

# AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM ASFALTO BORRACHA POR MEIO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO SIMPLES A ALTURA CONSTANTE

Liseane Padilha Thives<sup>1</sup>

Jorge Carvalho Pais<sup>2</sup>

Glicério Trichês<sup>1</sup>

Paulo A. A. Pereira<sup>2</sup>

Universidade Federal de Santa Catarina<sup>1</sup> e Universidade do Minho<sup>2</sup>  
Departamento de Engenharia Civil

## RESUMO

A deformação permanente de misturas asfálticas é um defeito frequente que ocorre nas camadas de revestimento de pavimentos flexíveis, especialmente em regiões de elevadas temperaturas, as quais o Brasil está inserido. Dentre os ensaios de laboratório para determinação da resistência à deformação permanente, o Ensaio de Cisalhamento Simples a Altura Constante representa de forma fidedigna o fenômeno que ocorre em campo, ou seja, a deformação plástica por cisalhamento sem variação de volume. Este trabalho apresenta os resultados de laboratório de uma investigação conduzida para avaliar a deformação permanente de misturas asfálticas com asfalto borracha. Foram utilizadas três curvas granulométricas diferentes e asfaltos borracha provenientes do sistema *terminal blend* e *continuous blend*. Os resultados são expressos em termos de vida à deformação permanente (eixos simples de 80 kN) de forma a gerar rodeiras de 12,7 mm e de 20,0 mm nas misturas ensaiadas. Como resultado, as misturas com asfalto borracha exibiram maior vida à deformação permanente em relação à mistura convencional em até dezesseis vezes.

## ABSTRACT

Permanent deformation (rutting) of asphalt mixtures is a frequent defect that occurs in the surface layer of flexible pavements, mainly in high temperatures regions, as Brazil. Among the laboratory tests to determine the resistance to permanent deformation, the Simple Shear Test at Constant Height represents a reliable way to describe the same phenomenon that occurs in the field, that is, the shear plastic deformation without volume variation. This research presents the laboratory results of an investigation conducted to evaluate the permanent deformation of asphalt mixtures using asphalt rubber. For asphalt mixtures, three different granulometric curves and asphalts rubber from the terminal and the continuous blend systems were used. The results are expressed in terms of permanent deformation life (axes of 80 kN) in order to generate depressions of 12.7 mm and 20.0 mm in the tested mixtures. As a result, asphalt rubber mixtures presented the longest permanent deformation life in comparison to the conventional mixtures in up to sixteen times.

## 1. INTRODUÇÃO

O asfalto é o principal aglutinante usado na produção de misturas asfálticas utilizadas como revestimento de pavimentos flexíveis. Devido à sua viscoelasticidade, a camada de revestimento está propensa a deformações quando cargas pesadas do tráfego são aplicadas em elevadas temperaturas. O acúmulo de deformações irreversíveis leva à deformação permanente da camada de revestimento (Aksoy e Iskender, 2008; Yang, 2011; Xu *et al.*, 2014). Estudos indicaram que efeitos de temperaturas e de tensões superiores a 50°C e 0,70 MPa, respectivamente, levam o aumento exponencial da deformação permanente em campo (Sousa *et al.*, 1994; Javilla *et al.*, 2017).

Diversos parâmetros e fatores relativos à composição da mistura asfáltica (asfalto e agregados), bem como as condições locais afetam a deformação permanente, sendo os principais listados na Tabela 1 (Sousa *et al.*, 1991).

A deformação permanente é um defeito comum em pavimentos flexíveis que afeta a qualidade ao rolamento e eleva os custos de manutenção (Ahmad *et al.*, 2011). Os

afundamentos podem ainda podem reter água, de modo que 5,0 mm de lâmina de água são suficientes para levar os veículos à aquaplanagem, especialmente os carros de passeio, tornando a direção insegura na presença deste defeito (Javilla *et al.*, 2017).

**Tabela 1:** Fatores das misturas que afetam a deformação permanente (Sousa *et al.*, 1991)

| Parâmetro        | Fator                           | Mudança do fator              | Efeito na resistência à deformação permanente |
|------------------|---------------------------------|-------------------------------|---|
| Agregado         | Textura superficial             | Lisa para rugosa              | Aumenta                                       |
|                  | Gradação                        | Descontínua para contínua     | Aumenta                                       |
|                  | Forma                           | Redonda para angular          | Aumenta                                       |
| Asfalto          | Tamanho                         | Aumento do tamanho máximo     | Aumenta                                       |
|                  | Rigidez <sup>(i)</sup>          | Aumento                       | Aumenta                                       |
| Mistura          | Porcentagem de asfalto          | Aumento                       | Diminui                                       |
|                  | Volume de vazios <sup>(1)</sup> | Aumento                       | Diminui                                       |
|                  | VAM <sup>(2)</sup>              | Aumento                       | Diminui <sup>(3)</sup>                        |
| Condições locais | Temperatura                     | Aumento                       | Diminui                                       |
|                  | Estado de tensão/extensão       | Aumento da pressão de contato | Diminui                                       |
|                  | Repetição de cargas             | Aumento                       | Diminui                                       |
|                  | Água                            | Seco para molhado             | Diminui se a mistura for sensível à água      |

<sup>(1)</sup>Quando o volume de vazios for inferior a 3%, o potencial de deformação permanente das misturas aumenta; <sup>(2)</sup>Vazios no Agregado Mineral; <sup>(3)</sup>Valores muito baixos de VAM (inferiores a 10%) devem ser evitados.

Eisenmann e Hilmer (1987) mostraram que a deformação permanente que ocorre na camada de revestimento é causada, principalmente, pela deformação de fluência sem mudança de volume. Na abertura ao tráfego (fase inicial), o aumento da deformação irreversível que ocorre nos flancos dos pneus é superior do que nas zonas de irrompimento. Nesta fase inicial, a pós-compactação das camadas pelo tráfego tem uma grande importância no desenvolvimento da deformação permanente. Após a fase inicial, o volume do material deslocado pelos rodados é aproximadamente igual ao volume das zonas de irrompimento adjacentes. Isto é uma indicação que a compactação devida ao tráfego está completa e que a partir desta fase a deformação permanente é causada essencialmente por deslocamento com constância de volume. Esta fase é considerada representativa do comportamento da deformação permanente durante a vida do pavimento. Sousa *et al.* (1994) complementam que as deformações permanentes se devem essencialmente a dois fatores: (i) densificação da mistura devido à aplicação repetida das cargas dos veículos pesados; (ii) ação das tensões de cisalhamento que ocorrem junto da superfície dos pavimentos, por baixo dos flancos dos pneus.

Os ensaios de laboratório com a aplicação de cargas estáticas ou repetidas comumente utilizados para caracterizar a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas são os seguintes: (i) compressão simples; (ii) compressão triaxial; (iii) de cisalhamento. Os ensaios com cargas rolantes (*Orniéreur* e *Wheel Tracking*) também têm sido muito utilizados.

Da investigação conduzida por Sousa *et al.* (1994) pôde-se concluir que a deformação permanente que ocorre nas camadas se deve essencialmente ao fenômeno de deformação plástica por cisalhamento sem variação de volume, causada por tensões de cisalhamento existentes junto ao limite da área de contato entre os pneus dos veículos pesados e o pavimento. O fenômeno de deformação plástica por cisalhamento sem variação de volume é bem representado pelo ensaio de cisalhamento simples a altura constante (*Repeated Simple Shear Test at Constant Height – RSST-CH*). O *Strategic Highway Research Program* (SHRP)

desenvolveu o procedimento do ensaio RSST-CH, padronizado pela norma AASHTO TP7 01.

Para avaliar a resistência à deformação permanente, os ensaios de laboratório devem reproduzir às condições de temperatura encontradas em campo. De acordo com Sousa *et al.* (1994), para simular a situação mais gravosa para a ocorrência de deformações permanentes do revestimento, os ensaios devem ser realizados a uma temperatura igual à temperatura média verificada nos sete dias mais quentes do ano, medida a aproximadamente 2 cm de profundidade. As temperaturas dos ensaios comumente utilizadas para avaliação permanente de misturas asfálticas têm sido de 50°C a 60°C (Bonnot, 1986).

Os asfaltos modificados têm sido utilizados para aumentar a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas, uma vez que interferem na reologia melhorando suas propriedades (Chen e Xu, 2010; Shafabakhsh *et al.*, 2014; Katman *et al.*, 2015). A avaliação das características mecânicas através dos ensaios de deformação permanente das misturas asfálticas com asfalto borracha em laboratório é realizada da mesma maneira que para as misturas convencionais. No entanto, o ensaio RSST-CH mostrou ser mais rigoroso em relação aos demais.

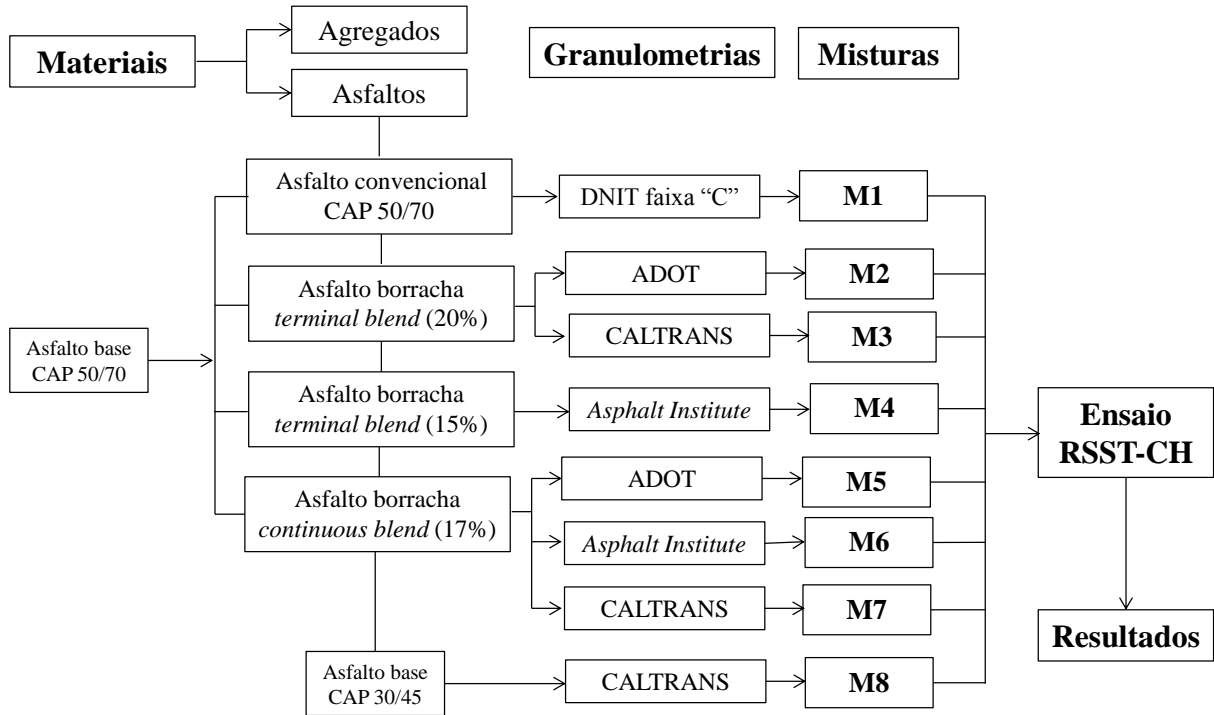
Sousa *et al.* (1999) avaliaram a deformação permanente de misturas convencionais e com asfalto borracha em laboratório com dois tipos de ensaios. Os ensaios realizados com o *wheel tracking* indicaram que as misturas convencionais apresentaram maior resistência à deformação permanente em relação às misturas com asfalto borracha. No entanto, no ensaio RSST-CH, a mistura convencional apresentou uma vida à deformação permanente de  $1,1 \times 10^6$  (eixo padrão de 80 kN), enquanto que a mistura com asfalto borracha obteve  $2,4 \times 10^6$  para o mesmo eixo e rodeiras de 12,5 mm. Zhang *et al.* (2002) investigaram três tipos de ensaios (APA – *Asphalt Pavement Analyzer*; RSST-CH; compressão simples com a aplicação de cargas repetidas – *Creep*) e concluíram que existe uma boa correlação entre os três, sendo que as misturas apresentaram comportamento semelhantes nos ensaios com o RSST-CH e com o APA. Nourelhuda *et al.* (2000) validaram os resultados do ensaio RSST-CH com um simulador de tráfego em escala real. Os trechos executados com revestimento em asfalto borracha apresentaram menores rodeiras em relação aqueles com asfalto convencional, quando submetidos a uma carga de eixo de 670 N. No entanto, esse comportamento inverteu-se para carga de eixo de 890 N. Dantas Neto (2004) avaliou a resistência à deformação permanente com o ensaio RSST-CH, nas temperaturas de 50°C e 60°C, de misturas com asfalto borracha e mistura convencional. O autor concluiu que as misturas com asfalto borracha apresentaram elevada resistência mesmo para porcentagens de asfalto e de volume de vazios mais elevadas que a mistura convencional.

A maior parte das regiões brasileiras está submetida a elevadas temperaturas. Sendo a deformação permanente um defeito relacionado às elevadas temperaturas, a avaliação deste parâmetro de resistência é extremamente importante. Este trabalho tem como objetivo avaliar a vida à deformação permanente de misturas asfálticas com asfalto borracha em relação a uma mistura produzida com asfalto convencional, de referência. Foi utilizado o ensaio de cisalhamento simples à altura constante (RSST-CH) tendo em conta ser um ensaio considerado rigoroso em relação a outros comumente utilizados.

## **2. MATERIAIS E MÉTODO**

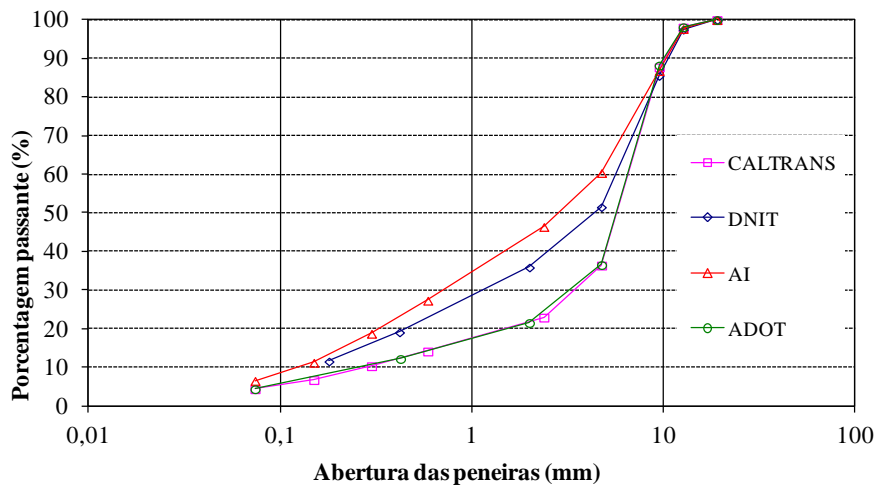
A metodologia utilizada está ilustrada na Figura 1. Foram utilizados agregados de origem

granítica, sendo: agregado 1 – tamanho nominal de 6,0 a 12,0 mm; agregado 2 – tamanho nominal de 4,0 a 10,0 mm, agregado 3 – tamanho nominal inferior a 4,0 mm e filer calcário. Foram realizados ensaios de caracterização dos agregados (abrasão Los Angeles, forma, absorção, densidade e granulometria). Os agregados se mostraram aptos à produção de misturas asfálticas.



**Figura 1:** Metodologia do trabalho

Nesse trabalho foram produzidas misturas com asfalto borracha com as seguintes granulometrias: *Asphalt Institute* AI – tipo IV; ADOT AR-AC – *Asphalt Rubber Asphalt Concrete* e CALTRANS ARHM-GG – *Asphalt Rubber Hot Mix – Gap Graded*. A granulometria selecionada para produção da mistura de referência com asfalto convencional foi Concreto Asfáltico faixa “C” (DNIT – ES 031/2006). As curvas granulométricas são apresentadas na Figura 2 (AI, 1989; CALTRANS, 2003; ADOT, 2005; BRASIL, 2006).



**Figura 2:** Curvas granulométricas

A dosagem das misturas foi realizada por meio da metodologia Marshall. Foi utilizado asfalto borracha tipo *continuous blend*, produzido em laboratório com uma porcentagem de 17% de borracha incorporada num tempo de digestão de 90 minutos e temperatura de 180°C. Este tipo foi produzido com asfaltos base CAP 50/70 e CAP 30/45. Os asfaltos borracha tipo *terminal blend*, provenientes de distribuidora de asfalto, têm 15% e 20% de borracha incorporada e asfalto base CAP 50/70. A borracha utilizada é do tipo ambiente. No estudo foram produzidas oito misturas asfálticas diferentes, cujas características estão apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2:** Características das misturas asfálticas

| Mistura | Asfalto base | Porcentual de borracha | Tipo de asfalto         | Granulometria            | Teor de asfalto | Volume de vazios |
|---------|--------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|------------------|
| M1      | CAP 50/70    | -                      | Convencional            | DNIT                     | 5,0%            | 4,0%             |
| M2      | CAP 50/70    | 20%                    | <i>Terminal blend</i>   | ADOT                     | 7,5%            | 6,0%             |
| M3      | CAP 50/70    | 20%                    | <i>Terminal blend</i>   | CALTRANS                 | 7,5%            | 6,0%             |
| M4      | CAP 50/70    | 15%                    | <i>Terminal blend</i>   | <i>Asphalt Institute</i> | 6,0%            | 5,0%             |
| M5      | CAP 50/70    | 17%                    | <i>Continuous blend</i> | ADOT                     | 7,5%            | 6,0%             |
| M6      | CAP 50/70    | 17%                    | <i>Continuous blend</i> | <i>Asphalt Institute</i> | 7,0%            | 5,0%             |
| M7      | CAP 50/70    | 17%                    | <i>Continuous blend</i> | CALTRANS                 | 8,0%            | 6,0%             |
| M8      | CAP 30/45    | 17%                    | <i>Continuous blend</i> | CALTRANS                 | 8,0%            | 6,0%             |

Após a formulação, as misturas asfálticas foram produzidas em misturadora e moldadas em lajes (placas com dimensões 75 cm de comprimento, 49 cm de largura e 8 cm de espessura) para a obtenção dos corpos de prova. A compactação seguiu o preconizado pela norma AASHTO PP3 (1994) e foi realizada com um rolo liso de médio porte (modelo WACKER RS-800 com massa total de 861 kg).

Após a compactação, as lajes permaneceram no molde até completo resfriamento. Para os ensaios de deformação permanente, de cada laje foram extraídos oito corpos de prova com 15,0 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura através de sonda rotativa. No total, foram produzidos 64 corpos de prova, cuja seleção para obtenção de amostras homogêneas foi feita através da medição das dimensões e da densidade aparente de cada corpo de prova (metodologia da balança hidrostática).

### 2.1. Ensaio RSST-CH

O ensaio RSST-CH utiliza corpos de prova cilíndricos cujas dimensões (diâmetro e a altura) dependem do diâmetro máximo do agregado. Para realização do ensaio, os corpos de prova são colados aos pratos do equipamento, de modo a evitar movimentos laterais e as consequentes variações de volume. A colagem dos corpos de prova é realizada em uma prensa, ilustrada na Figura 3.

Durante a colagem é mantido o alinhamento paralelo dos pratos e a prensa aplica uma pressão de 35 kPa. O equipamento utilizado (modelo CS 75005) é apresentado na Figura 4. Nos corpos de prova são montados transdutores de deslocamentos (LVDT) na direção horizontal, que permitem medir seu deslocamento relativo e obter a deformação de cisalhamento. Aos pratos são ligados dois atuadores hidráulicos que impõem um estado de tensão uniforme.

Na condução do ensaio, um atuador é mantido estático enquanto que o outro efetua movimentos horizontais pulsatórios. O atuador horizontal controla a magnitude das tensões de cisalhamento, enquanto o atuador vertical garante que o corpo de prova, ensaiado sob uma condição de tensão controlada, mantenha a altura constante durante o ensaio. O carregamento

repetido (tensão de cisalhamento de 70 kPa) imposto ao corpo de prova é caracterizado por um período de carga de 0,1 s e por um período de repouso de 0,6 s, em controle de carga. Os níveis de tensão adotados estão em acordo com as normativas do ensaio.



(a) Prensa de colagem

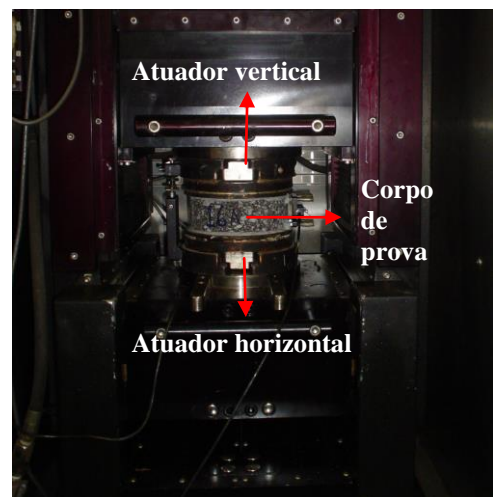


(b) Corpo de prova colado aos pratos

**Figura 3:** Corpo de prova na prensa e colado aos pratos



(a) Aquisição e dados e equipamento



(b) Pratos e corpo de prova no equipamento

**Figura 4:** Equipamento para o ensaio RSST-CH

De acordo com a norma AASHTO TP7-01, o ensaio RSST-CH é conduzido até que o corpo de prova atinja a deformação de cisalhamento de 0,04545, a qual equivale a um valor limite para a rodeira (afundamento) de 12,7 mm.

A evolução da deformação de cisalhamento ( $\gamma_p$ ) com o número de ciclos de carga aplicados no ensaio é expressa pela Equação 1.

$$\gamma_p = K_1 \times N^{K_2} \quad (1)$$

em que  $\gamma_p$ : deformação de cisalhamento, medida no ensaio [mm];

$K_1, K_2$ : constantes experimentais;

$N$ : número de ciclos de carga aplicados ao corpo de prova no ensaio.

Considerando as deformações de cisalhamento medidas no ensaio RSST-CH, a rodeira

produzida é calculada. A relação entre a máxima deformação de cisalhamento produzida no corpo de prova e as rodeiras é calculada através da Equação 2.

$$\delta_{\text{rodeiras}} = 279,40 \times \gamma_p \quad (2)$$

em que  $\delta_{\text{rodeiras}}$ : espessura das rodeiras [mm];  
 $\gamma_p$ : deformação de cisalhamento, medida no ensaio [mm].

O ensaio RSST-CH permite estabelecer uma lei de deformação permanente das misturas asfálticas em função da temperatura. A relação entre o número máximo de ciclos do eixo padrão de 80 kN ( $ESAL_{\text{mrd}}$ ) em função do número de ciclos de carga aplicados no ensaio ( $N_{\text{mpss}}$ ), de modo que o corpo de prova atinja a deformação de cisalhamento limite de 0,4545, é representada pela Equação 3.

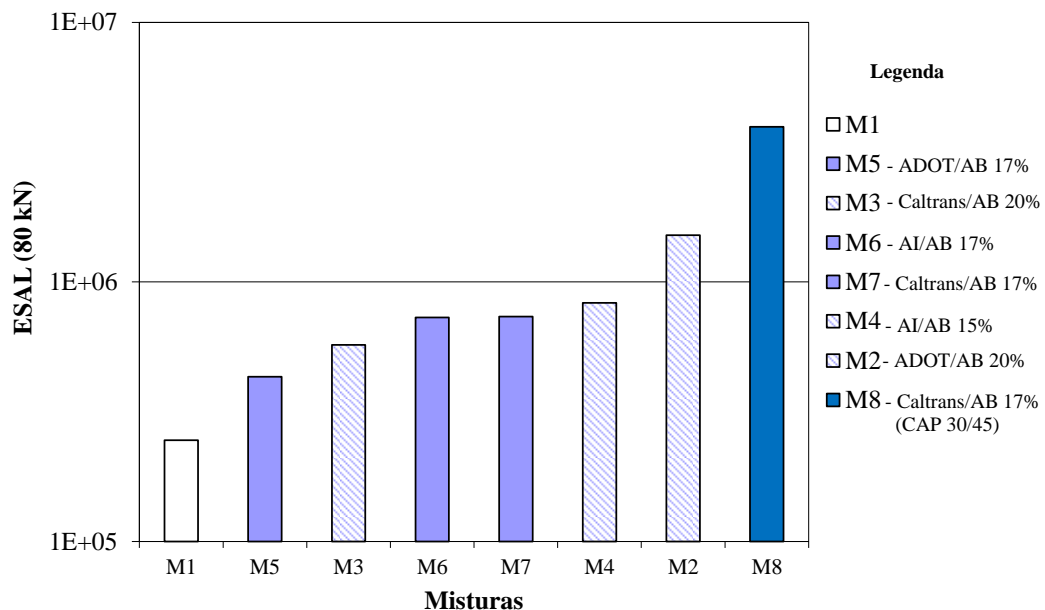
$$ESAL_{\text{mrd}} = 10^{\frac{4,36 + \log N_{\text{mpss}}}{1,24}} \quad (3)$$

em que  $ESAL_{\text{mrd}}$ : número de ciclos do eixo padrão de 80 kN para atingir a rodeira de 12,7 mm;  
 $N_{\text{mpss}}$ : número de ciclos do ensaio RSST-CH para o corpo de prova atingir a deformação máxima de 0,4545.

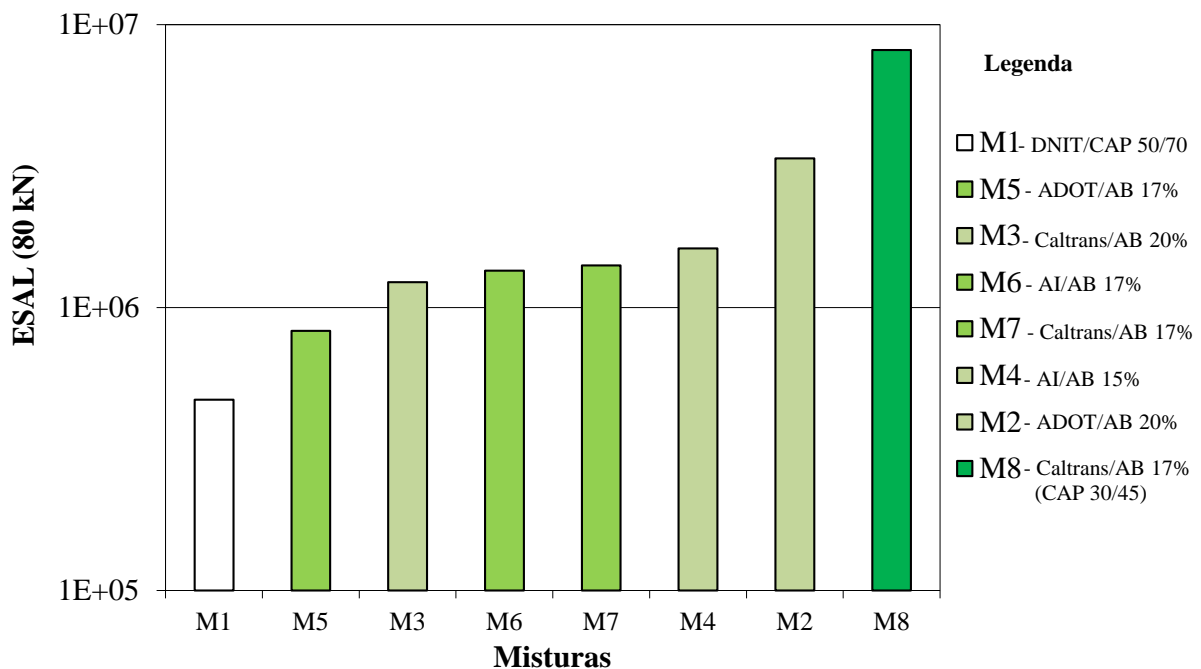
Assim, o resultado do ensaio consiste em medir a deformação permanente de cisalhamento acumulada ao longo do ensaio relacionada com o número de eixos que a produz.

### 3. RESULTADOS

A Figura 5 mostra os resultados da vida à deformação permanente, relacionando o ESAL (eixos simples de 80 kN) para gerar uma rodeira de 12,7 mm nos corpos de prova. Dependendo da norma rodoviária, a profundidade especificada como limite pode ser superior a 12,7 mm. Assim, os valores de ESAL também foram calculados para a profundidade de 20,0 mm, como apresenta a Figura 6. Os resultados correspondem à média obtida de oito corpos de prova para cada mistura asfáltica e os ensaios foram conduzidos na temperatura de 60°C.



**Figura 5:** Vida à deformação permanente para rodeiras de 12,7 mm



**Figura 6:** Vida à deformação permanente para rodeiras de 20,0 mm

De acordo com os resultados da vida à deformação permanente (Figuras 5 e 6) pode-se observar que a mistura produzida com o asfalto convencional CAP 50/70 (M1) apresentou um desempenho inferior quando comparada às misturas com asfalto borracha, indicando maior susceptibilidade destas misturas no respeitante à resistência à deformação permanente. Considerando que o aumento no teor de asfalto poderia prejudicar o desempenho à deformação permanente, no caso das misturas com asfalto borracha, os resultados são satisfatórios, considerando que a porcentagem de asfalto utilizada na produção destas misturas foi consideravelmente superior àquela utilizada na produção da mistura convencional e ainda, com maior volume de vazios.

Quanto ao tipo de asfalto borracha utilizado, pode-se afirmar que as misturas produzidas com asfaltos do tipo *terminal blend* apresentaram um desempenho superior em relação às outras, com exceção da mistura M3.

Com relação ao asfalto base, um asfalto mais duro (CAP 30/45) melhora a resistência à deformação permanente comparativamente ao asfalto base CAP 50/70. No entanto, o uso de asfaltos base mais duros podem levar ao aumento do custo de produção do asfalto borracha. Por outro lado, o uso do asfalto base CAP 50/70 na produção dos asfaltos borracha mostrou resultados adequados em relação à deformação permanente, neste ensaio de laboratório. Assim, dependendo da aplicação, o uso de um asfalto base 50/70 poderia ser suficiente, embora, o uso de um asfalto base mais duro como o 30/45, de acordo com os testes, resultará em um desempenho superior à deformação permanente.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo laboratorial de avaliação da vida à deformação permanente de misturas asfálticas com asfalto borracha. Foram utilizados asfalto base CAP 50/70 e 30/45. Os asfaltos borracha são provenientes dos sistemas *terminal blend* (produzido em distribuidora) e *continuous blend* (produzido em laboratório). Foram utilizadas três tipos



de granulometria. Uma mistura produzida com asfalto convencional CAP 50/70 foi utilizada como referência com granulometria especificada pelo DNIT. Os ensaios foram conduzidos na temperatura de 60°C por meio do ensaio de cisalhamento simples a altura constante (*Repeated Simple Shear Test at Constant Height – RSST-CH*). O resultado do ensaio é expresso em termos de vida relativa ao eixo padrão de 80 kN. O ensaio foi conduzido até que o corpo de prova atingiu a deformação de cisalhamento de 0,04545, a qual é equivalente ao afundamento de 12,7 mm. Considerando ser este ensaio gravoso, a vida à deformação permanente foi calculada também para rodeiras e 20,0 mm. Como resultado, a mistura convencional apresentou a menor vida (ESAL de  $2,45 \times 10^5$ ) para rodeiras de 12,7 mm. A mistura com asfalto borracha com melhor desempenho foi produzida com asfalto base CAP 30/45 (ESAL de  $3,96 \times 10^6$ ), o que representa um acréscimo de até quinze vezes. Todas as misturas com asfalto borracha apresentaram maior vida à deformação permanente em relação à mistura convencional de referência. Apesar do uso e comparativo entre misturas com granulometrias diferentes, observou-se que as misturas com asfalto borracha, para além de um melhor desempenho, têm uma vasta aplicação no respeitante à curva granulométrica. Com relação ao ensaio RSST-CH, destaca-se a importância da aplicação dos resultados em uma análise empírico-mecanicista de dimensionamento, uma vez que apresenta uma lei de vida à deformação permanente.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1994). *AASHTO PP3. Standard Specimens by Means of the Rolling Wheel Compactor Practice for Preparing Hot Mix Asphalt (HMA)*, USA.
- AASHTO (2001). *AASHTO TP7 01. Standard Test Method for Determining the Permanent Deformation and Fatigue Cracking Characteristics of Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Simple Shear Test (SST) Device*, USA.
- ADOT (2005). *Construction Manual, Section 414 AR AC (Asphalt Rubber Asphaltic Concrete)*. Arizona Department of Transportation (ADOT), Arizona, USA.
- AI (1989). *The Asphalt Handbook, Manual Series n° 4 (MS 4) 1989 Edition*. Asphalt Institute, Kentucky, USA.
- Ahmad J.; R. M. Y Abdul e M. R Hainin (2011). Rutting evaluation of dense graded hot mix asphalt mixture. *International Journal of Engineering & Technology (IJET-IJENS)*, v. 11, n.05, p. 56-60.
- Aksoy A. e E. Iskender (2008). Creep in conventional and modified asphalt mixtures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*, v.161, issue 4, p. 185-195. ISSN 0965-092X.
- Bonnot J. (1986). Asphalt Aggregate Mixtures. *Transportation Research Record*, n. 1096. Transportation Research Board, USA.
- BRASIL (2006). *ES 031 Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Diretoria de Planejamento e Pesquisa/IPR. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CALTRANS (2003). *Standard Special Provisions*. State of California Department of Transportation, Sacramento, California, USA.
- Chen H. e Q. Xu (2010). Experimental study of fibers in stabilizing and reinforcing asphalt binder. *Fuel*, v.89, issue 7, p. 1616-1622. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.020>
- Dantas Neto S. A. (2004). Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados. *Tese de Doutorado*. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, DF, Brasil.
- Eisenmann J. e A. Hilmer (1987). Influence of wheel load and inflation pressure on the rutting effect at asphalt pavements – experiments and theoretical investigations. *Proceedings, Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, v. I, Ann Arbor, p. 392-403.
- Javilla B.; L. Mo; F. Hao; B. Shu e S. Wu (2017). Multi-stress loading effect on rutting performance of asphalt mixtures based on wheel tracking testing. *Construction and Building Materials*, v. 148, 1, p. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.182>
- Katman H. Y.; M. R. Ibrahim; M. R. Karim; N. S. Mashaan e S. Koting (2015). Evaluation of permanent deformation of unmodified and rubber-reinforced SMA asphalt mixtures using dynamic creep test. *Advances in Materials Science and Engineering*. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/247149>

- Nourelhuda M.; M. Mamlouk; G. Way e D. Forstier (2000). Accelerated testing of crumb rubber modified pavement. *Asphalt Rubber 2000 Proceedings*. Vilamoura, Portugal.
- Shafabakhsh, G.H.; M. Sadeghnejad e Y. Sajed (2014). Case study of rutting performance of HMA modified with waste rubber powder. *Case Studies in Construction Materials*, 1, p. 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2014.04.005>
- Sousa J. B.; J. Craus; C. L. Monismith (1991). *Summary report on permanent deformation in asphalt concrete*. SHRP-A/IR-91-103. Strategic Highway Research Program. National Research Council, Washington, D.C., USA.
- Sousa J. B.; M. Solaimanian e S. L. Weissman (1994). *Development and use of the repeated shear test (constant height): an optional Superpave mix design tool*. SHRP-A-698. Strategic Highway Research Program. National Research Council, Washington, D.C., USA.
- Sousa J. B.; P. Fonseca; A. Freire e Pais J. C. (1999). Comparação da vida à fadiga e deformação permanente entre misturas com betume modificado com borracha reciclada de pneus convencionais. *Relatório Consulpav EST 99-07*. Portugal.
- Yang Q. e J. Ning (2011). The environmental influence of asphalt pavement and countermeasures. *Energy Procedia*, v. 5, p. 2432-2436. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.418>
- Xu T.; H. Wang; Z. Li e Y. Zhao (2014). Evaluation of permanent deformation of asphalt mixtures using different laboratory performance tests. *Construction and Building Materials* v. 53, p. 561–567. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.015>
- Zhang J.; Cooley Jr. L. A. e P. S. Kandhal (2002). *Comparison of fundamental and simulative test methods for evaluating permanent deformation of hot mix asphalt*. NCAT Report 02-07, National Center for Asphalt Technology. Auburn University, Alabama, USA.

---

<sup>1</sup>Liseane Padilha Thives (liseane.thives@ufsc.br)

<sup>2</sup>Jorge Carvalho Pais (jpais@civil.uminho.pt)

<sup>1</sup>Glicério Trichês (glicério.triches@ufsc.br)

<sup>2</sup>Paulo António Alves Pereira (ppereira@civil.uminho.pt)

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina

Rua João Pio Duarte Silva 204, Florianópolis, SC, Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho

Campus de Azurém, Guimarães, Portugal