

# AValiação DA GRANULOMETRIA, MODIFICAÇÃO E DO TEOR DE LIGANTE NA RIGIDEZ E NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Fernando Dekeper Boeira  
Pedro Orlando Borges de Almeida Júnior  
Tatiana Cureau Cervo  
Deividi da Silva Pereira  
Chaveli Brondani  
Centro de Tecnologia, Departamento de Transportes  
Universidade Federal de Santa Maria

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo avaliar a influência da modificação pelo polímero SBS e da variação do teor de ligante asfáltico e da granulometria na rigidez e na deformação permanente de misturas asfálticas pelo ensaio de Módulo Complexo e *Flow Number (FN)*, respectivamente. Para isso utilizaram-se três ligantes asfálticos, CAP 50/70, AMP 60/85 (4,5% de SBS) e o *Highly Modified Asphalt (HIMA, 7,5% de SBS)*, duas granulometrias, e dois métodos de dosagem, totalizando 12 misturas asfálticas. Os resultados indicaram que as modificações e a variação no teor dos ligantes asfálticos foram mais influentes na rigidez e na deformação permanente do que a granulometria das misturas, inclusive encontrou-se boa correlação entre a reologia dos ligantes e os *Flow Numbers (FNs)* obtidos.

*Palavras-chave: Flow Number, Módulo Complexo, Método Bailey, 2S2P1D.*

## ABSTRACT

The aim of this work was to evaluate the influence of the modification by the SBS polymer and the variation of the asphalt binder content and the granulometry in the stiffness and permanent deformation of asphalt mixtures by the Complex Module and Flow Number (FN) tests, respectively. For this, three asphaltic binders, CAP 50/70, AMP 60/85 (4.5% SBS) and Highly Modified Asphalt (HIMA, 7.5% SBS), two granulometry, and two metering methods were used, totaling 12 asphalt mixtures. The results indicated that the changes and variation in the content of asphalt binders were more influential in stiffness and permanent deformation than the grain size of the mixtures, and a good correlation was found between the rheology of the binders and the Flow Numbers (FNs) obtained.

*Keywords: Flow Number, Complex Module, Bailey Method, 2S2P1D.*

## 1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A baixa durabilidade dos revestimentos asfálticos no Brasil decorre da seleção de materiais não compatíveis com o tráfego atual. O aumento do número de veículos, das cargas por eixo e das pressões dos pneus tornam o tráfego mais severo, o que reduz a rigidez e promove dano precoces no revestimento, principalmente a deformação permanente (Zhang *et al.*, 2013; Kutay *et al.*, 2017, Shinohara, 2017).

O método atual de seleção granulométrica, de simples enquadramento em faixas especificadas, e a seleção do ligante asfáltico com base na classificação por penetração funcionaram relativamente bem no passado. Entretanto, à medida que avançamos com as demandas atuais, novas abordagens são fundamentais para o bom desempenho do concreto asfáltico, como métodos racionais e sistemáticos de seleção granulométrica (Mendes e Marques, 2012; Ferreira *et al.*, 2015) e a consideração das propriedades reológicas dos ligantes (Domingos e Faxina, 2015; Nascimento *et al.*, 2015; Domingos *et al.*, 2017).

A granulometria, a modificação e o teor de ligante asfáltico afetam as propriedades de rigidez e a resistência à deformação permanente das misturas. A granulometria é importante à medida que o ligante apresenta um comportamento viscoso, comum nas baixas frequências e altas

temperaturas. Em relação ao ligante, as misturas asfálticas herdam as características viscoelásticas e termosusceptíveis dos ligantes asfálticos, que dependendo do tipo e teor apresentam-se mais ou menos susceptíveis à variação de temperatura, frequência e do tempo de aplicação de carga (Specht *et al.*, 2017), e conseqüentemente, de apresentar dano em altas temperaturas.

Diante deste contexto, esta pesquisa avaliou a influência do ligante asfáltico, pela modificação pelo polímero SBS e da variação no teor de projeto, e da granulometria, com a utilização da metodologia Bailey e convencional de simples enquadramento, na rigidez e na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas. Além disso, correlacionou-se as propriedades reológicas e o teor de ligante com os *Flow Numbers* apresentados pelas misturas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizaram-se 3 ligantes asfálticos, 2 granulometrias e 2 métodos de dosagem, totalizando 12 misturas asfálticas. Os cimentos asfálticos utilizados foram o ligante CAP 50/70, AMP 60/85 Compaflex e o Compaflex HIMA, sendo os ligantes modificados pelo polímero SBS nas percentagens de 4,5% e 7,5%, respectivamente. Os resultados dos ensaios de caracterização dos 3 ligantes estão apresentados na Tabela 1.

Os agregados são de origem vulcânica (diabásio), pertencentes à geomorfologia do Planalto Basáltico do Rio Grande do Sul. Com os agregados elaborou-se 2 granulometrias faixa C (DNIT ES - 031, 2006) com Tamanho Máximo Nominal 19 mm, sendo uma convencional (CON) simplesmente enquadrada por tentativa e erro na faixa C e uma pelo método Bailey (BAI), no qual buscou-se enquadrar dentro ou o mais próximo dos intervalos propostos para os parâmetros Agregado Graúdo (AG), Graúdo Agregado Fino (GAF) e Fino Agregado Fino (FAF) propostos pelo método. Na Figura 1 estão as curvas granulométricas enquanto que a Tabela 2 apresenta a composição de agregados, granulométrica e os parâmetros do método Bailey para as 2 granulometrias.

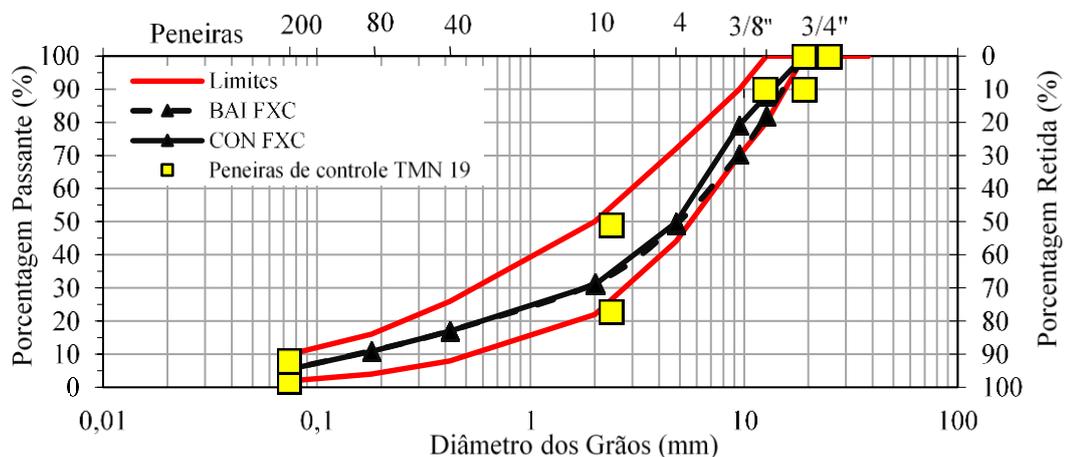
O comportamento graúdo das misturas inicialmente adotado devido a quantidade de material passante na PCP (Peneira de Controle Primário) ser menor que 49,9% em todas as misturas (ASPHALT INSTITUTE, 2011), foi confirmado após o processo de dosagem. Encontrou-se em todas as misturas um volume de vazios da fração graúda maior que a porcentagem de vazios dos agregados graúdos na mistura asfáltica.

As misturas foram dosadas pela metodologia Superpave (AASHTO M 323,2013) com 100 giros e os critérios de projeto nível 1 (critério volumétrico), dependente do tráfego e da importância da rodovia, e através da metodologia de dosagem Marshall (ASTM D 2926,2004) com 75 golpes por face. Os teores de projeto obtidos para as 12 misturas asfálticas estão apresentados na Figura 2. Verifica-se que todas as misturas Marshall apresentaram teores de ligante superior às misturas Superpave, no qual o menor aumento no teor foi de 0,4% e o maior de 0,7%. Com a utilização desses dois métodos de dosagem foi possível analisar a influência da variação do teor de ligante para uma mesma mistura no comportamento à rigidez e a deformação permanente.

**Tabela 1: Resultados dos ensaios de caracterização dos ligantes asfálticos**

| Ligante   | Ensaio  | Medida   |  |  | Limites  |
|---|---|--|--|--|--|
|   |   | 50/70  | AMP 60/85                                      | HIMA   |  |
| -   | <i>PG</i>   | 58H-28   | 70H-22   | 76E-28   | -  |
| Ligante Original  | Penetração (NBR 6576/2007)  | 70 (0,1 mm)                                    | 61,20 (0,1 mm)                                 | 55,50 (0,1 mm)                                 | 40 a 70  |
|   | Ponto de amolecimento (NBR 6560/2016)                                   | 87°C   | 60°C   | 49°C   | -  |
|   | Recuperação elástica (NBR 15086/2006)                                   | 8,83%  | 75,80%   | 84,32%   | -  |
|   | Viscosidade T 316 <sup>1</sup> (2013)                                   | 333 (135°C)<br>138 (150°C)<br>68 (177°C)       | 1025 (135°C)<br>514 (150°C)<br>225 (177°C)     | 872 (135°C)<br>317 (150°C)<br>122 (177°C)      | -  |
|   | $DSR^2$   $G^*$   /sen( $\phi$ ) T 315 <sup>1</sup> (2012)              | 2,96 (58°C)<br>1,32 (64°C)<br>0,62 (70°C)      | 2,09 (64°C)<br>1,14 (70°C)<br>0,65 (76°C)      | 2,53 (70°C)<br>1,67 (76°C)<br>1,21 (82°C)      | ≥ 1,00 kPa   |
|   | Perda de Massa T 240 <sup>1</sup> (2013)                                | -0,04  | -0,08  | -0,04  | < ±1,00%   |
| Ligante Envelhecido no RTFO <sup>5</sup> (T=163°C)                    | $DSR^2$   $G^*$   /sen( $\phi$ ) T 315 <sup>1</sup> (2012)              | 4,93 (58°C)<br>2,09 (64°C)<br>0,93 (70°C)      | 4,18 (64°C)<br>2,25 (70°C)<br>1,27 (76°C)      | 4,08 (70°C)<br>2,58 (76°C)<br>1,71 (82°C)      | ≥ 2,20 kPa   |
|   | <i>MSCR</i> <sup>3</sup> M 332 <sup>1</sup> Jnr @3,2 (2014)             | 1,91 (58°C)                                    | 1,41 (70°C)                                    | 0,21 (76°C)                                    | S[2,0<jnr≤4,5]<br>H[1,0<jnr≤2,0]<br>V[0,5<jnr≤1,0]<br>E[0,0<jnr≤0,5] |
|   | $DSR^2$   $G^*$   . sen( $\phi$ ) T 315 <sup>1</sup> (2012)             | 11198 (19°C)<br>7442 (22°C)<br>4998 (25°C)     | 7949 (19°C)<br>5382 (22°C)<br>3449 (25°C)      | 2482 (19°C)<br>1631 (22°C)<br>1036 (25°C)      | ≤ 6000 kPa   |
|   | <i>BBR</i> <sup>4</sup> Módulo de rigidez – S T 313 <sup>1</sup> (2012) | 52 (-6°C)<br>135 (-12°C)<br>278 (-18°C)        | 42 (-6°C)<br>86 (-12°C)<br>186 (-18°C)         | 43 (-6°C)<br>80 (-12°C)<br>119 (-18°C)         | ≤ 300 MPa  |
| Ligante Envelhecido no RTFO <sup>5</sup> + PAV <sup>6</sup> (T=163°C) | Coefficiente angular – m T 313 <sup>1</sup> (2012)                      | 0,428 (-6°C)<br>0,330 (-12°C)<br>0,316 (-18°C) | 0,439 (-6°C)<br>0,391 (-12°C)<br>0,286 (-18°C) | 0,454 (-6°C)<br>0,325 (-12°C)<br>0,333 (-18°C) | ≥ 0,300  |

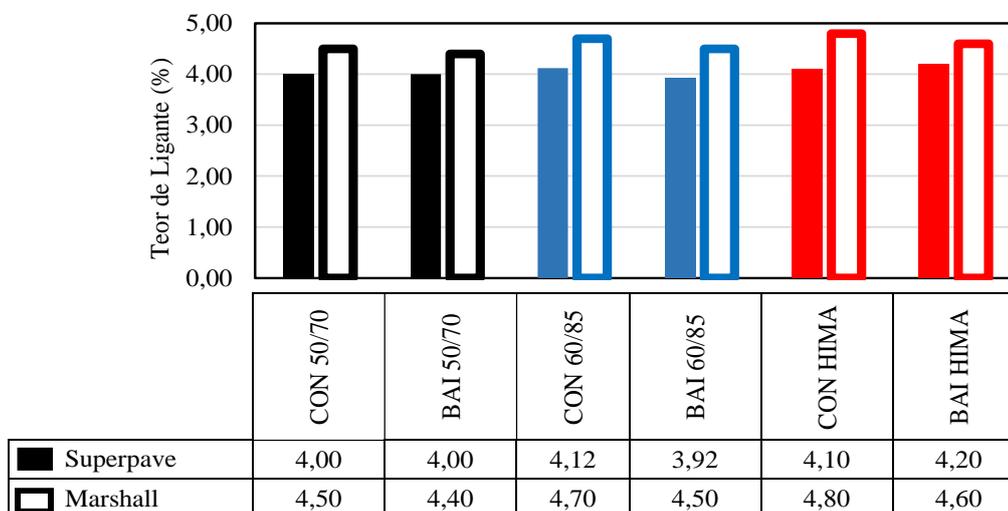
<sup>1</sup>AASHTO; <sup>2</sup>Dynamic Shear Rheometer; <sup>3</sup>Multiple Stress Creep and Recovery; <sup>4</sup>Bending Beam Rheometer; <sup>5</sup>Rolling Thin Film Oven Test; <sup>6</sup>Pressure Aging Vessel; S - Standard (tráfego padrão); H - High (tráfego pesado); V - Very High (tráfego muito pesado); E - Extremely High (tráfego extra pesado).



**Figura 1: Curva granulométrica das misturas Faixas C DNIT ES - 031 (2006)**

**Tabela 2:** Composição de agregados, granulométrica e Bailey das misturas

| Granulometria   | Convencional Faixa C (CON) | Bailey Faixa C (BAI) |
|---|----------------------------|----------------------|
| Composição de Agregados (%)                               |                            |                      |
| Agregados   |                            |                      |
| Brita 1"  | 0                          | 0                    |
| Brita 3/4"  | 20                         | 30                   |
| Brita 3/8"  | 27                         | 15                   |
| Pó Grosso   | 26                         | 29,5                 |
| Pó Fino   | 25,5                       | 24                   |
| Cal Hidratada   | 1,5                        | 1,5                  |
| Composição Granulométrica das Misturas Estudadas          |                            |                      |
| Peneiras mm   | % Passante                 |                      |
| 1 1/2"  | 100,0                      | 100,0                |
| 1"  | 100,0                      | 100,0                |
| 3/4"  | 100,0                      | 100,0                |
| 1/2"  | 88,0                       | 81,0                 |
| 3/8"  | 79,2                       | 70,5                 |
| n° 4  | 49,7                       | 49,1                 |
| n° 10   | 31,0                       | 31,3                 |
| n° 40   | 16,9                       | 17,1                 |
| n° 80   | 10,9                       | 11,0                 |
| n° 200  | 5,5                        | 5,5                  |
| Parâmetros Granulométricos do método Bailey para TMN 19mm |                            |                      |
| Proporção (limite)  | Valores                    |                      |
| AG (0,60 - 0,75)  | 1,41                       | 0,72                 |
| GAF (0,35 - 0,50)   | 0,48                       | 0,48                 |
| FAF (0,35 - 0,50)   | 0,59                       | 0,59                 |



**Figura 2:** Teor de ligante obtido para as 12 misturas asfálticas

A avaliação da rigidez foi realizada pelo ensaio de módulo complexo conforme norma *AASHTO T 342 (2011)*. As temperaturas de ensaio foram de  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $4^{\circ}\text{C}$ ,  $21^{\circ}\text{C}$ ,  $37^{\circ}\text{C}$  e  $54^{\circ}\text{C}$  e as frequências de 25, 20, 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,2, 0,1 e 0,01 Hz, com deformações dentro do regime viscoelástico, entre 50 a 75  $\mu\text{m/m}$ . Com os resultados experimentais foi realizada a modelagem física-matemática 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolic, 1 Dashpot), de Di Benedetto et al. (2004), para elaboração das curvas mestras de ângulo de fase e módulo dinâmico na temperatura de

referência de 20°C, espaço Cole-Cole e Diagrama de Black, que representam o comportamento viscoelástico do material em qualquer temperatura e frequência de carregamento. Utilizou-se duas amostras por mistura nas dimensões 10 x 15 cm, com volume de vazios de  $5 \pm 0,5\%$ , moldadas no Compactador Giratório Superpave (CGS) nos teores de projeto.

A avaliação da deformação permanente foi através do ensaio uniaxial de carga repetida, conforme norma *AASHTO TP 79* (2012), que também atende a ABNT NBR 1650 (2016). Como parâmetros de ensaio adotou-se o tempo de aplicação de carga de 0,1 s, tempo de repouso de 0,9 s, tensão de 204 kPa, tensão de repouso de 10,2 kPa, tensão de pré-carregamento de 15 kPa com duração de 60 s, temperatura de ensaio de 60 °C e tempo mínimo de condicionamento das amostras de 3 horas. O critério de parada do ensaio foi de 5% da deformação ou 10000 ciclos. Utilizou-se 3 amostras por mistura nas dimensões 10 x 15 cm no CGS com volume de vazios de  $7 \pm 0,5\%$ . A curva de deformação plástica vertical uniaxial de cada corpo de prova foi ajustada ao modelo de *Francken*, que é uma combinação dos modelos de potência e exponencial.

Com os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida, buscou-se correlacionar os *FNs* das misturas asfálticas com as propriedades reológicas, *Jnr* e *PG* de alta, dos ligantes asfálticos e os teores de projeto.

### 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os parâmetros de calibração do modelo 2S2P1D para representar o comportamento viscoelástico do material estão apresentados na Tabela 3, juntamente com as constantes C1 e C2, do WLF (William, Landel e Ferry).

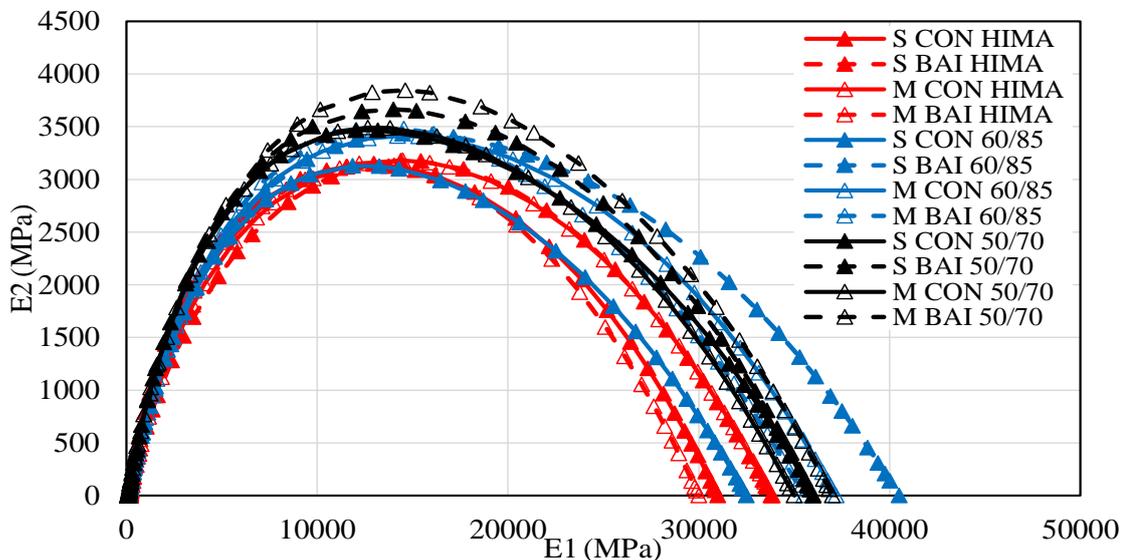
**Tabela 3:** Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2 de cada mistura

| Mistura     | E*                    |                      |      |      |      |                | WLF  |        |         |
|-------------|-----------------------|----------------------|------|------|------|----------------|------|--------|---------|
|             | E <sub>00</sub> (MPa) | E <sub>0</sub> (MPa) | k    | h    | δ    | τ <sub>E</sub> | β    | C1     | C2 (°C) |
| S CON 50/70 | 110                   | 36000                | 0,20 | 0,57 | 2,22 | 0,10           | 400  | 17,342 | 135,419 |
| S BAI 50/70 | 140                   | 36000                | 0,22 | 0,59 | 2,40 | 0,25           | 200  | 31,507 | 230,204 |
| S CON 60/85 | 130                   | 32500                | 0,20 | 0,52 | 2,12 | 0,30           | 4000 | 45,020 | 334,261 |
| S BAI 60/85 | 130                   | 40500                | 0,18 | 0,50 | 2,30 | 0,40           | 6000 | 25,023 | 168,219 |
| S CON HIMA  | 170                   | 31000                | 0,23 | 0,62 | 2,80 | 0,23           | 1000 | 22,364 | 168,625 |
| S BAI HIMA  | 110                   | 33800                | 0,21 | 0,48 | 2,60 | 0,11           | 1000 | 25,832 | 189,970 |
| M CON 50/70 | 90                    | 35000                | 0,21 | 0,57 | 2,25 | 0,15           | 400  | 31,939 | 230,469 |
| M BAI 50/70 | 110                   | 37000                | 0,22 | 0,55 | 2,10 | 0,20           | 600  | 36,785 | 259,163 |
| M CON 60/85 | 160                   | 37200                | 0,20 | 0,54 | 2,45 | 0,30           | 500  | 48,181 | 330,279 |
| M BAI 60/85 | 160                   | 35500                | 0,20 | 0,52 | 2,00 | 0,50           | 300  | 36,162 | 250,209 |
| M CON HIMA  | 220                   | 33850                | 0,21 | 0,53 | 2,60 | 0,20           | 1000 | 21,705 | 160,635 |
| M BAI HIMA  | 180                   | 30000                | 0,24 | 0,60 | 2,90 | 0,10           | 1000 | 19,858 | 150,989 |

A Figura 3 mostra o espaço Cole Cole obtido com a modelagem 2S2P1D. Observa-se que o aumento no teor de modificação do ligante pelo polímero SBS reduziu o comportamento viscoso das misturas, pois as misturas com ligante HIMA apresentaram os menores valores de E2, enquanto que valores mais altos de E2 foram das misturas com ligante CAP 50/70. Esses resultados foram coerentes com os ensaios de caracterização dos ligantes asfálticos, pois as maiores recuperações elásticas são do ligante HIMA e AMP 60/85.

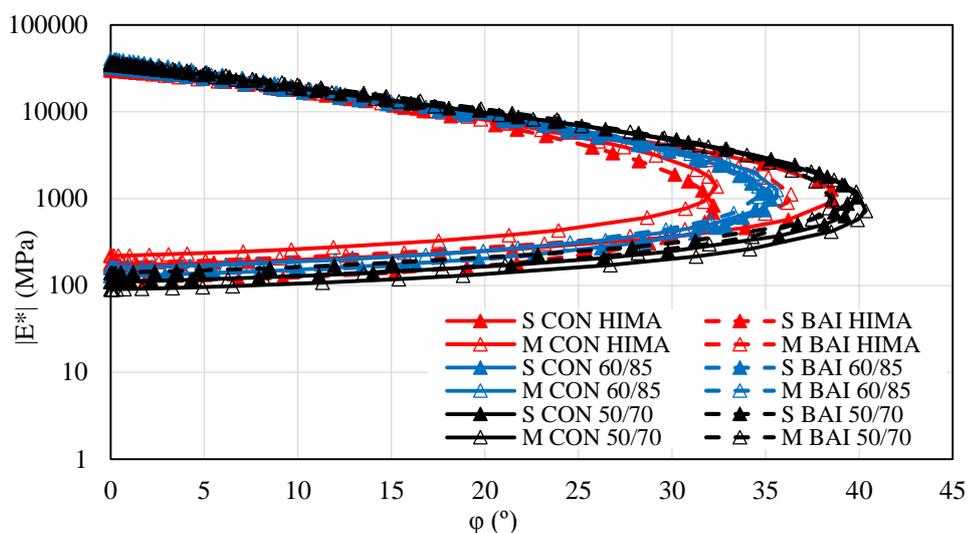
A variação no teor de ligante não influenciou significativamente os valores de E2, pois somente na mistura BAI 50/70 que o aumento do teor de ligante tornou a mistura com maior comportamento viscoso. Neste caso, a modificação do ligante tornou as misturas menos

suscetíveis às variações do teor. Em relação a granulometria, para um mesmo método de dosagem e tipo de ligante, as misturas BAI tendem a apresentar maiores valores de E2 em relação às CON, sendo a maior diferença para as misturas com ligante CAP 50/70.



**Figura 3** - Espaço Cole Cole obtido através a modelagem 2S2P1D das misturas

A Figura 4 mostra o diagrama de Black obtido com a modelagem 2S2P1D. Novamente a modificação do ligante mostrou-se o fator de maior influência, com os maiores valores de ângulo de fase para as misturas com ligante CAP 50/70, e conseqüentemente, um maior comportamento viscoso. Houve uma tendência de que quanto maior a quantidade de modificação do ligante por polímero SBS maior o comportamento elástico da mistura. Em relação ao teor de ligante e a granulometria não se encontrou uma tendência, e essas variações, analisando dentro do mesmo tipo de ligante, foram pouco influentes. Somente nas misturas com ligante HIMA que o aumento no teor provocou efeitos distintos conforme a granulometria. Para granulometria BAI o aumento no teor tornou a mistura mais viscosa, enquanto que a granulometria CON tornou a mistura mais elástica.

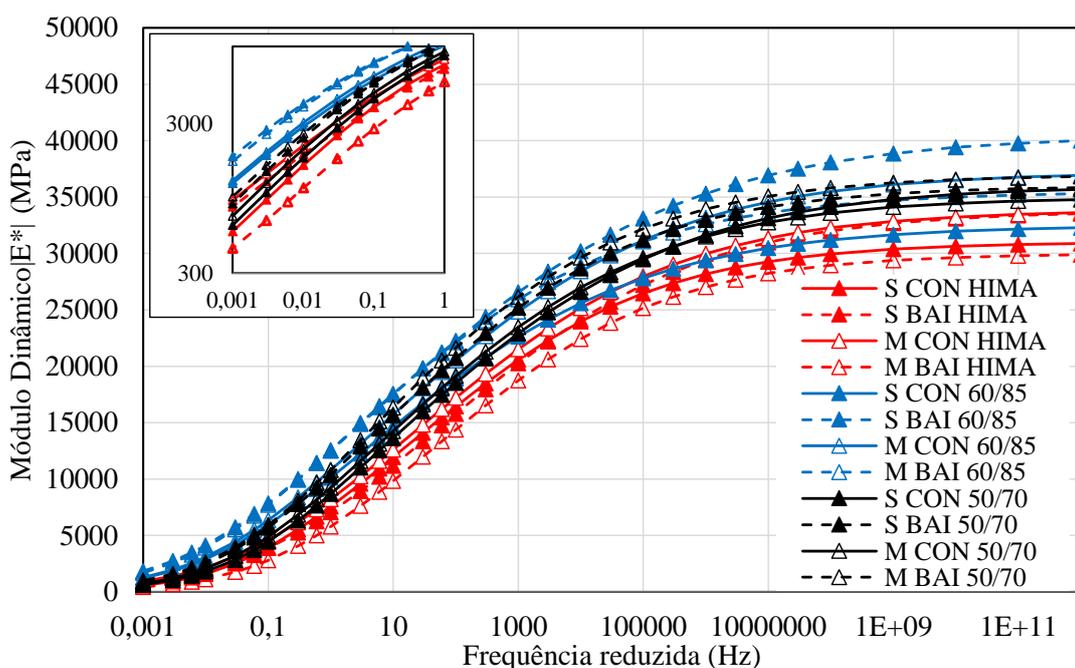


**Figura 4** - Diagrama de Black das misturas obtido através da modelagem 2S2P1D

A Figura 5 mostra as curvas mestras de módulo dinâmico, construídas utilizando-se o princípio da superposição tempo-temperatura, e as curvas ajustadas ao modelo 2S2P1D. Nas altas frequências (baixas temperaturas) às misturas com ligante HIMA são menos rígidas, enquanto que as misturas com ligante AMP 60/85 são as de maior rigidez. As misturas com ligante CAP 50/70 apresentou rigidez intermediária entre as misturas com ligante modificado.

Essa tendência prosseguiu com a redução da frequência (aumento da temperatura). No entanto ficou evidente a influência da granulometria, pois a granulometria BAI conferiu as misturas uma maior rigidez em relação à granulometria CON dentro de um mesmo tipo de ligante asfáltico, com exceção as misturas HIMA. Nas maiores temperaturas, o ligante asfáltico perde sua capacidade de suporte, e o intertravamento do esqueleto mineral desempenha papel importante na absorção dos esforços, característica esta conferida pelo método Bailey.

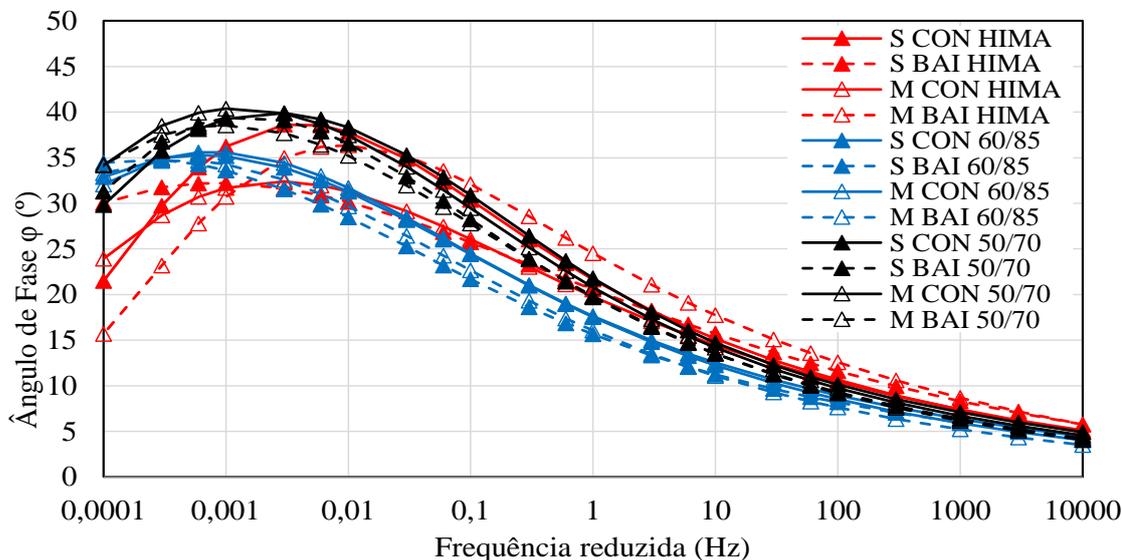
A variação no teor de ligante não influenciou de forma significativa a rigidez das misturas, houve apenas uma tendência de as misturas Superpave serem mais rígidas para um mesmo tipo de ligante e granulometria.



**Figura 5** - Curvas mestras de módulo dinâmico obtidas através da modelagem 2S2P1D

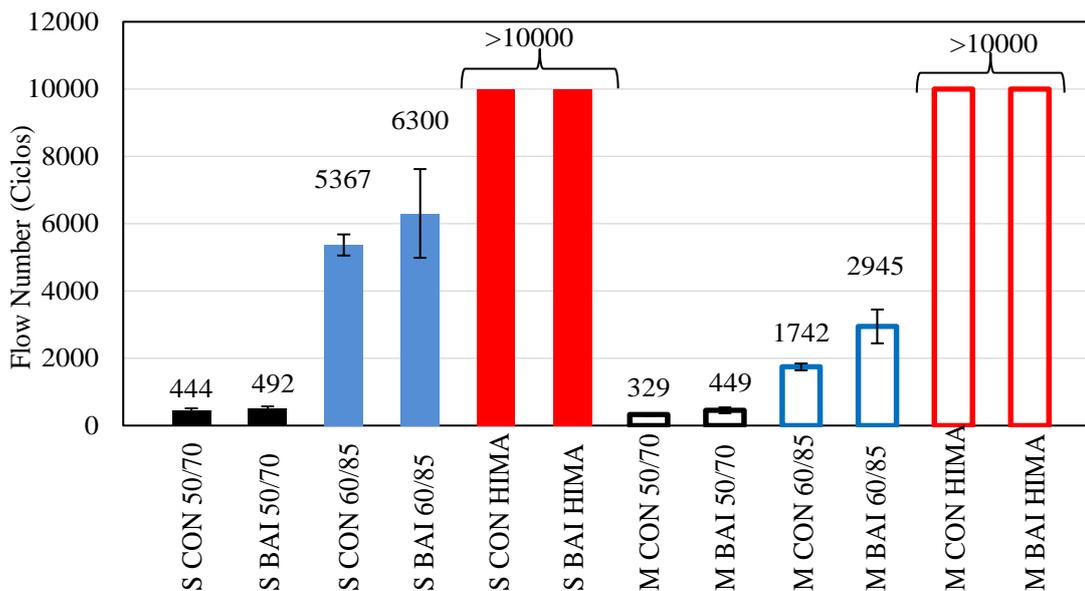
A Figura 6 mostra as curvas mestras de ângulo de fase ajustadas pelo modelo 2S2P1D. Nas altas frequências verifica-se que os maiores ângulos de fase são das misturas HIMA, seguida pelas misturas CAP 50/70 e AMP 60/85. Isso mostra que nas temperaturas mais baixa as misturas com AMP 60/85 são mais elásticas e as misturas HIMA menos elásticas. Com a diminuição da frequência, esse comportamento permanece inalterado até a frequência de 1 Hz, no qual nota-se uma inversão entre as misturas com CAP 50/70 e HIMA.

As misturas com ligante CAP 50/70 apresentaram os maiores valores de pico de ângulo de fase, reforçando que os ligantes sem modificação tendem a apresentar um comportamento mais viscoso. Nas misturas com ligante CAP 50/70 e AMP 60/85, a granulometria Bailey também conferiu as misturas um comportamento mais elástico.



**Figura 6** - Curvas mestras de ângulo de fase obtidas através da modelagem 2S2P1D

Os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida estão apresentados na Figura 7. É possível verificar uma influência significativa do tipo e teor do ligante asfáltico, pois quanto maior a modificação no ligante asfáltico por polímero SBS maior o *FN* das misturas em decorrência da melhor absorção dos esforços e da maior recuperação elástica que as modificações conferem ao concreto asfáltico. As misturas com ligante CAP 50/70 apresentaram os menores *FN*, enquanto as misturas com ligante AMP 60/85 valores intermediários e as misturas com ligante HIMA não atingiram a deformação de 5% em 10000 ciclos.

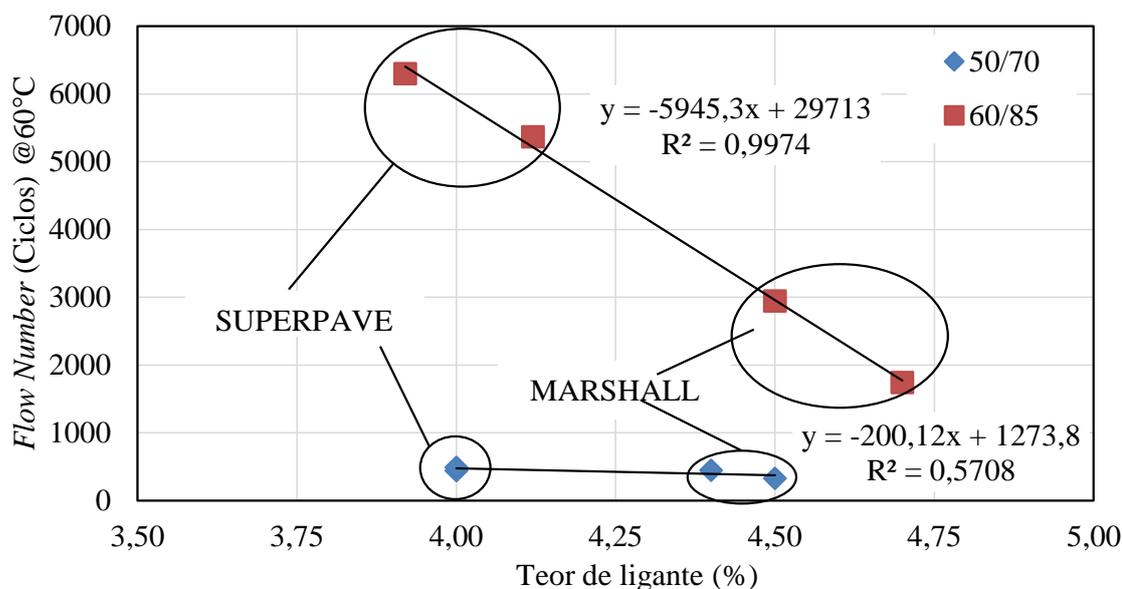


**Figura 7:** Flow Number obtido para as 12 misturas asfálticas

Segundo os critérios de Nascimento (2008), as misturas com o ligante CAP 50/70 seriam adequadas para um tráfego médio de  $3 \times 10^6$  a  $1 \times 10^7$  ( $300 < FN < 750$ ), enquanto as demais misturas com ligante modificado, compatíveis com um tráfego pesado de  $1 \times 10^7$  a  $3 \times 10^7$  ( $FN > 750$ ). Tendo em vista os limites propostos pelo autor, reforça-se a necessidade da modificação do ligante asfáltico para resistir a deformação permanente para atingir níveis elevados de tráfego. Entretanto, ressalta-se que maiores variações no teor de ligante asfáltico e alterações na forma, mineralogia, angularidade e textura dos agregados podem modificar a classificação quanto ao tipo de tráfego.

Para os limites propostos por Bastos *et al.* (2017), as misturas com ligante CAP 50/70 seriam classificadas para um tráfego pesado de  $1 \times 10^7$  a  $3 \times 10^7$  ( $300 < FN < 1000$ ), e as misturas com os ligantes modificados à um nível de tráfego extremamente pesado maior que  $3 \times 10^7$  ( $FN > 1000$ ).

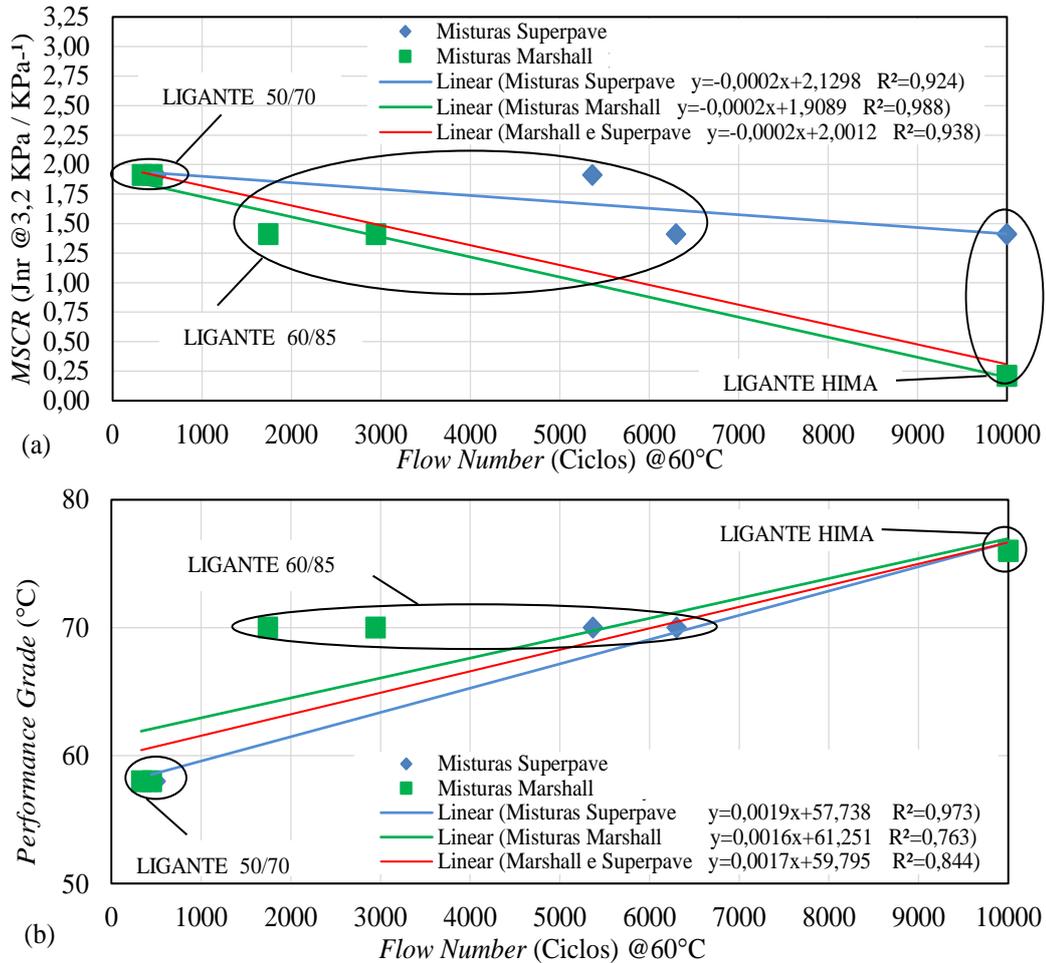
A variação no teor de ligante também influenciou consideravelmente os *FN* obtidos pelas misturas, exceto nas misturas com ligante HIMA até 10000 ciclos, que não se mostrou susceptível. Para as misturas com ligante CAP 50/70, a redução no teor de ligante aumentou de 10% a 111% o *FN*, enquanto que para o ligante AMP 60/85 a redução no teor aumentou o *FN* de 86% a 208%. A correlação *FN versus* teor de ligante, Figura 8, apresenta bons  $R^2$  e mostra uma maior susceptibilidade das misturas com ligante AMP 60/85 em relação à variação no teor. A modificação de 0,1% no teor de ligante das misturas com CAP 50/70 resulta em uma variação de aproximadamente 20 ciclos no *FN*, enquanto nas misturas com o ligante AMP 60/85 a variação é de 594 ciclos. A influência do teor de ligante na deformação permanente é reforçada por estudos como Brown *et al.* (2004) e Faccin (2018), que mostraram misturas com teor de campo acima do teor de projeto apresentaram maior afundamento em trilha de roda em pista



**Figura 8:** Correlação Teor de Ligante de projeto (%) e *FN* obtido nas misturas asfálticas

A partir da reologia dos ligantes é possível ter um indicativo da resistência à deformação permanente das misturas. A relação  $|G^*|/\sin \phi$  mostrou maior valor para o ligante HIMA,

seguido pelo AMP 60/85 e CAP 50/70, indicando uma maior recuperação elástica dos ligantes modificados na temperatura do ensaio uniaxial de carga repetida. Além disso, o parâmetro reológico  $J_{nr}$  obtido no ensaio *MSCR* e o *PG* de alta temperatura dos ligantes asfálticos também reforçaram os resultados encontrados, conforme Figura 9. Nota-se que os  $R^2$  obtidos indicam forte correlação do  $J_{nr}$  e do *PG* com a resistência à deformação permanente, tanto ao se analisar separadamente por método de dosagem como pelo conjunto todo de dados.



**Figura 9:** Correlação do  $J_{nr}$  (a) e *PG* de alta temperatura (b) dos ligantes com os *FNs*

A análise com foco na granulometria indica que o ajuste granulométrico proposto pelo método Bailey aumentou de 12% a 69% o *FN* médio das misturas, dentro do mesmo método de dosagem e tipo de ligante asfáltico. Nas misturas Marshall, cujos teores são mais elevados que nas misturas Superpave, o ganho de resistência com o método foi mais significativo. Em teores mais elevados a mistura é mais susceptível a se deformar, sendo que a resistência aumenta à medida que o esqueleto mineral forneça um maior intertravamento, propriedade conferida pelo método.

#### 4. CONCLUSÕES

Visando compreender a influência da modificação e variação do teor de ligante asfáltico e da granulometria no comportamento à rigidez e na deformação permanente, o artigo avaliou 12 misturas asfálticas através do módulo complexo e do ensaio uniaxial de carga repetida.

A modificação do ligante por polímero SBS e a granulometria BAI aumentaram a rigidez das misturas nas altas temperaturas. A variação no teor de ligante não alterou de forma significativa esta propriedade das misturas.

Em relação ao dano pelo ensaio uniaxial de carga repetida, modificação e a variação do teor de ligante asfáltico foram significativamente influentes na deformação permanente das misturas. Quanto maior a modificação do ligante asfáltico pelo polímero SBS e menor o teor de ligante maior a resistência à deformação permanente das misturas. Tais constatações são embasadas pelas fortes correlações encontradas entre os parâmetros reológicos e do teor dos ligantes asfálticos com os *FNs* das misturas.

Entretanto, salienta-se que cada material possui seu campo de aplicação que deve ser avaliado em conjunto com o projeto do pavimento, particularidades e fontes de materiais locais disponíveis e de outro tipo de dano como, a fadiga, e assim levar em consideração os aspectos de comportamento discutidos nesta pesquisa.

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem a Rede Temática de Asfalto/Petrobras pelo suporte a pesquisa e ao CNPq e CAPES pelo auxílio financeiro.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AASHTO (2013) *M 323 - Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C.
- AASHTO (2014) *M 332 - Standard Specification for Performance-Grade Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C.
- AASHTO (2013) *T 240 - Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C.
- AASHTO (2012) *T 313 - Standard Method of Test for Determining the Flexural Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C.
- AASHTO (2012) *T 315 - Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C.
- AASHTO (2013) *T 316 - Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C.
- ABNT (2006) *NBR 15086 – Materiais betuminosos - Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro- Apresentação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2016) *NBR 1650 – Misturas asfáltica– Resistência à deformação permanente utilizando ensaio uniaxial de carga repetida - Apresentação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2016) *NBR 6560 – Ligantes asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola - Apresentação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2007) *NBR 6576 – Misturas asfáltica– Determinação da penetração - Apresentação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ASPHALT INSTITUTE (2011) *The Bailey Method. Achieving Volumetrics and HMA Compactability*. Asphalt Institute. Instructor Bill Pine, Heritage Research Group. Lexington, K Y, January.
- ASTM D 2926-04 (2004). *Standard Practice Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall Apparatus*. American Society for Testing and Materials, USA.
- BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B.; NASCIMENTO, L. A. H. (2017) Critérios Para os Resultados do Ensaio Uniaxial de Carga Repetida de Misturas Asfálticas em Laboratório a partir do desempenho em Campo. *TRANSPORTES*, v. 25, n. 2, p. 19-40. DOI: 10.14295/transportes.v25i2.1284.
- BROWN, E.; HAININ, M.; COOLEY, A.; HURLEY. (2004). *NCHRP Report 531 Relationship of Air Voids, Lift Thickness, and Permeability in Hot Mix Asphalt Pavements*. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council. DOI: 10.17226/13777.

- DNER-ME 078 (1994) *Adesividade de Agregado Graúdo e Ligante Betuminoso*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT 031 (2006) *ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, RJ.
- DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. (2015) Comportamento de Fluência-Recuperação de Ligantes Asfálticos Modificados com Copolímero SBR e Ácido Polifosfórico. *TRANSPORTES*, v. 23, n. 2, p. 56-64. DOI:10.14295/Transportes.v23i2.800.
- DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L.; BERNUCCI, L. L. B. (2017) Characterization of the Rutting Potential of Modified Asphalt Binders and Its Correlation With the Mixture's Rut Resistance. *Construction and Building Materials*, v. 144, p. 207-213. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.171>.
- FACCIN, C. (2018) *Concretos Asfálticos em Utilização no Rio Grande do Sul: Comportamento Mecânico e Desempenho em Campo quanto à Deformação Permanente*. 222 p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- FERREIRA, J. L. S.; BASTOS, J. B.; S SOARES, J. B. (2015) Validação da Metodologia de Faixa de Agregados Dominantes para Avaliação e Especificação da Granulometria de Misturas Asfálticas Densas. *XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET*. Ouro Preto, MG.
- KUTAY, E. M.; JAMRAH, A.; BAYRAKTAROGLU, H. (2017) Analysis of Flow Number Test Data on Asphalt Mixtures from Michigan for use in Pavement Mechanistic-Empirical Software. *96th Annual Meeting TRB Committee*. Washington, D. C.
- MENDES, L. O.; MARQUES, G. L. O. (2012) Avaliação da Influência do Método Bailey no Processo de Dosagem e Desempenho de Misturas Asfálticas. *TRANSPORTES*, v. 20, n. 4, p. 35-43. DOI: 10.4237/transportes.v20i4.574.
- NASCIMENTO, F. A. C.; GUIMARÃES, A. C. R.; CARNEIRO, L. A. V. (2015) Análise da Influência das Propriedades do Ligante Asfáltico e do Esqueleto Pétreo na Deformação Permanente de Misturas Asfálticas. *34ª Reunião Anual de Pavimentação*. Foz do Iguaçu, PR.
- NASCIMENTO, L. A. (2008) *Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente*. 204 p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- NCHRP (2011) *A manual for design of hot mix asphalt with commentary*. 285 p. *Cooperative Highway Research Program* (NCHRP Report 673). National Cooperative Highway Research Program, Washington.
- SPECHT, L. P.; BABADOPULOS, A. L.; DI BENEDETTO, H.; SAUZEAT, C.; SOARES, J. B. (2017) Application of the Theory of Viscoelasticity to Evaluate the Resilient Modulus Test in Asphalt Mixes. *Construction and Building Materials*, v. 149, p. 648-658. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.037>.
- SHINOHARA, K, J, C. (2017) *Efeito da Modificação do Ligante pelo Polímero EVA no Concreto Asfáltico e sua Influência no Dimensionamento do Pavimento*. 270p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- ZHANG, J.; ALVAREZ, A. E.; LEE, S. I.; TORRES, A.; WALUBITA, L. F. (2013) Comparison of flow number, dynamic modulus, and repeated load tests for evaluation of HMA permanent deformation. *Construction and Building Materials*, v. 44, p. 391-398. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.013>.

---

Fernando Dekeper Boeira (fernando.d.boeira@gmail.com)

Pedro Orlando Borges de Almeida Júnior (engcivilpedro@hotmail.com)

Tatiana Cureau Cervo (cervo.tatiana@gmail.com)

Deividi da Silva Pereira (dsp@ufsm.br)

Chaveli Brondani (chavelib@gmail.com)

Centro de Tecnologia, Departamento de Transportes, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Av. Roraima, 1000 – Santa Maria, RS, Brasil