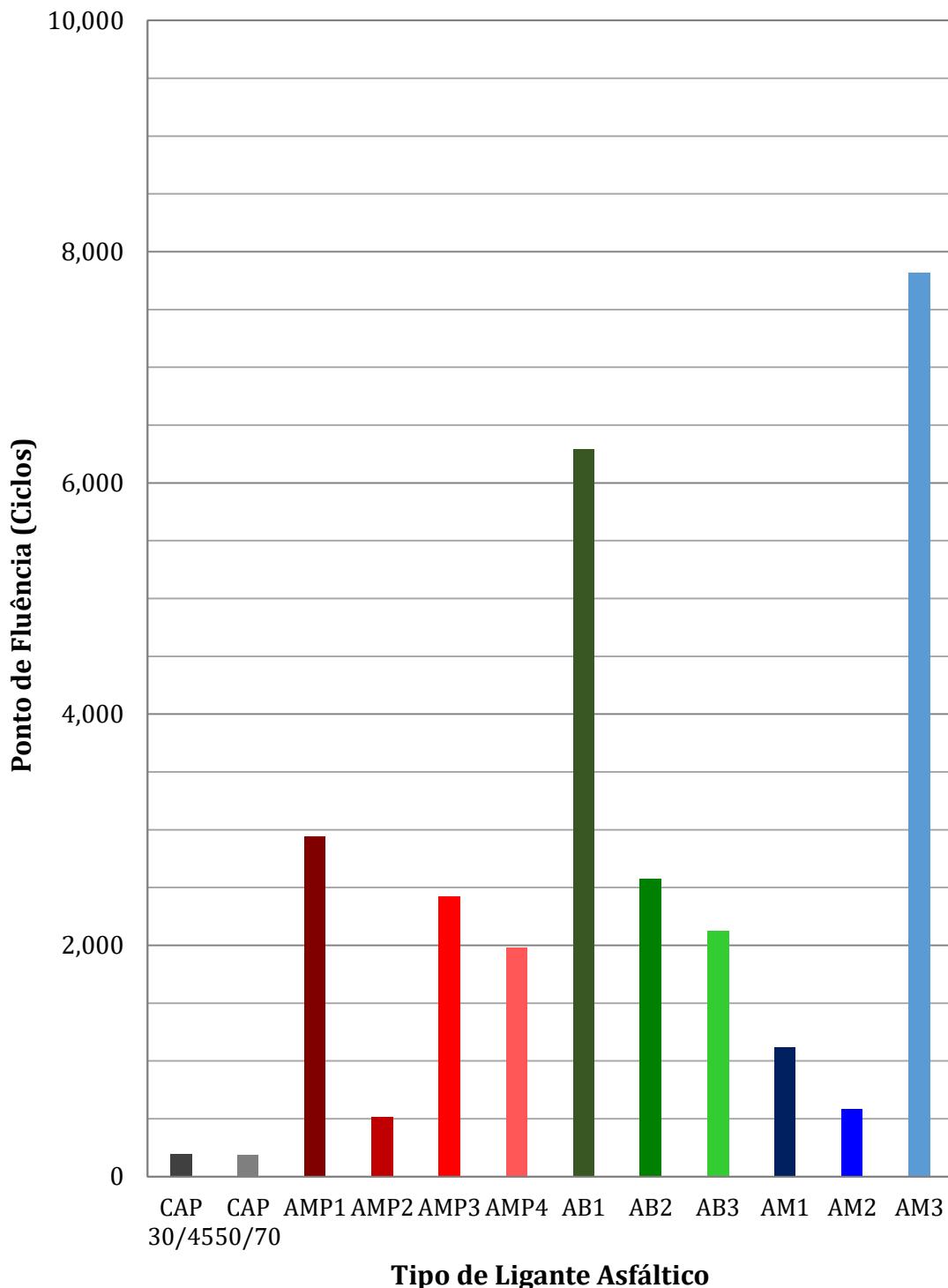


Figura 5.64: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo

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 Asfáltica	Faixa Granulométrica	Ligante Asfáltico	Ponto de Fluência (Ciclos)		Ciclos até obter 5% de deformação	
			Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio 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

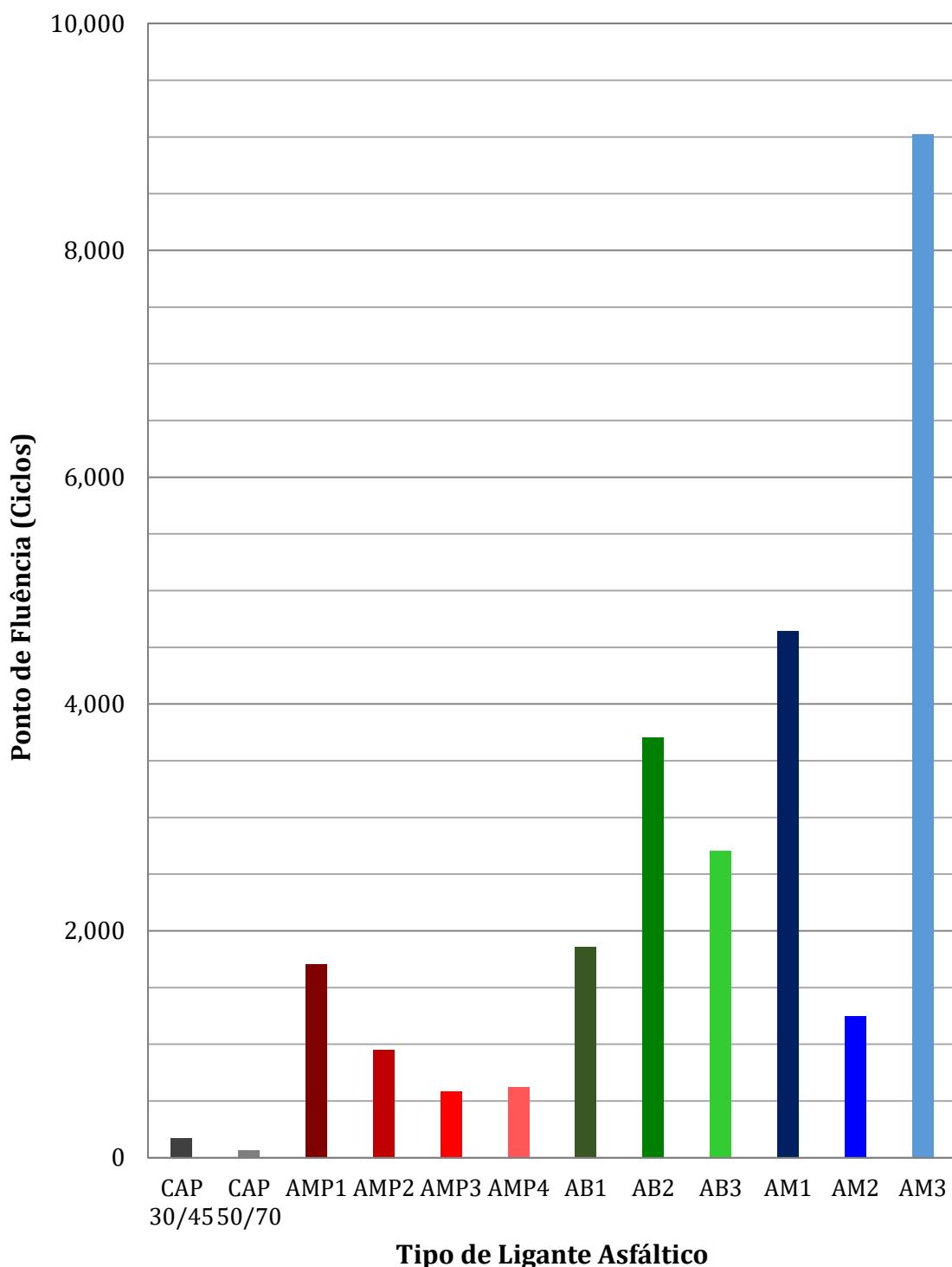


Figura 5.65: Resultados do número de ciclos até fluênciça nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

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

Mistura Asfáltica	Faixa Granulométrica	Ligante Asfáltico	Ponto de Fluência (Ciclos)		Ciclos até obter 5% de deformação	
			Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio 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

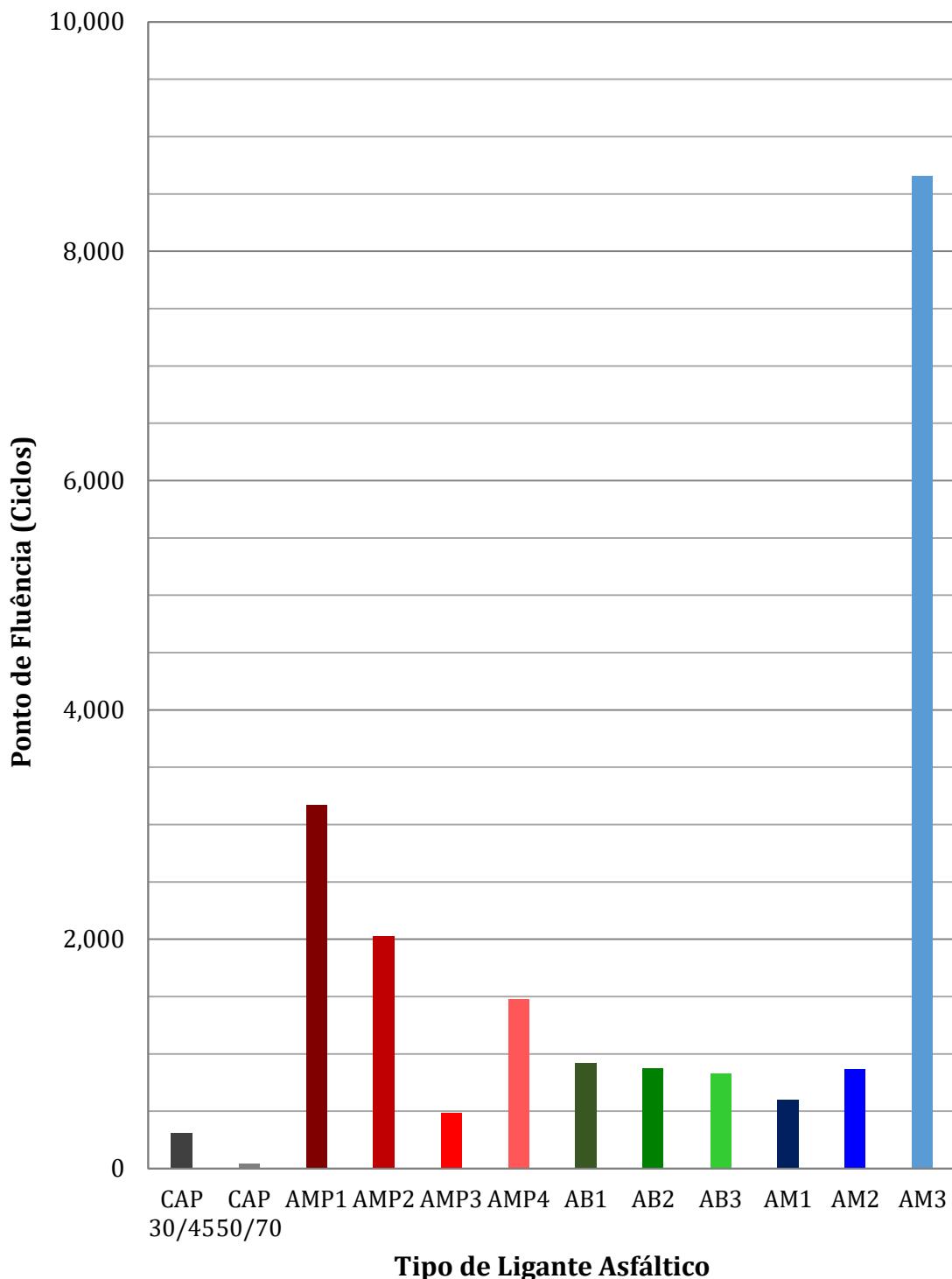


Figura 5.66: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas EGL 19,0mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo

### 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

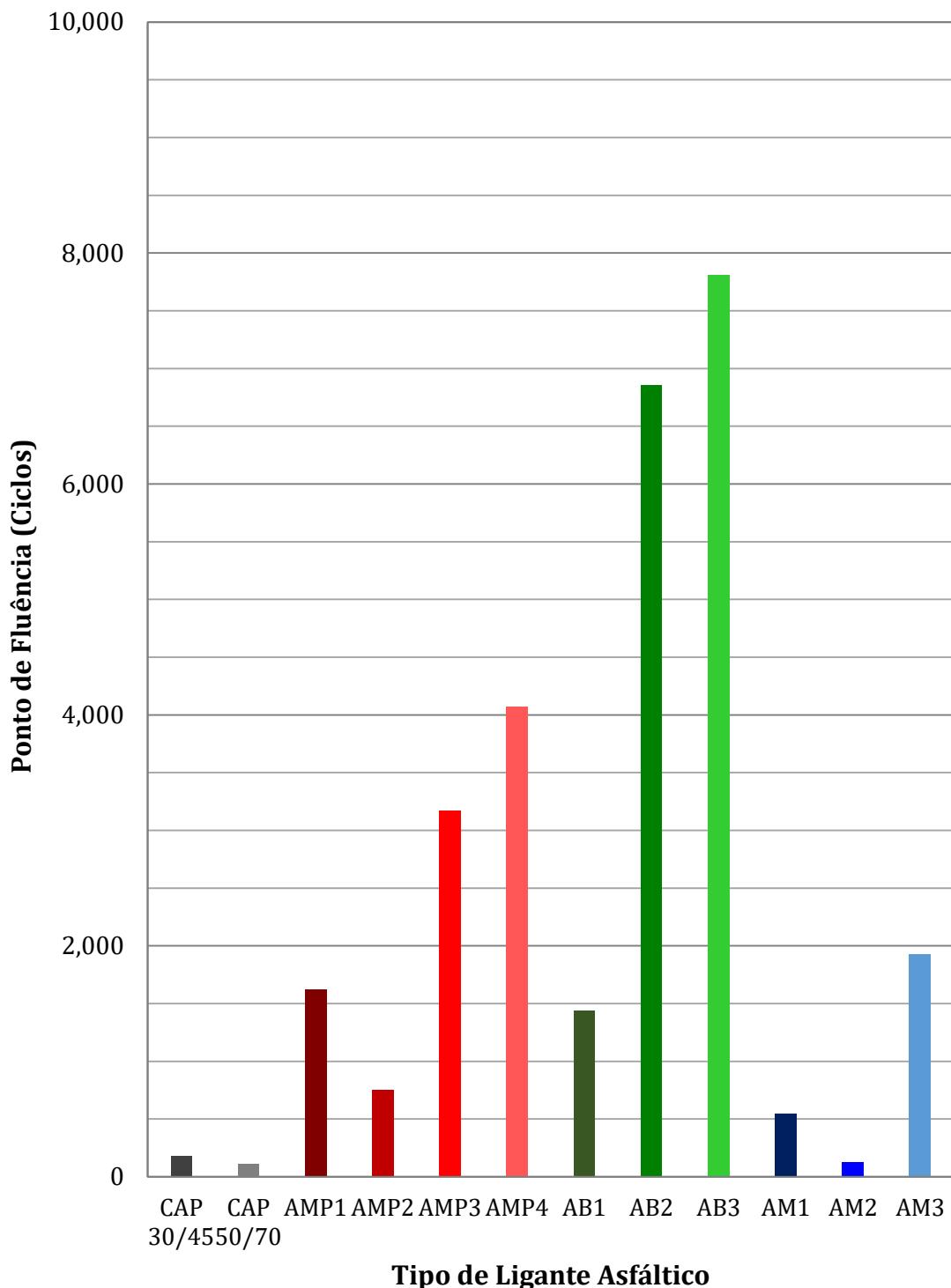


Figura 5.67: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado de São Paulo

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 Asfáltica	Faixa Granulométrica	Ligante Asfáltico	Ponto de Fluência (Ciclos)		Ciclos até obter 5% de deformação	
			Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio 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

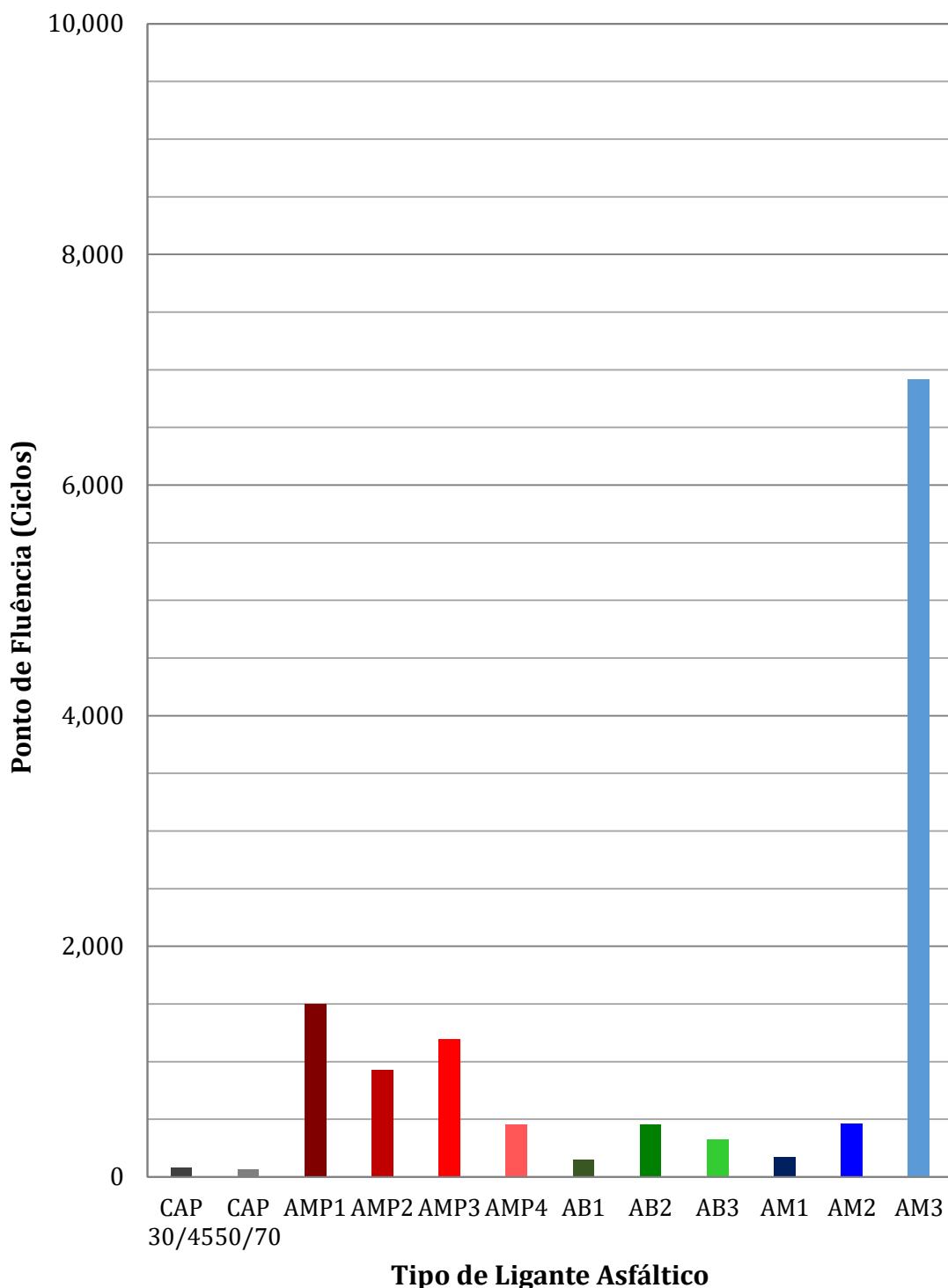


Figura 5.68: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados graníticos do Estado do Rio de Janeiro

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

Mistura Asfáltica	Faixa Granulométrica	Ligante Asfáltico	Ponto de Fluência (Ciclos)		Ciclos até obter 5% de deformação	
			Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio 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

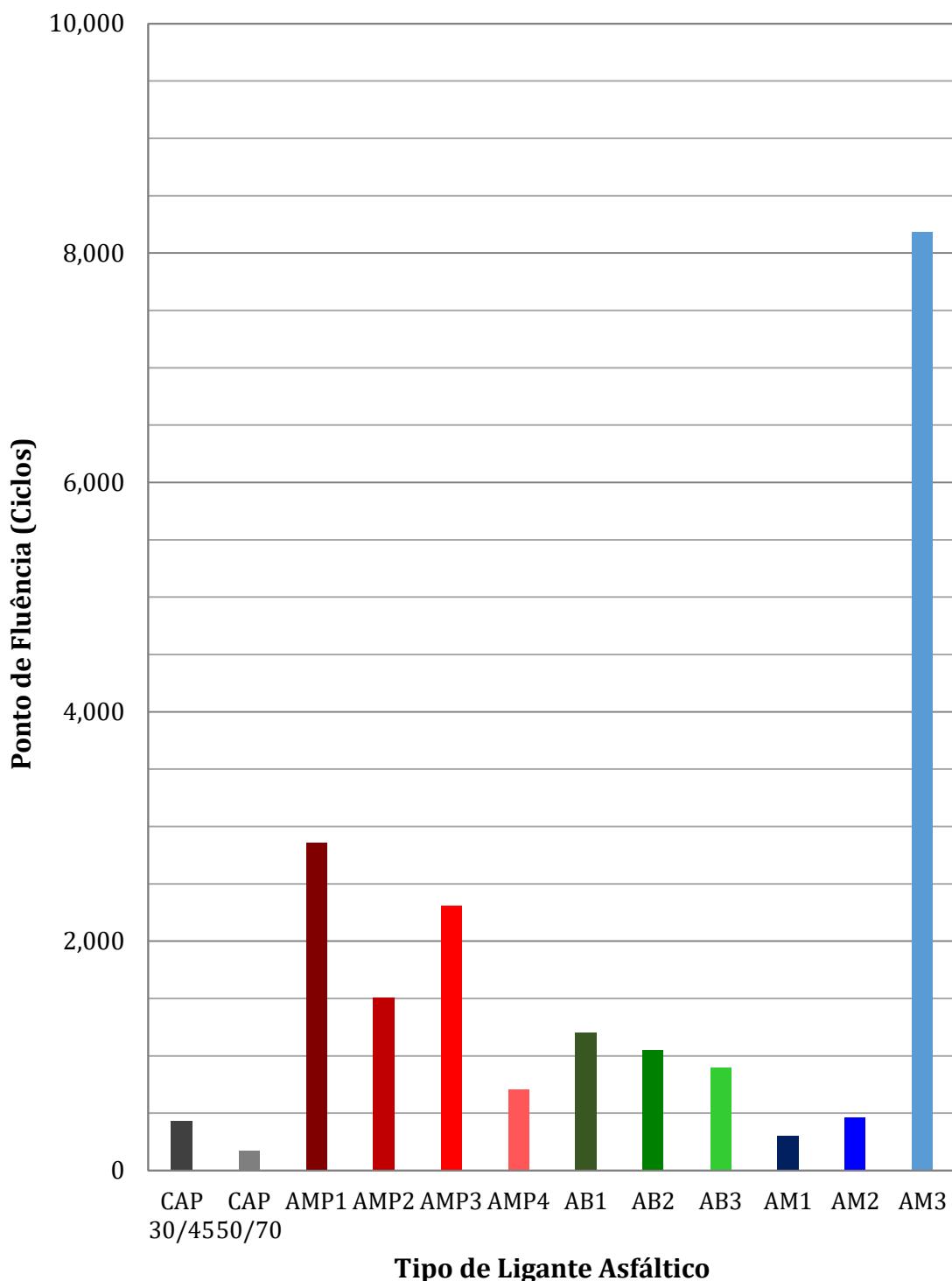


Figura 5.69: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas EGL 9,5mm com agregados basálticos do Estado de São Paulo

### 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 Asfáltica	Faixa Granulométrica	Ligante Asfáltico	Ponto de Fluência (Ciclos)		Ciclos até obter 5% de deformação	
			Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio 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

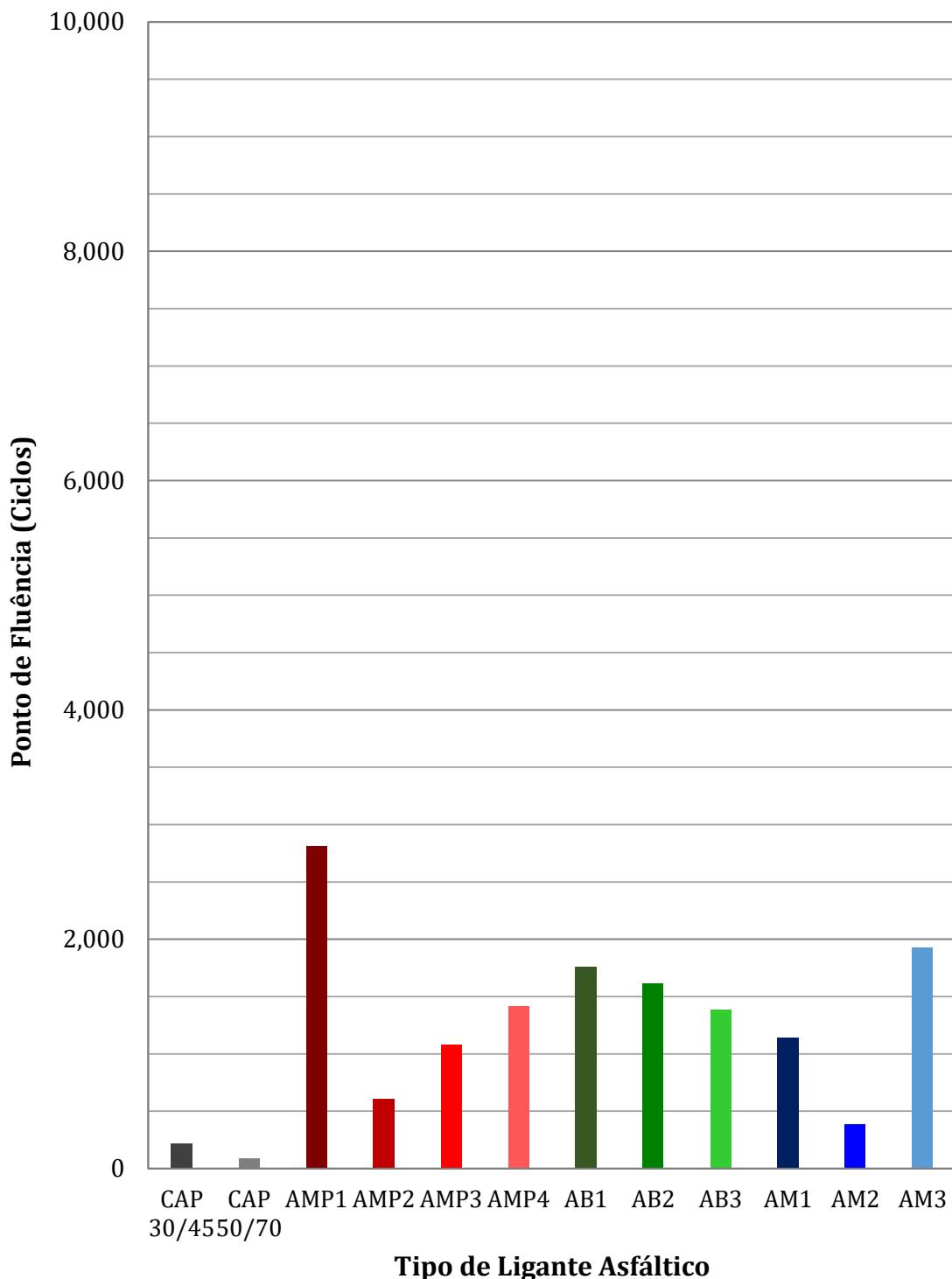


Figura 5.70: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado de São Paulo

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

Mistura Asfáltica	Faixa Granulométrica	Ligante Asfáltico	Ponto de Fluência (Ciclos)		Ciclos até obter 5% de deformação	
			Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio 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

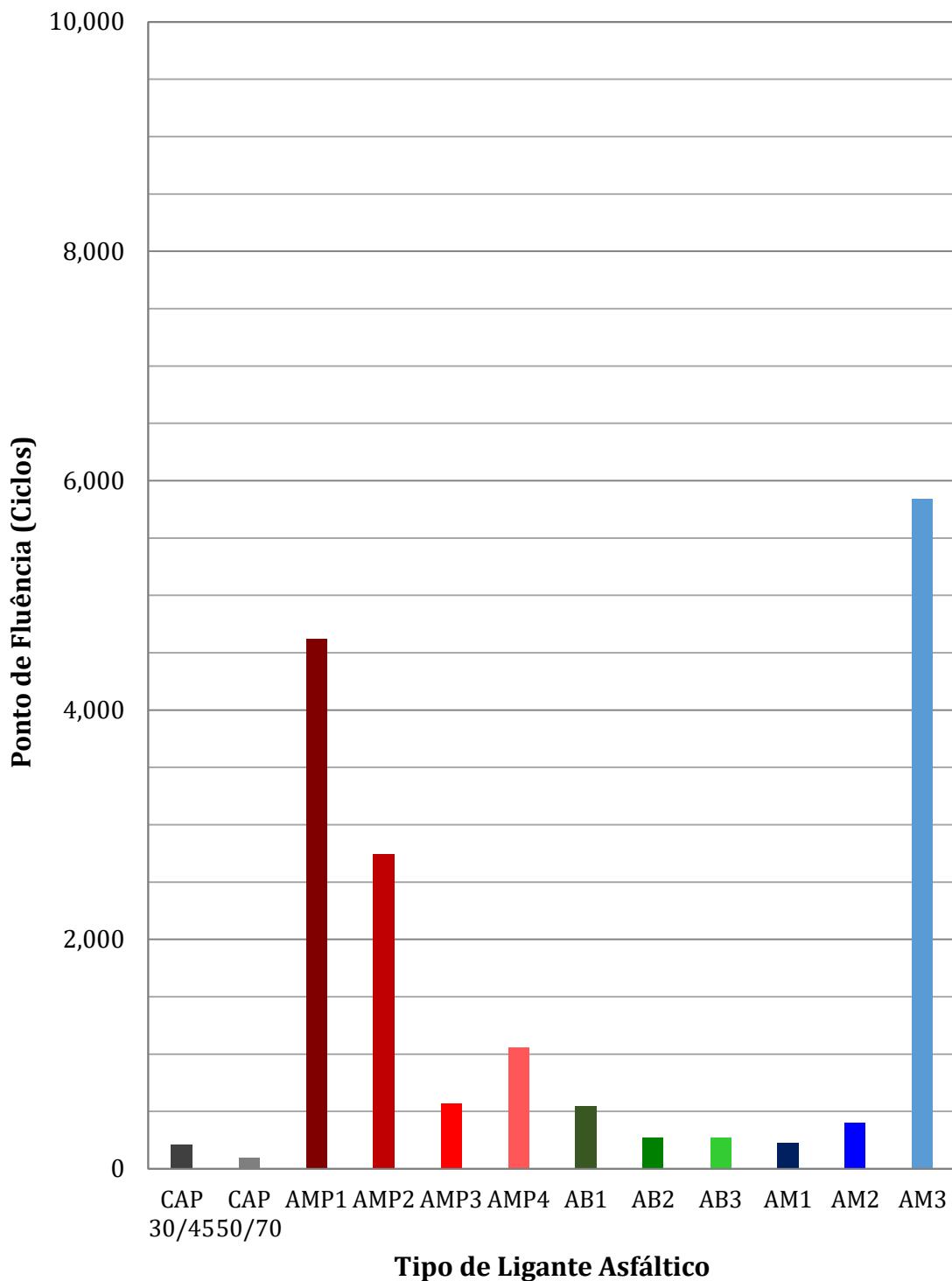


Figura 5.71: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados graníticos do Estado de São Paulo

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

Mistura Asfáltica	Faixa Granulométrica	Ligante Asfáltico	Ponto de Fluência (Ciclos)		Ciclos até obter 5% de deformação	
			Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio 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

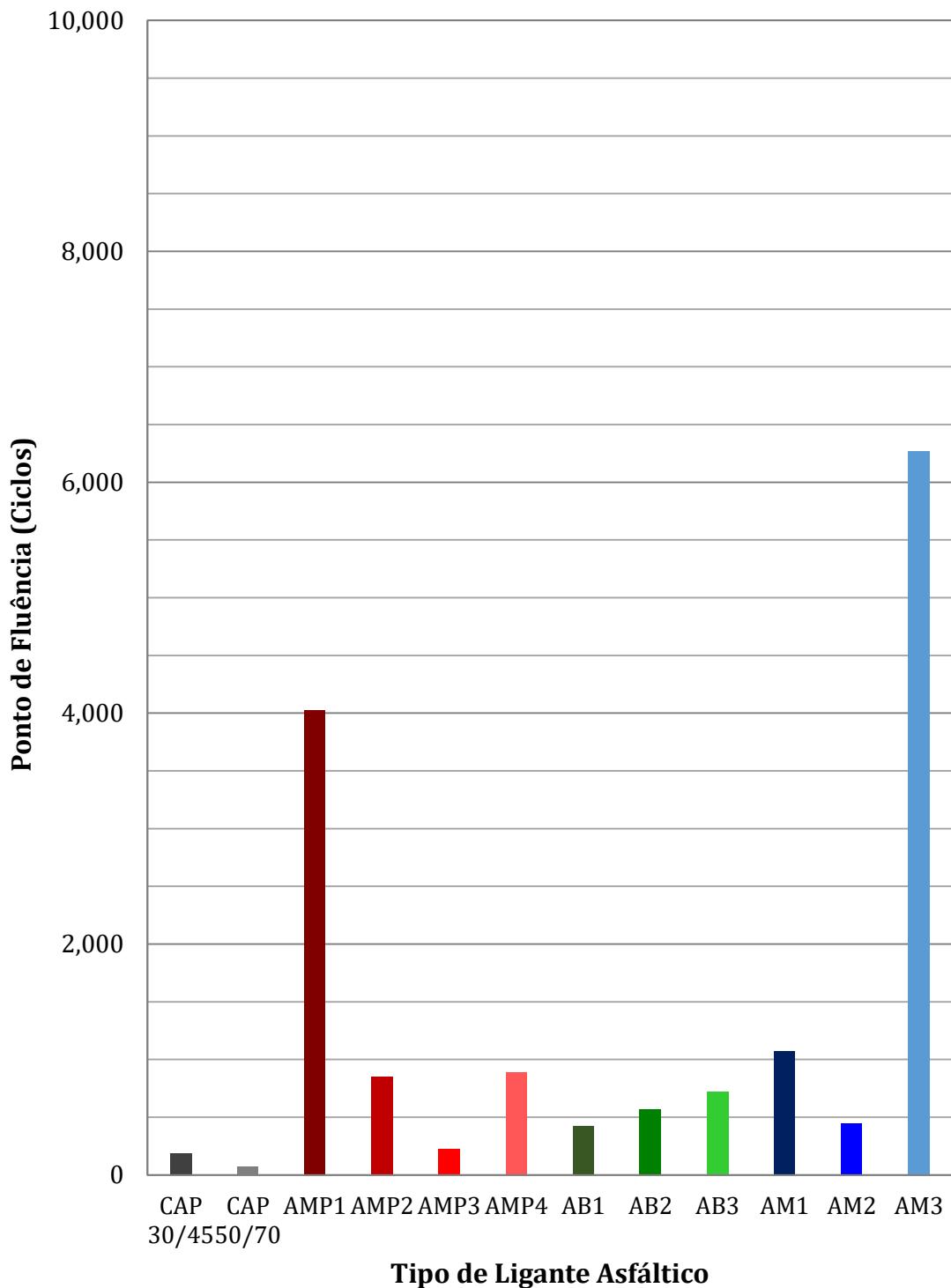


Figura 5.72: Resultados do número de ciclos até fluência nas misturas asfálticas *Gap Graded* com agregados basálticos do Estado de São Paulo

## 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 factorial. 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
	<i>Gap Graded</i>
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.

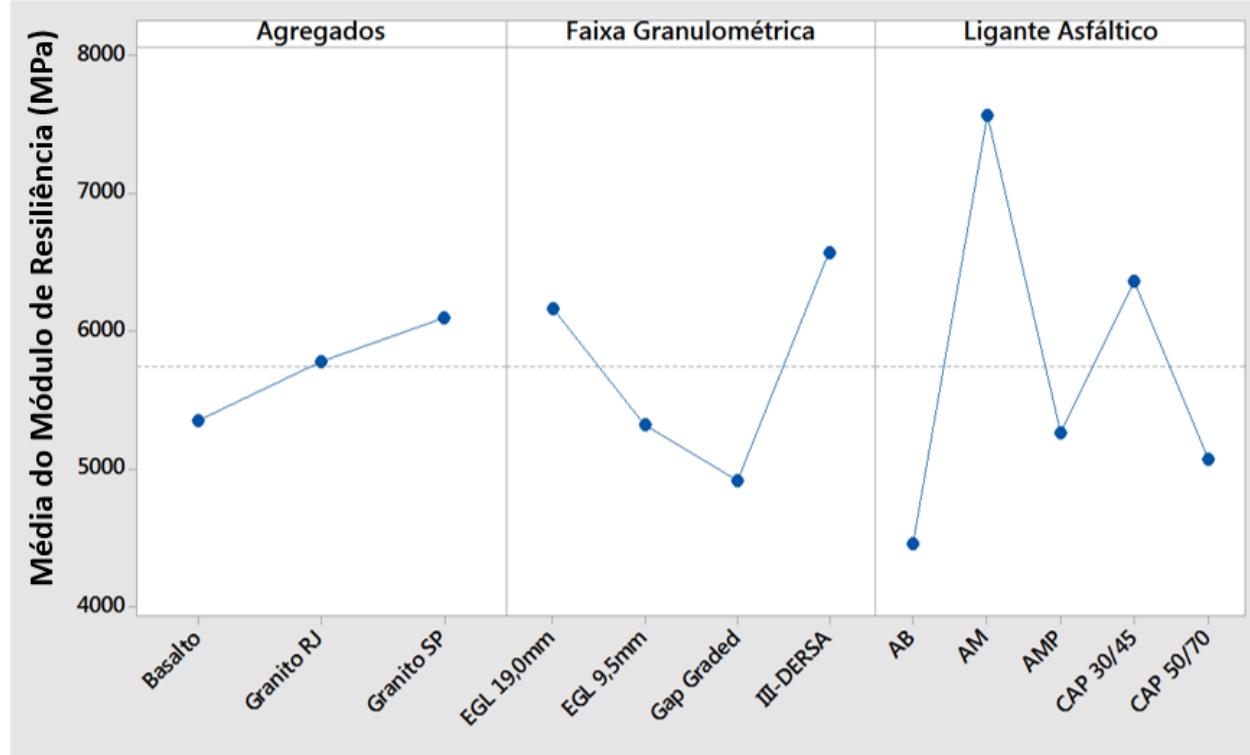


Figura 5.73: Interações individuais dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para o módulo de resiliência na temperatura de 25°C

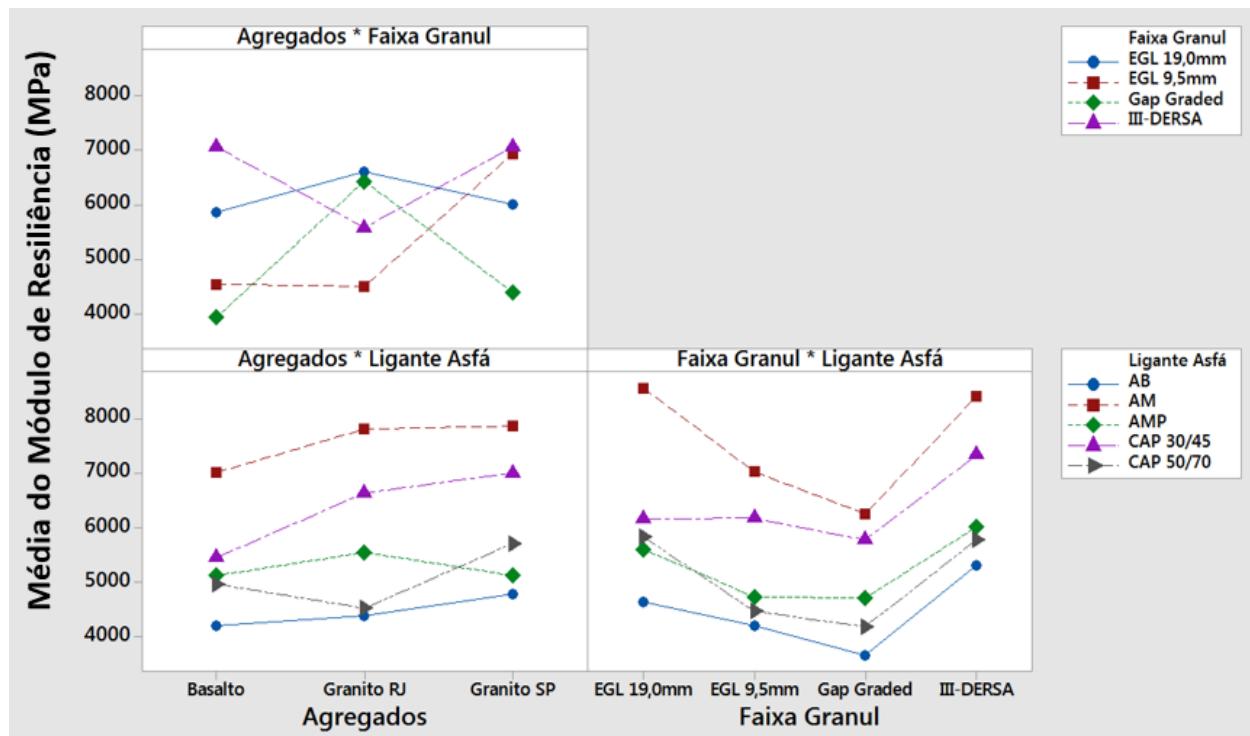


Figura 5.74: Interações combinadas dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligantes asfálticos para o módulo de resiliência na temperatura de 25°C

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.

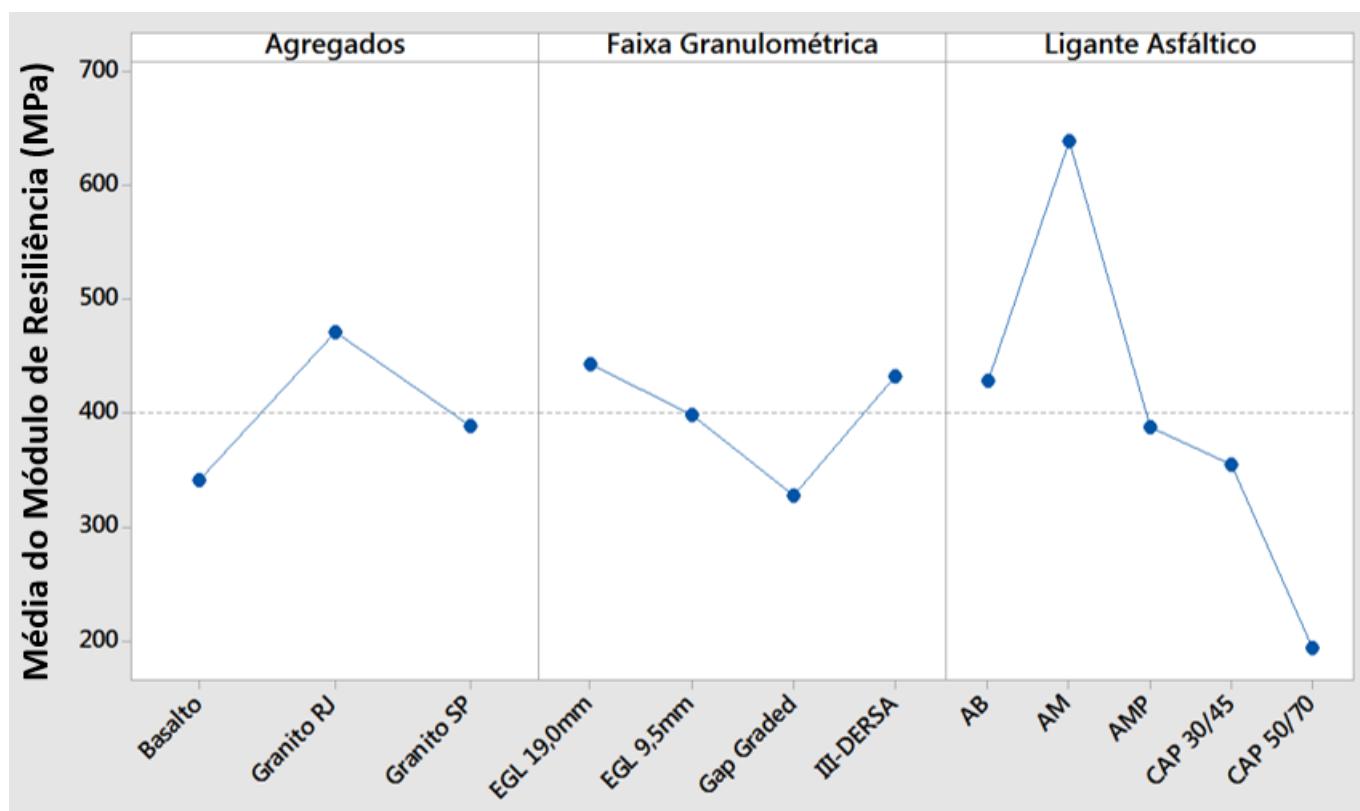


Figura 5.75: Interações individuais dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para o módulo de resiliência na temperatura de 37,8°C

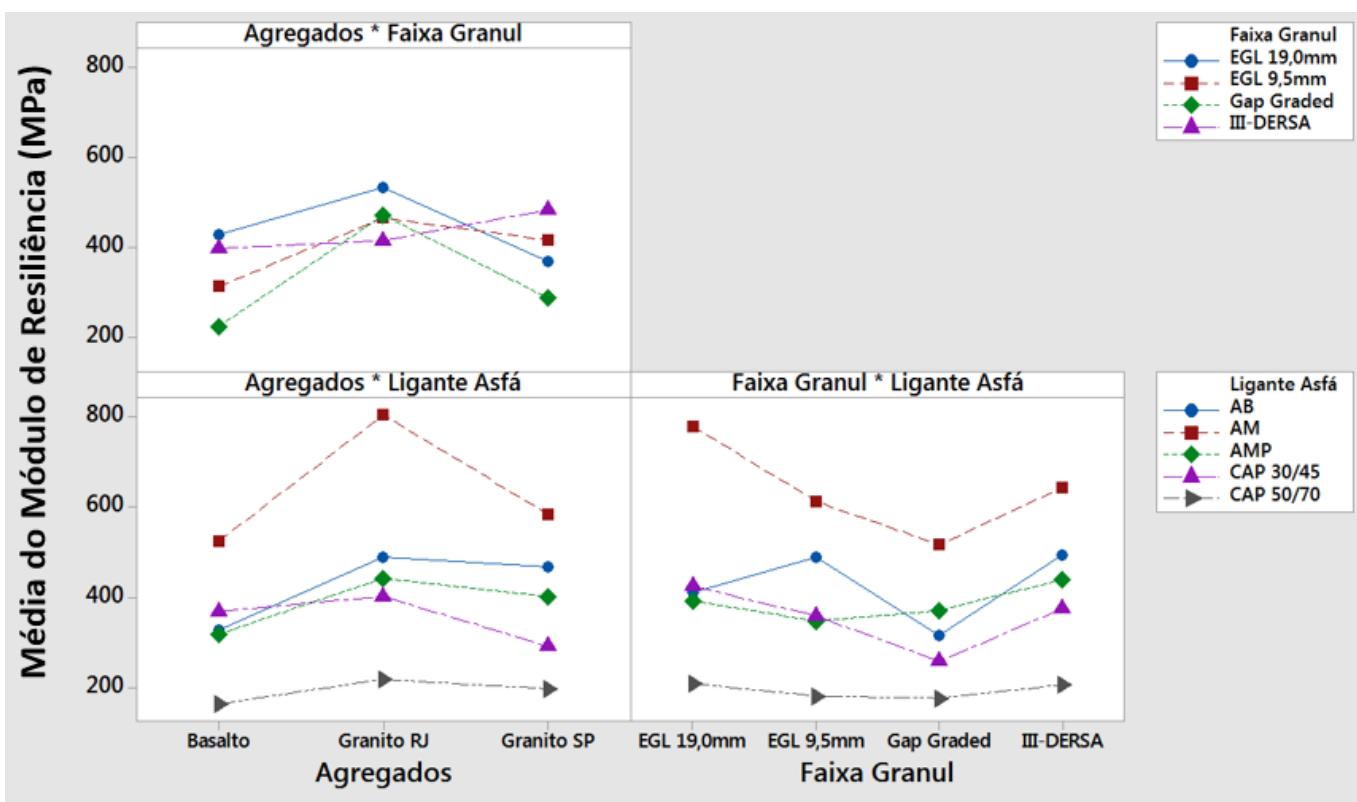


Figura 5.76: Interações combinadas dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligantes asfálticos para o módulo de resiliência na temperatura de 37,8°C

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.

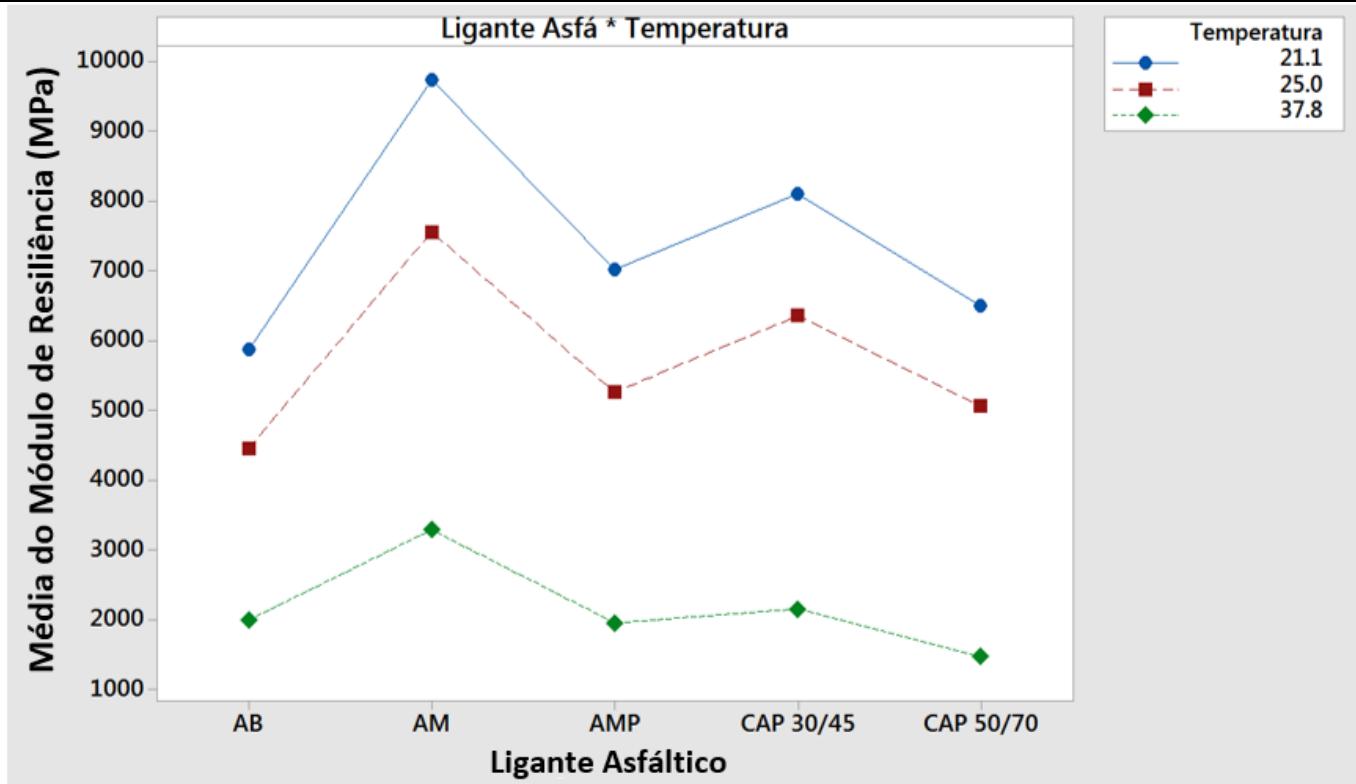


Figura 5.77: Interação individual dos fatores ligante asfáltico e temperatura de ensaio para o módulo de resiliência

#### 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.

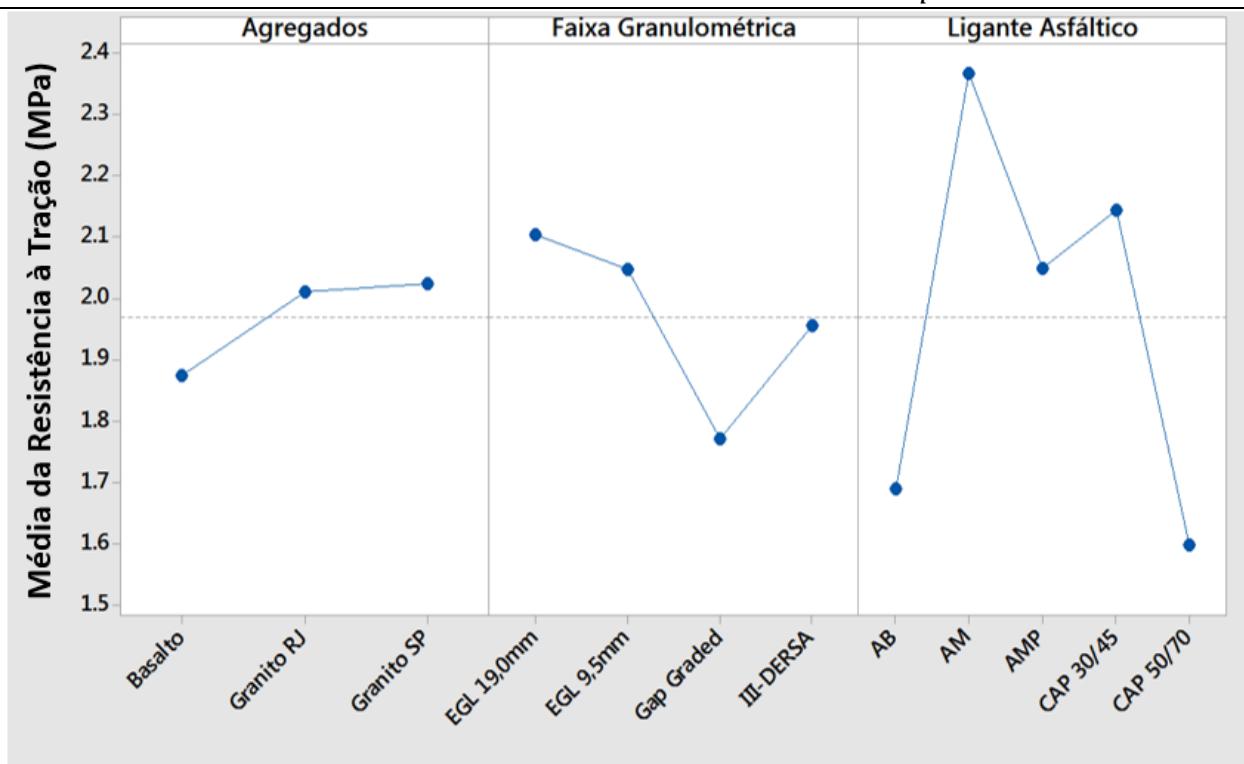


Figura 5.78: Interações individuais dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para a resistência à tração

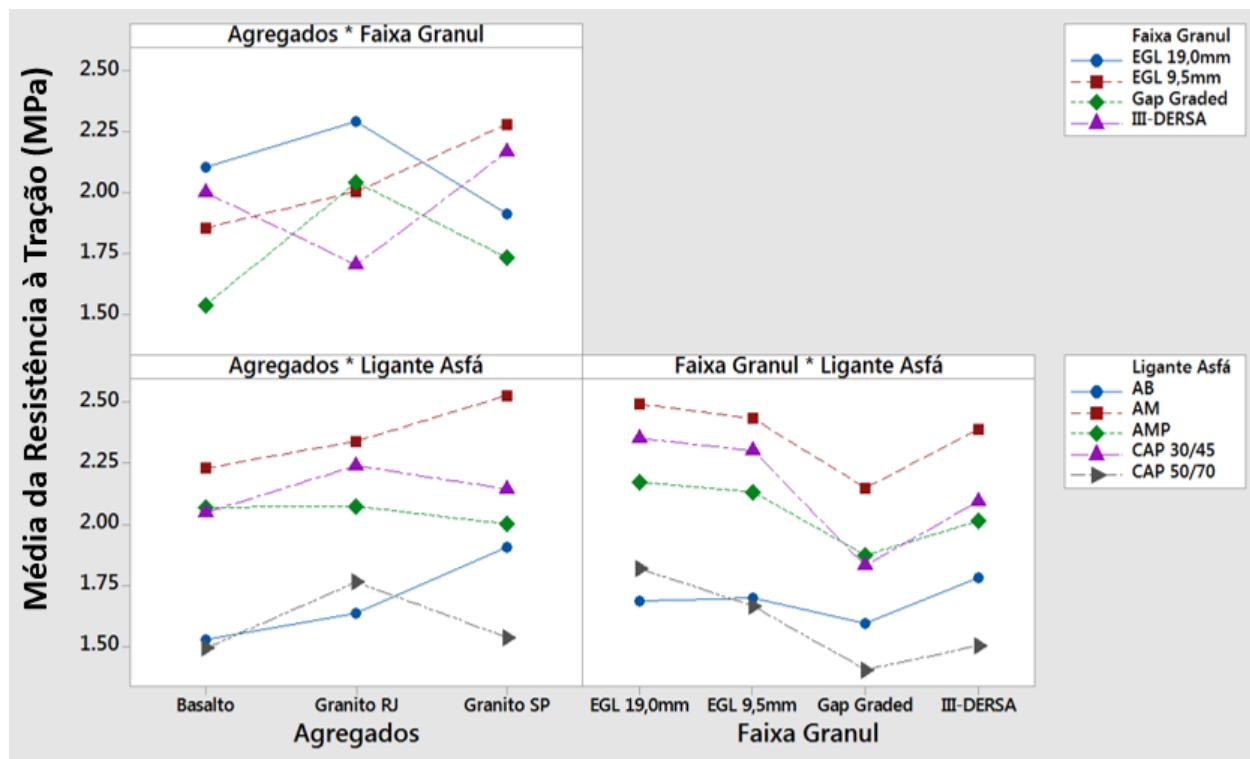


Figura 5.79: Interações combinadas dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para a resistência à tração

### 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 sigmoidal 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

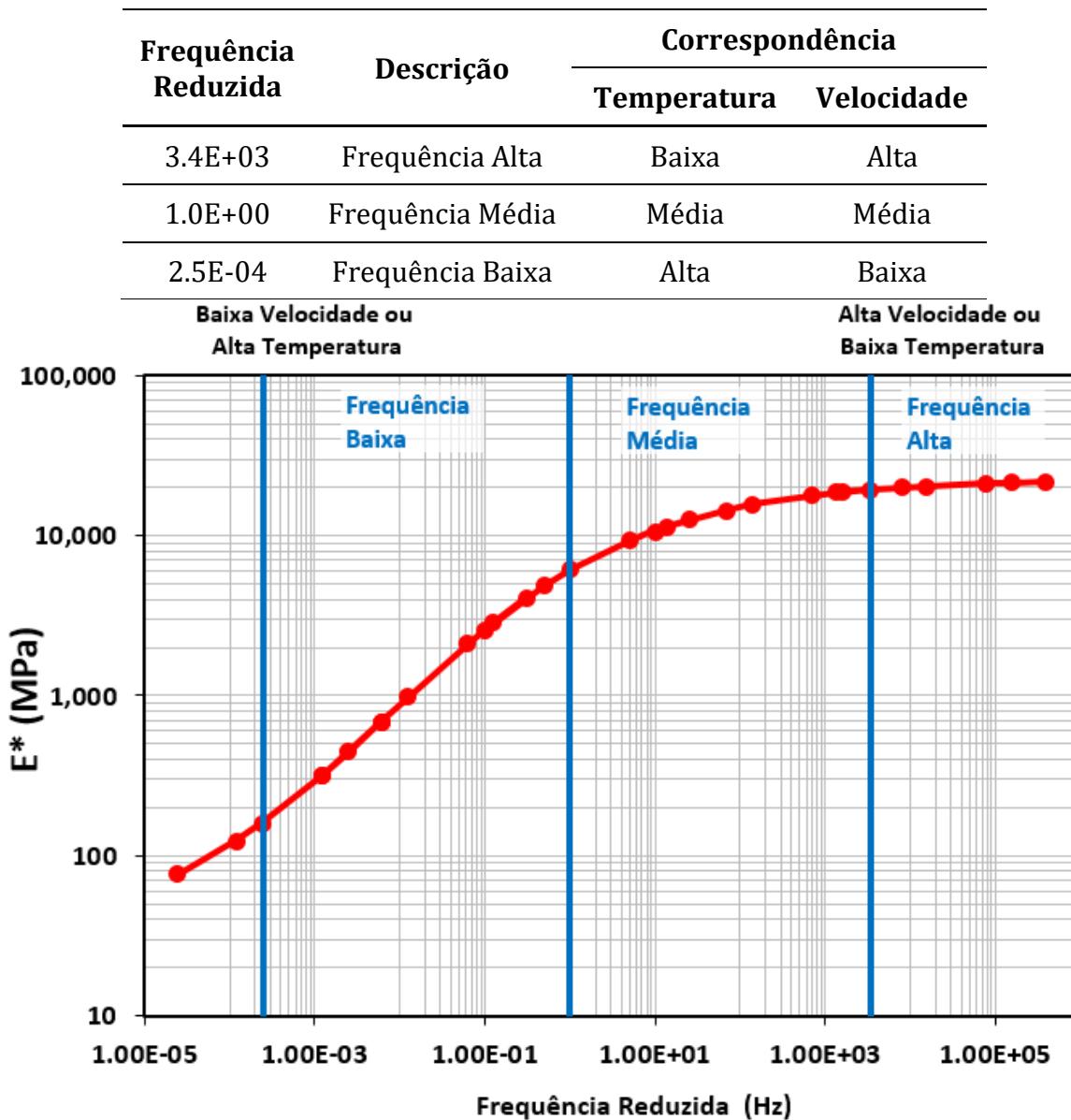


Figura 5.80: Curva mestre e frequências reduzidas empregadas para análise estatística do módulo dinâmico

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.

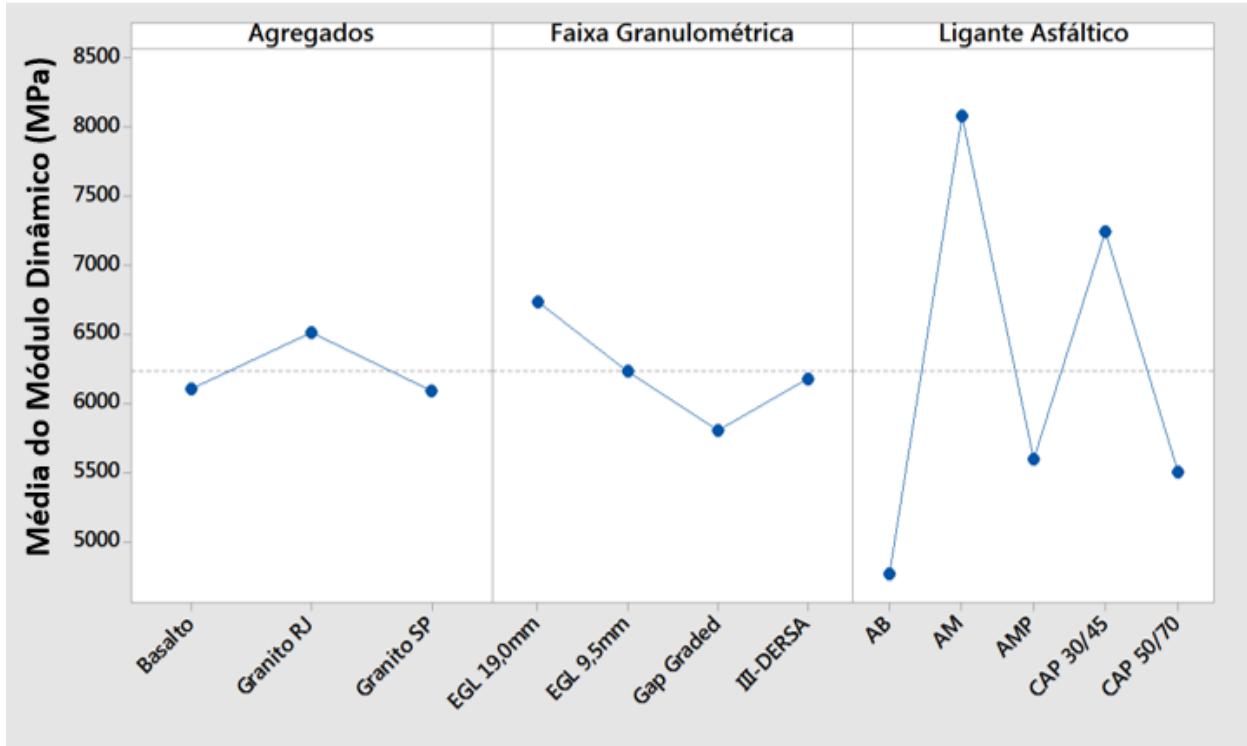


Figura 5.81: Interações individuais dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para o módulo dinâmico em frequência reduzida média

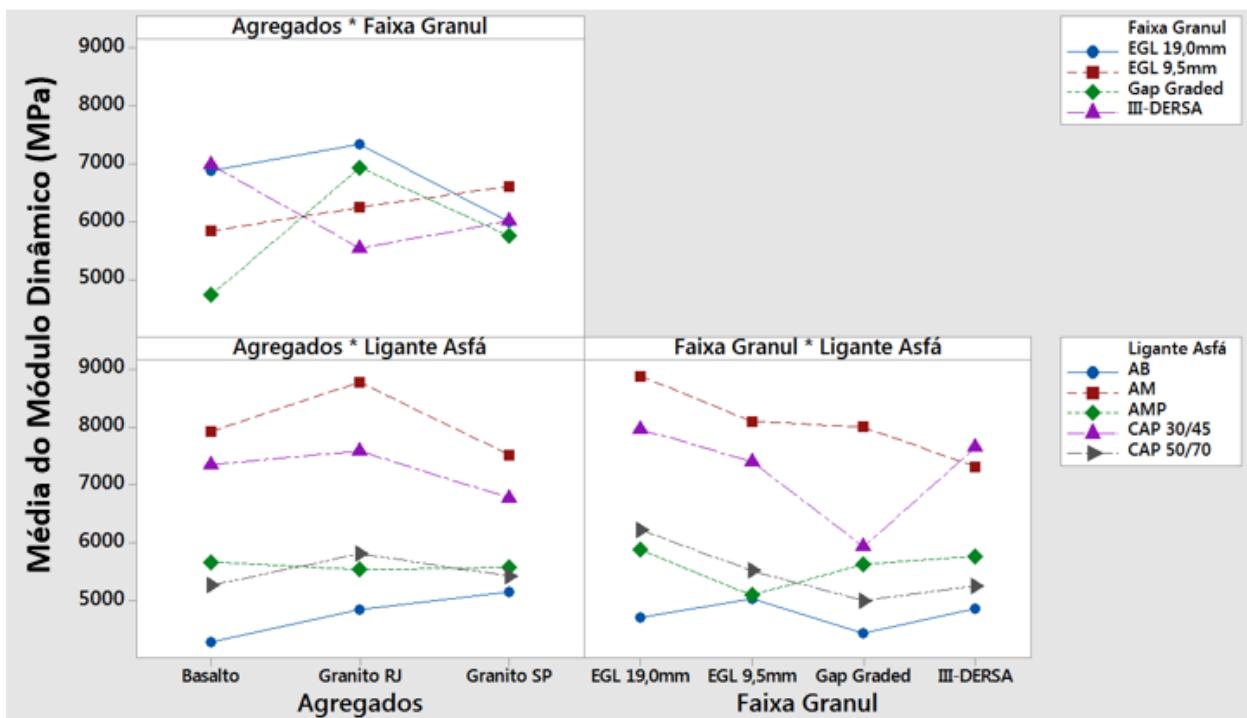


Figura 5.82: Interações combinadas dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para o módulo dinâmico em frequência reduzida média

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.

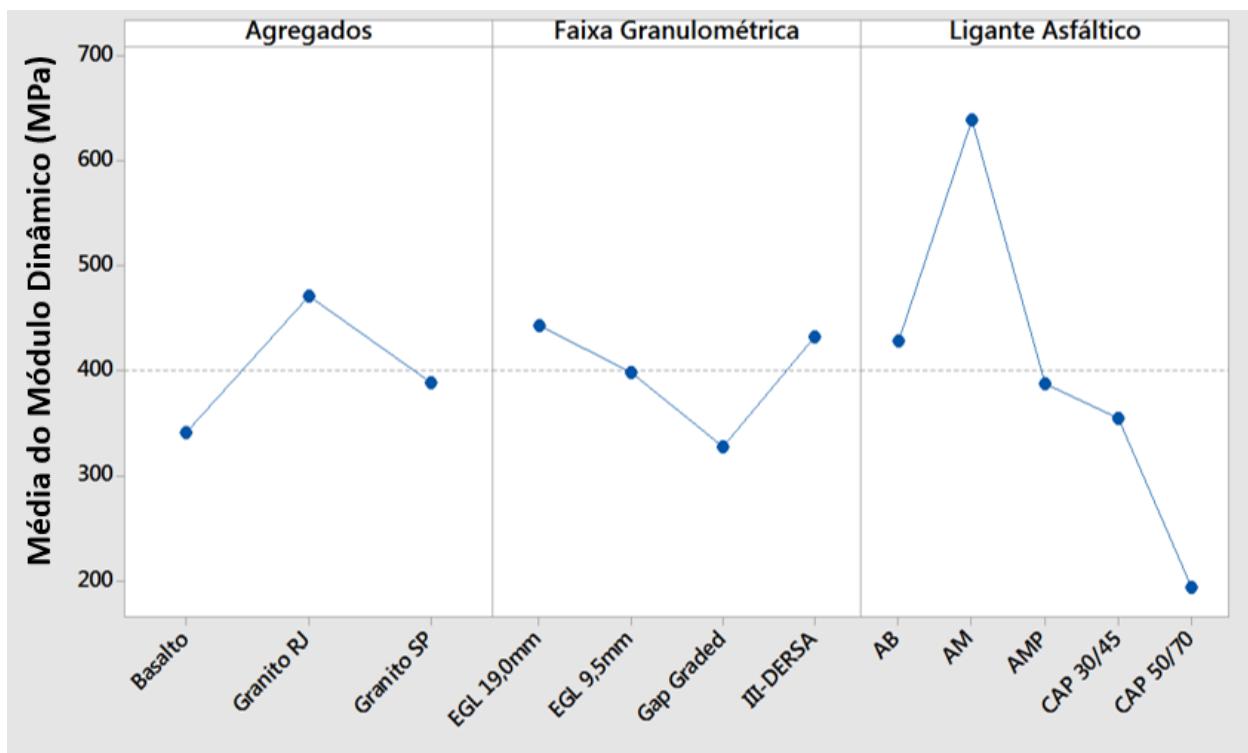


Figura 5.83: Interações individuais dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para o módulo dinâmico em frequência reduzida baixa

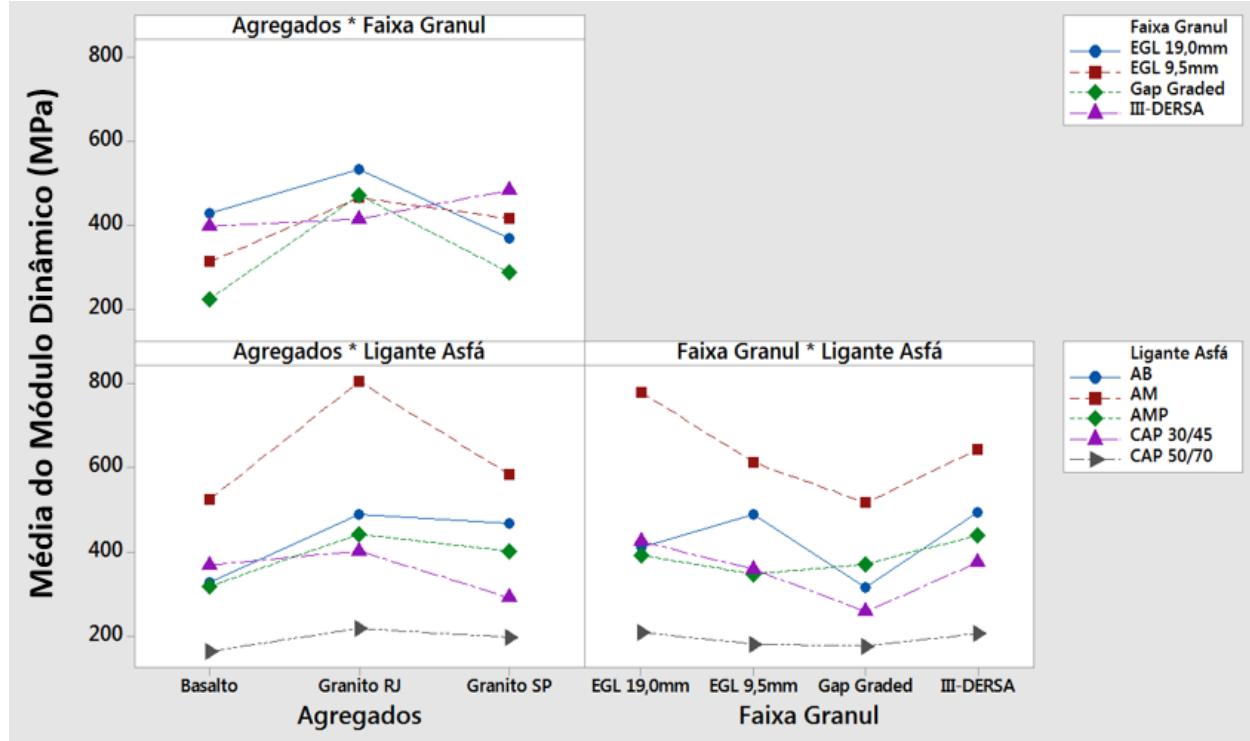


Figura 5.84: Interações combinadas dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para o módulo dinâmico em frequência reduzida baixa

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.

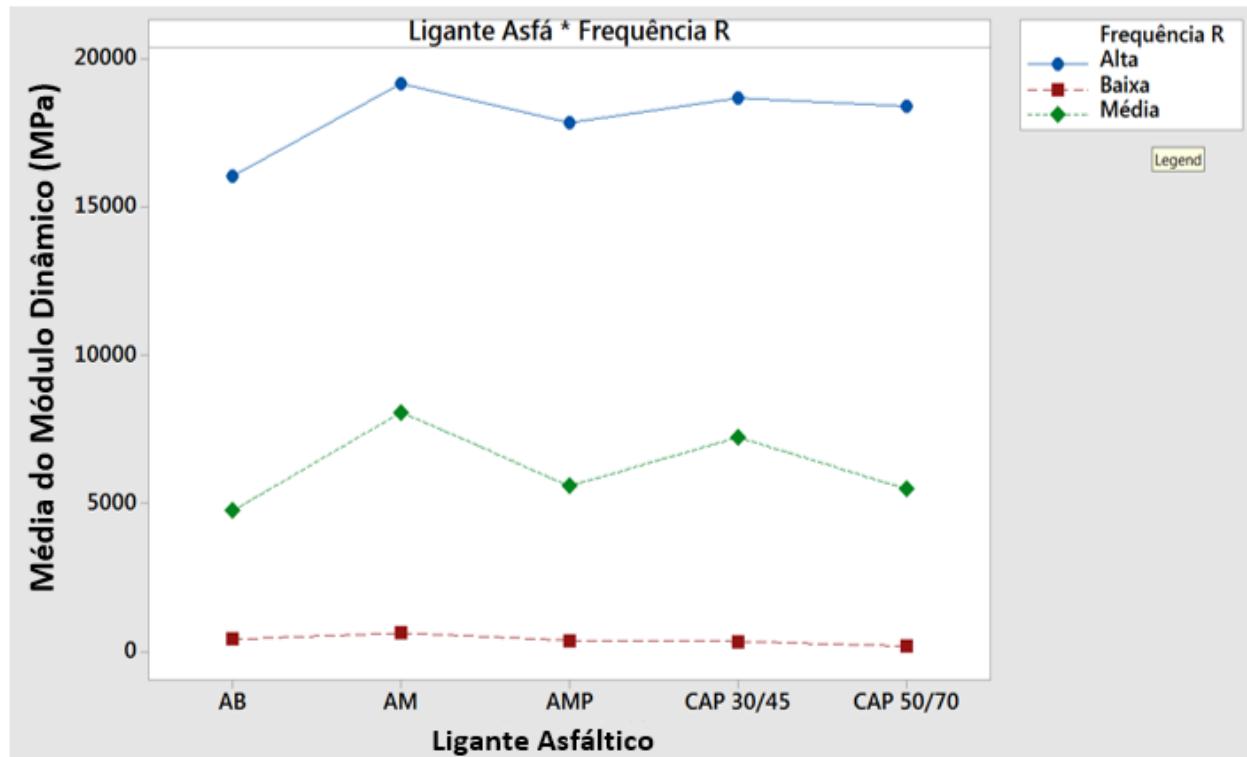


Figura 5.85: Interação individual dos fatores ligante asfáltico e frequência reduzida para o módulo dinâmico

#### 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	<i>F</i> Calculado	<i>F</i> Tabelado	<i>P</i>	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				

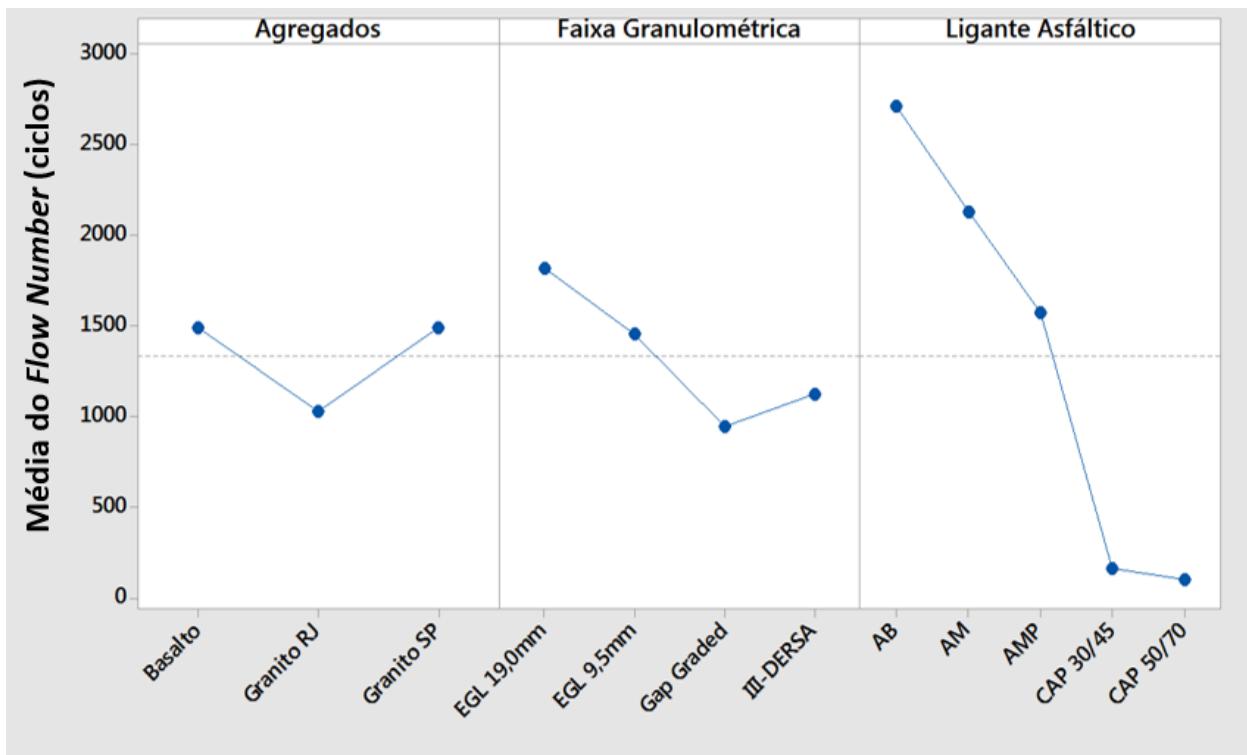


Figura 5.86: Interações individuais dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para o *flow number*

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.

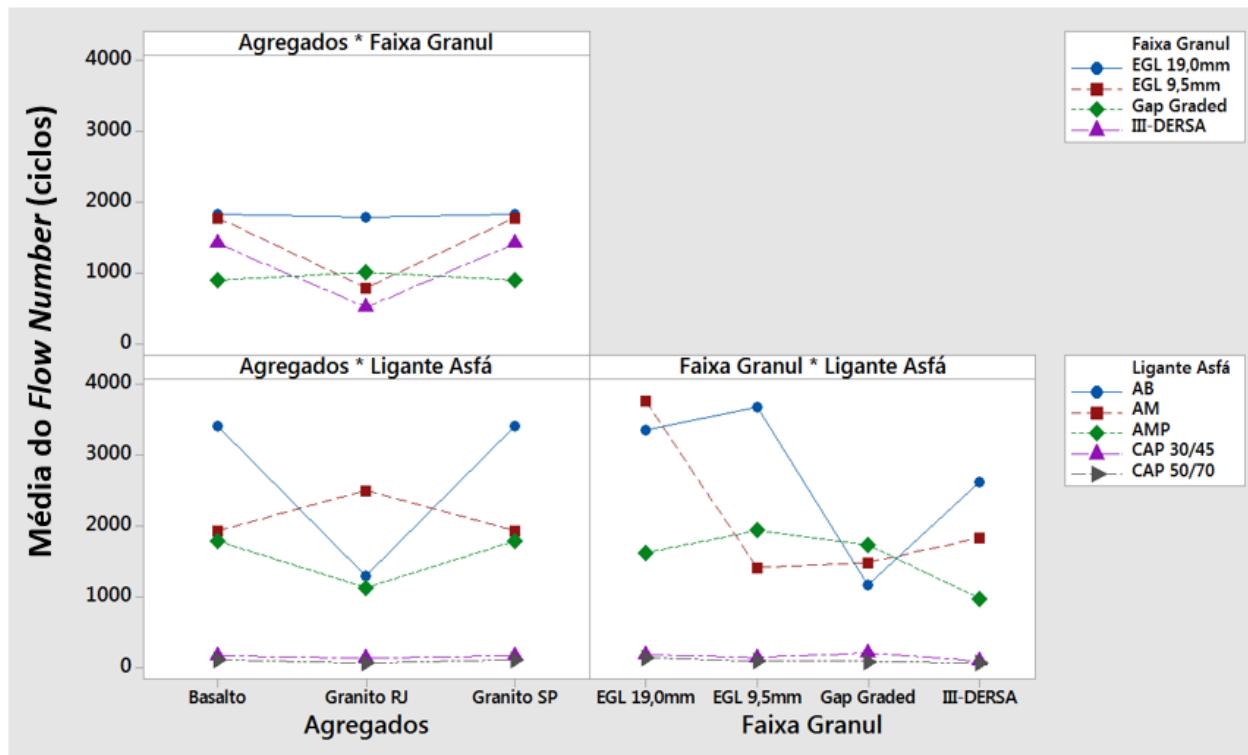


Figura 5.87: Interações combinadas dos fatores agregados, faixa granulométrica e ligante asfáltico para o *flow number*

## 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 → Maior valor no Granito SP → Menor valor no Basalto SP	→ Significativo → Maior valor na Faixa III → Menor valor no <i>Gap Graded</i>	→ Significativo → Maior valor no AM → Menor valor no CAP 50/70
Resistência à Tração	→ Significativo → Maior valor no Granito SP → Menor valor no Basalto SP	→ Significativo → Maior valor no EGL 19mm → Menor valor no <i>Gap Graded</i>	→ Significativo → Maior valor no AM → Menor valor no CAP 50/70
Módulo Dinâmico	→ Não Significativo → Maior valor no Granito RJ → Menor valor no Basalto SP	→ Significativo → Maior valor no EGL 19mm → Menor valor no <i>Gap Graded</i>	→ Significativo → Maior valor no AM → Menor valor no CAP 50/70
<i>Flow Number</i>	→ Significativo → Maior valor no Granito SP → Menor valor no Granito RJ	→ Significativo → Maior valor no EGL 19mm → Menor valor no <i>Gap Graded</i>	→ Significativo → Maior valor no AM → 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 Minnesota. 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.