

Universidade do Minho

[CN-36]

Fontes, L.P.T.L., Pereira, P.A.A., Trichês, G., **Pais, J.C.**

“A influência da origem do betume no desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha”

5º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 12 – 14 de Março de 2008

A INFLUÊNCIA DA ORIGEM DO BETUME NO DESEMPENHO DE MISTURAS BETUMINOSAS COM BETUME MODIFICADO COM BORRACHA

LISEANE P. THIVES DA LUZ FONTES

Doutoranda da Universidade do Minho (Guimarães-Portugal) e da Universidade Federal de Santa Catarina (Florianópolis –Brasil)

PAULO PEREIRA

Professor Catedrático da Universidade do Minho

GLICÉRIO TRICHÊS

Professor da Universidade Federal de Santa Catarina

JORGE PAIS

Professor Auxiliar da Universidade do Minho

RESUMO

Os ensaios realizados em laboratório e as observações em serviço de misturas betuminosas com betume modificado com borracha têm demonstrado que estas misturas apresentam um desempenho claramente superior ao das misturas convencionais. Isto acontece porque a borracha utilizada para modificar o betume incorpora neste as suas componentes relativas à flexibilidade e contribuindo ainda para reduzir o envelhecimento do betume. A interação entre o betume e a borracha depende em larga escala das características destes dois elementos (betume e borracha) estando o desempenho do betume modificado com borracha dependente desta interação. A composição química e molecular do betume e da borracha define esta interação fazendo com que determinados betumes tenham mais aptidão para se ligarem a determinadas borrachas, reflectindo-se isto no comportamento dos betumes e das misturas betuminosas. Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da origem do betume nas características do betume modificado com borracha e, numa fase posterior, no desempenho das misturas betuminosas. Para este estudo foram utilizados dois betumes de origem Portuguesa e um de origem Brasileira com os quais se produziram betumes modificados com uma borracha de origem Portuguesa e outra de origem Brasileira. Os resultados obtidos permitem concluir que a origem do betume e a origem da borracha influenciam consideravelmente o desempenho das misturas betuminosas.

1. INTRODUÇÃO

A incorporação de borracha de pneus usados no betume para produção de misturas betuminosas, além de melhorar o seu desempenho, contribui também para o destino final adequado de um resíduo sólido, o pneu usado. Numa mistura betuminosa, a borracha granulada de pneus usados pode ser incorporada através de dois processos: (i) seco, no qual a borracha desempenha o papel de um agregado fino e uma pequena interação com o ligante; (ii) húmido, onde a borracha actua como um agente modificador, conferindo novas propriedades ao betume convencional.

Os benefícios da utilização de misturas betuminosas com betume modificado com borracha recorrendo ao processo húmido, evidenciados por diversos autores (Roberts et al., 1989; Hicks, 2002; Caltrans, 2003; Baker et al., 2003), são principalmente o aumento da resistência ao envelhecimento e oxidação, melhoria da resistência à fadiga e propagação de fendas e também maior resistência à deformação permanente.

A obtenção de borracha de pneus usados é realizada através da trituração à temperatura ambiente ou com temperaturas criogénicas, em que a trituração da borracha é feita a temperaturas negativas, inferiores a $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os dois processos resultam na obtenção de borracha com diversas granulometrias e diferentes características.

Considerando que o tipo de betume e o tipo da borracha influenciam as propriedades do betume-borracha e o conseqüentemente desempenho da mistura betuminosa (Baker et al., 2003) neste trabalho foram produzidos e avaliados três betumes-borracha utilizando dois betumes convencionais de origem portuguesa e um de origem brasileira e dois tipos de borracha granulada de pneus usados (uma do tipo criogénica, de procedência portuguesa, e outra do tipo ambiente, de origem brasileira). Os betumes-borracha produzidos em laboratório foram avaliados através dos seguintes ensaios: (i) penetração; (ii) ponto de amolecimento; (iii) viscosidade aparente; (iv) resiliência; (v) envelhecimento RTFOT (*Rolling Thin-Film Oven Test*).

Após a produção dos betumes-borracha, foram produzidas misturas betuminosas utilizando a granulometria *gap graded* do *California Department of Transportation* (Caltrans), para as quais foi avaliado o desempenho através da resistência à fadiga, com o ensaio de flexão simples em 4 pontos, e à deformação permanente, através do ensaio de corte simples cíclico repetido a altura constante (RSST-CH).

2. CARACTERIZAÇÃO DAS BORRACHAS E DOS BETUMES

Borrachas

De acordo com Hicks & Epps (2000), além da percentagem de borracha incorporada, as principais características da borracha que afectam as propriedades do betume-borracha são as seguintes: (i) processo de obtenção; (ii) superfície específica; (iii) granulometria (iv); composição química; (v) contaminantes (água, fibras, minerais, aço). A norma ASTM D 6114 (1997) fornece as especificações para a borracha granulada empregue na modificação dos betumes convencionais.

Os dois principais processos para obtenção de borracha granulada de pneus utilizada na modificação de betumes são o ambiente e o criogénico. O processo ambiente consiste na introdução dos pneus no granulador à temperatura ambiente, sendo a trituração dos pneus realizada por granuladores e moinhos (RRI, 2006). No caso do processo criogénico, são realizadas duas operações principais: (i) arrefecimento criogénico usando nitrogénio líquido para atingir e ultrapassar a temperatura de transição vítrea de todos os polímeros constituintes da borracha; e (ii) moagem criogénica com o emprego de moinhos de martelos especiais com muito alta energia de impacto, sob uma atmosfera inerte.

A análise granulométrica das borrachas ambiente e criogénica foi realizada de acordo com a norma ASTM C 136 (1996) adaptada com as recomendações constantes no *Greenbook* (2000), secção 203, na qual foi determinado que os teores de fibras e aço se encontram dentro das especificações. A superfície específica da borracha ambiente é de 19,27 m²/kg e da borracha criogénica de 13,61 m²/kg. A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas das duas borrachas estudadas.

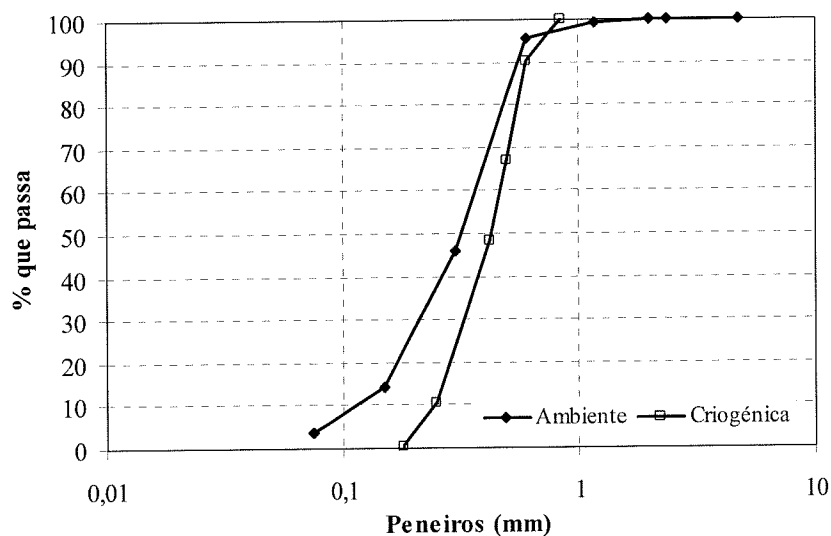


Figura 1 – Curvas granulométricas das borrachas

A granulometria da borracha possui um efeito relevante nas propriedades do betume-borracha. As partículas grossas de borracha aumentam a viscosidade do betume-borracha, enquanto que as partículas finas (que passam no peneiro nº 50) resultam em um menor tempo de digestão (Caltrans, 2005). O tempo de digestão é o termo utilizado para descrever o tempo necessário para promover a interação entre o betume e a borracha, quando misturados a elevadas temperaturas.

De acordo com os resultados obtidos, a borracha ambiente apresentou menores tamanhos granulares e uma superfície específica mais elevada que a borracha criogénica.

Betumes convencionais

Para produção dos betumes-borracha foram utilizados três betumes convencionais, sendo dois betumes portugueses PEN 35/50 (pt₁) e PEN 50/70 (pt₂) e o betume brasileiro CAP-50/70 (br₁), todos classificados por penetração. Para todos os betumes convencionais foram realizados ensaios de caracterização e os resultados são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Ensaios de caracterização dos betumes convencionais

| Ensaio | Norma | pt ₁ | pt ₂ | br ₁ |
|--------------------------------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm) | ASTM D 5 | 33 | 52,5 | 51,5 |
| Ponto de amolecimento* (°C) | ASTM D 36 | 52,7 | 48,0 | 51,5 |
| Viscosidade aparente** (cP) a 175 °C | ASTM D 2196 | 175 | 112 | 127 |
| RTFOT 163 °C, 85 minutos | ASTM D 2872 | | | |
| Varição em massa (% de massa) máx | | 0,2 | 0,2 | 0,3 |
| Aumento do PA (°C) máx | | 0,5 | 9,8 | 4,3 |
| Penetração 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm) | | 27,7 | 25,7 | 22,3 |
| Penetração retida (%) mín | | 84 | 49 | 43 |

* Método anel e bola; ** Viscosímetro Brookfield, *spindle* 27, 20 rpm.

Os resultados obtidos mostraram que o betume pt₁ é mais rígido que os outros, sendo que os betumes pt₂ e br₁ apresentaram características semelhantes. Os três betumes encontram-se dentro das especificações vigentes.

Betumes-borracha

No sistema húmido de produção do betume-borracha, quando a borracha é adicionada ao betume e misturada, sob agitação e a elevadas temperaturas, este betume modifica-se e passa a ter diferentes propriedades em relação ao betume original. A modificação deve-se a mudanças na composição do betume que ocorrem durante a interação entre o betume e a borracha.

A percentagem de borracha, a granulometria das partículas de borracha, o tempo e a temperatura de digestão são características que influenciam as propriedades físicas e reológicas como a viscosidade, o ponto de amolecimento e a recuperação elástica do betume modificado e, conseqüentemente, o desempenho da mistura betuminosa em serviço.

Neste estudo, os betumes-borracha foram produzidos através do sistema húmido com as seguintes características: (i) percentagem de borracha: 21%; (ii) tempo de digestão: 90 minutos; (iii) temperatura de digestão: 180 °C. A adição da borracha ao betume foi realizada por agitação com a utilização de um agitador mecânico.

Foram produzidos em laboratório os seguintes betumes-borracha:

- PT1: betume pt_1 (PEN 35/50) e borracha criogénica (materiais portugueses);
- PT2: betume pt_2 (PEN 50/70) e borracha criogénica (materiais portugueses); e
- BR1: betume br_1 (CAP-50/70) e borracha ambiente (materiais brasileiros).

A norma ASTM D 6114 (1997) especifica as características físicas para os betumes modificados com borracha. Os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização são apresentados no Quadro 2 e mostram que os ligantes produzidos encontram-se dentro dos limites especificados.

Quadro 2 – Ensaios de caracterização dos betumes-borracha

| Ensaio | Norma | Especificação | PT1 | PT2 | BR1 |
|------------------------------|-------------|---------------|------|------|------|
| Penetração* (0,1 mm) | ASTM D 5 | 25 a 75 | 16,8 | 26,7 | 26 |
| Ponto de amolecimento** (°C) | ASTM D 36 | 54,4 mín | 73,4 | 61,9 | 65 |
| Viscosidade aparente*** (cP) | ASTM D 2196 | 1500 mín | 2246 | 1821 | 2829 |
| Resiliência (%) | ASTM D 5329 | 20 | 49 | 16 | 40 |
| RTFOT 163 °C, 85 minutos | | | | | |
| Varição em massa (%) máx | | - | 0,9 | 0,1 | 0,3 |
| Aumento do PA (°C) máx | | - | 11,2 | 4,7 | 8,5 |
| Penetração* (0,1 mm) | ASTM D 2872 | - | 15,5 | 31,8 | 18,5 |
| Penetração retida (%) mín | | - | 92,2 | 100 | 71,1 |
| Viscosidade aparente*** (cP) | | - | 3925 | 4473 | 4800 |
| Resiliência (%) | | - | 56 | 40 | 46 |
| | | | | | |

*25 °C, 100g, 5s; ** Método anel e bola; *** 175 °C, Viscosímetro Brookfield, *spindle* 27, 20 rpm.

De acordo com o Quadro 2 foi possível observar que a borracha ambiente (menor granulometria e maior superfície específica), resultou em um betume-borracha (BR1) com viscosidade mais elevadas do que os betumes-borracha (PT1 e PT2) produzidos com a borracha criogénica (partículas de tamanhos maiores e menor superfície específica).

Dantas Neto (2004) ressalta que a diminuição da viscosidade ocorrida com a utilização de uma borracha com menor superfície específica pode ser atribuída à diminuição da área de contacto entre o betume e a borracha, tendo como consequência a diminuição das possíveis reacções entre estes dois materiais.

Para todos os betumes-borracha verificou-se que a incorporação da borracha, independente do tipo, diminuiu a penetração e aumentou o ponto de amolecimento em relação aos betumes convencionais. Em relação à resiliência, o betume-borracha PT1 apresentou uma tendência de melhor recuperação elástica em relação aos outros dois. O mesmo se verificou em relação ao ponto de amolecimento, sendo que o betume-borracha PT1 deverá ter uma maior resistência à deformação permanente.

Após o ensaio de envelhecimento, os betumes borracha apresentaram um aumento no ponto de amolecimento e uma redução da penetração. Em todos os casos houve perda de massa, factor este atribuído à perda de voláteis durante o processo de envelhecimento.

3. PRODUÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS COM BETUME-BORRACHA

A granulometria *gap graded* adoptada para produção das misturas betuminosas com betume-borracha foi a especificada pelo Caltrans, tipo ARHM-GG mix (*Asphalt Rubber Hot Mix Gap Graded*), de acordo com o *Standard Special Provisions*, SSP 39-400 (Caltrans, 2003).

A curva granulométrica tipo *gap graded* não apresenta uma granulometria contínua para todos os tamanhos de agregados, normalmente faltando uma ou duas fracções de agregados finos. Esta granulometria é utilizada para promover o contacto de grão a grão na mistura betuminosa, promovendo a estabilidade, a flexibilidade e a durabilidade (Hicks, 2002; Caltrans, 2003).

O Quadro 3 apresenta os limites granulométricos prescritos para a granulometria Caltrans ARHM-GG e a respectiva curva utilizada. A Figura 2 apresenta a curva granulométrica estudada e o fuso granulométrico especificado pelo Caltrans.

A determinação do teor óptimo de betume e dos parâmetros volumétricos das misturas betuminosas foi realizada através do método Marshall, de acordo com a norma ASTM D 1559 e os resultados obtidos são apresentados no Quadro 4. Foram utilizadas as seguintes nomenclaturas para as misturas betuminosas:

- MPT1: mistura *gap graded* com betume-borracha PT1;
- MPT2: mistura *gap graded* com betume-borracha PT2; e

- MBR1: mistura *gap graded* com betume-borracha BR1.

Quadro 3 – Granulometria da curva Caltrans ARHM-GG utilizada e as especificações

| Peneiros | | ARHM-GG | Curva utilizada |
|----------|-------|-------------|-----------------|
| pol./n° | mm | % que passa | % que passa |
| 3/4 | 19,0 | 100-100 | 100,00 |
| 1/2 | 12,7 | 90-100 | 98 |
| 3/8 | 9,5 | 78-92 | 88 |
| n° 4 | 4,8 | 28-42 | 36 |
| n° 8 | 2,4 | 15-25 | 23 |
| n° 30 | 0,6 | 10-20 | 14 |
| n° 50 | 0,3 | 7-15 | 10 |
| n° 100 | 0,15 | 5-10 | 7 |
| n° 200 | 0,075 | 2-7 | 4 |

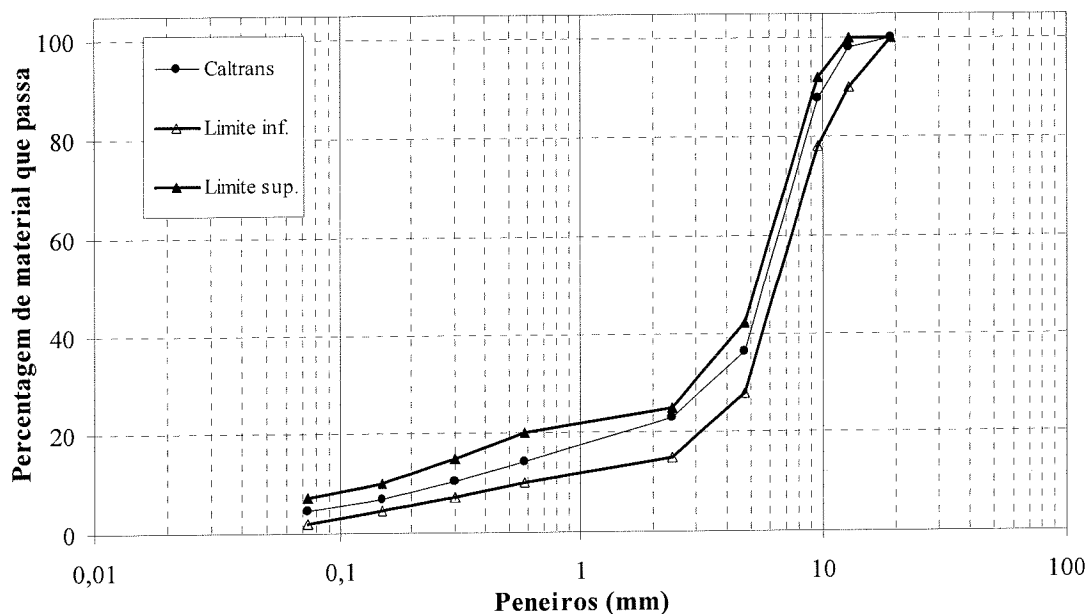


Figura 2 – Curva granulométrica Caltrans

Quadro 4 – Teor óptimo e volume de vazios

| Mistura | Teor óptimo de betume (%) | Volume de vazios (%) |
|---------|---------------------------|----------------------|
| MPT1 | 8,0 (7,0 a 9,0) | 6,0 (4,0 a 6,0) |
| MPT2 | 8,0 (7,0 a 9,0) | 6,0 (4,0 a 6,0) |
| MBR1 | 8,0 (7,0 a 9,0) | 6,0 (4,0 a 6,0) |

Os agregados utilizados são de origem granítica provenientes de uma pedreira de Guimarães. Os agregados foram avaliados através de ensaios de caracterização correntes e os resultados mostraram que podem ser utilizados na produção de misturas betuminosas. Além dos agregados pétreos, também foi utilizado um filer calcário de modo a satisfazer as exigências

granulométricas. Os agregados minerais utilizados possuem a seguinte designação granulométrica:

- brita 6/12 – tamanho nominal 6 a 12 mm;
- brita 4/10 – tamanho nominal 4 a 10 mm;
- pó 0/4 (pó de pedra) – tamanho nominal inferior a 4 mm.

Após a formulação das misturas foram produzidas as misturas e moldadas lajes (dimensões 75 cm de comprimento, 49 cm de largura e 8 cm de espessura) para a obtenção de provetes para os ensaios de desempenho. Para cada tipo de mistura betuminosa foram moldadas duas lajes, sendo uma para ensaios de módulo de deformabilidade e de resistência à fadiga e outra, para ensaio de deformação permanente.

Para os ensaios de fadiga e de módulo de deformabilidade, a laje foi serrada para obtenção de 9 provetes prismáticos com as seguintes dimensões: 38,0 x 5,0 x 6,3 cm. Para o ensaio de deformação permanente, 8 carotes com 15 cm de diâmetro e 5 cm de altura foram extraídos através do emprego de um carateador.

4. MÓDULO DE DEFORMABILIDADE E RESISTÊNCIA À FADIGA

Módulo de deformabilidade

Para a realização dos ensaios de módulo de deformabilidade e de resistência à fadiga foi utilizado um equipamento servo-hidráulico constituído por uma estrutura de carga, um grupo hidráulico e uma câmara climática, dentro da qual se encontra um dispositivo que permite a realização de ensaios de flexão em 4 pontos.

O ensaio do módulo de deformabilidade das misturas foi conduzido de acordo com a norma AASHTO TP8-94 utilizando o equipamento de flexão em 4 pontos. Nos provetes prismáticos foi aplicado um carregamento sinusoidal repetido a uma extensão máxima específica de tração na sua base de 100×10^{-6} . O ensaio foi conduzido a 20 °C e foram aplicadas as seguintes frequências: 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.2 e 0.1 Hz. Os resultados obtidos, ângulo de fase e módulo de deformabilidade, que representam a média de 9 provetes para todas as frequências aplicadas, são apresentados no Quadro 5. A Figura 3 apresenta o módulo de deformabilidade em função das frequências aplicadas.

Quadro 5 – Módulo de deformabilidade e ângulo de fase das misturas

| Frequência (Hz) | MPT1 | | MPT2 | | MBR1 | |
|-----------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|
| | Módulo de deformabilidade (MPa) | Ângulo de fase (°) | Módulo de deformabilidade (MPa) | Ângulo de fase (°) | Módulo de deformabilidade (MPa) | Ângulo de fase (°) |
| 10 | 5192 | 16,8 | 3357 | 28,0 | 4593 | 19,6 |
| 5 | 4537 | 19,7 | 2687 | 32,1 | 3926 | 23,2 |
| 2 | 3652 | 23,4 | 1890 | 37,7 | 3041 | 28,2 |
| 1 | 3034 | 26,2 | 1409 | 41,6 | 2434 | 32,0 |
| 0,5 | 2468 | 28,7 | 1018 | 44,6 | 1892 | 35,8 |
| 0,2 | 1840 | 32,4 | 635 | 47,7 | 1306 | 41,2 |
| 0,1 | 1438 | 34,9 | 453 | 50,6 | 950 | 43,6 |

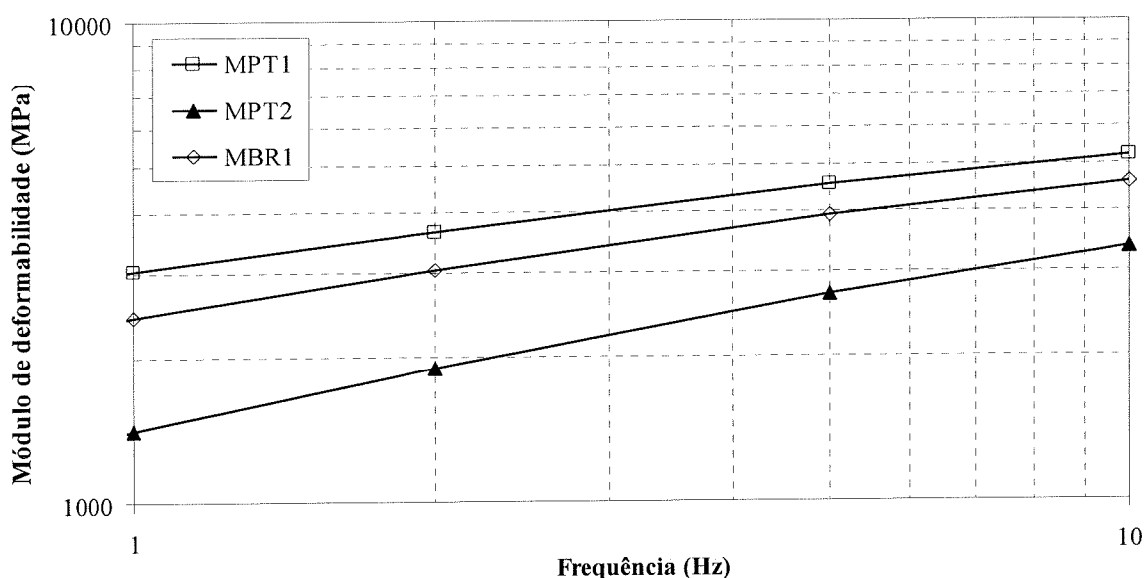


Figura 3 – Módulo de deformabilidade das misturas

Para todas as frequências, a mistura MPT1, que possui como betume convencional base o tipo PEN 35/50 e, portanto, mais rígido, apresentou um módulo de deformabilidade mais elevado que as outras misturas. Comparando-se as misturas MPT2 e MBR1, que foram produzidas com um betume convencional do mesmo tipo (PEN 50/70), mas de origens diferentes, observa-se que a mistura MBR1 possui os módulos superiores. Quanto ao ângulo de fase, indicador das propriedades elásticas e viscosas dos materiais betuminosos, os resultados mostraram que a mistura MPT2 apresentou os valores mais elevados.

Resistência à fadiga

O ensaio utilizado para avaliação da resistência à fadiga foi o de flexão em 4 pontos sobre vigas prismáticas, conforme preconiza a norma AASHTO TP8-94 (*Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated*

Flexural Bending). Foram realizadas 3 repetições para cada um dos níveis de extensões seleccionados (200, 400 e 800 $\times 10^{-6}$). Os ensaios foram conduzidos a extensão controlada a uma temperatura de 20 °C e à frequência de 10 Hz.

A determinação das leis de fadiga corresponde a um ajuste de uma função de potência da lei de fadiga (Equação 1) aos resultados obtidos nos ensaios. Os resultados são expressos em termos do número médio de ciclos que produz uma redução de 50% na rigidez da mistura (critério de rotura do ensaio).

$$N = a \times \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^b \quad (1)$$

onde:

N = número de aplicações de carga até à rotura;

ε = extensão de tracção;

a, b = constantes determinadas experimentalmente.

Os parâmetros obtidos para as misturas são apresentados no Quadro 6, no qual se verifica um bom ajuste para todas as misturas. Com as leis de fadiga é possível, por extrapolação, determinar-se o N_{100} (número de ciclos para uma extensão de 100×10^{-6} que leva a mistura a rotura por fadiga) para cada mistura. Na Figura 4 apresentam-se as curvas de fadiga das misturas estudadas, onde cada ponto do gráfico corresponde à média das três repetições de cada ensaio realizado.

Quadro 6 – Parâmetros experimentais obtidos para as leis de fadiga

| Parâmetros | MPT1 | MPT2 | MBR1 |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| a | $9,81 \times 10^{18}$ | $2,27 \times 10^{17}$ | $2,81 \times 10^{15}$ |
| b | 5,138 | 4,707 | 4,028 |
| R^2 | 0,98 | 0,97 | 0,98 |
| N_{100} | $5,20 \times 10^8$ | $8,75 \times 10^7$ | $2,47 \times 10^7$ |

De acordo com a Figura 4 e Quadro 6, o resultado de resistência à fadiga mostrou-se melhor para a mistura MPT1. As misturas MPT2 e MBR1 obtiveram um desempenho semelhante. Os resultados permitem concluir que as misturas com borracha criogénica apresentam um desempenho superior em relação à borracha ambiente. Também permite inferir que o emprego de um betume base mais rígido produz um mistura de maior resistência à fadiga.

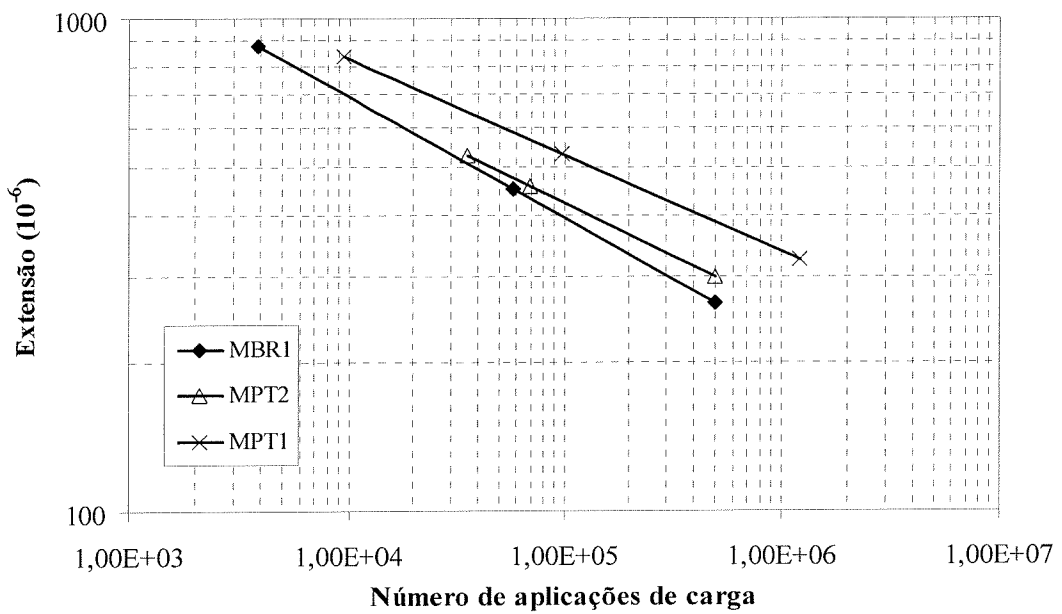


Figura 4 – Curvas de fadiga das misturas

5. DEFORMAÇÃO PERMANENTE

A avaliação da resistência à deformação permanente foi realizada através do ensaio de corte simples repetido à altura constante (RSST-CH) de acordo com o preconizado pela norma AASHTO TP7-94. No ensaio aplica-se, de forma repetitiva, um esforço de corte de 70 kPa durante 0,6 s, seguido de um período de repouso de 0,1 s. Os ensaios foram realizados à temperatura de 60 °C. A Figura 5 apresenta os resultados do ensaio de corte, expresso em ESALs (eixos de 80 kN) para uma rodeira de 12,7 mm de profundidade nas misturas. Os resultados representam a média de 8 provetes.

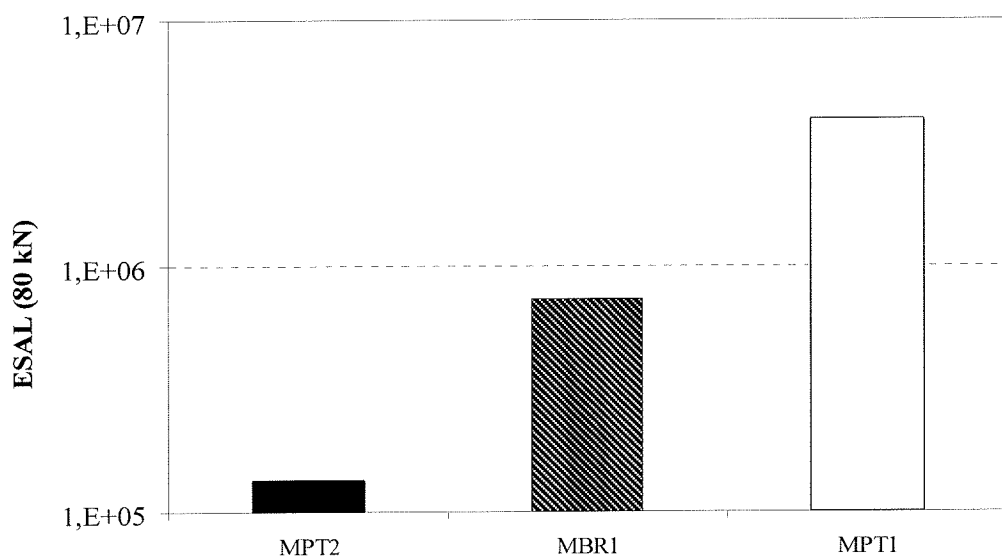


Figura 5 – Deformação permanente das misturas

A análise dos resultados da resistência à deformação permanente (Figura 5) mostrou que a mistura MPT1 apresentou um desempenho muito superior em relação às outras duas. O emprego de um betume base mais rígido teve uma influência significativa no desempenho da mistura em relação à deformação permanente. Relativamente às misturas MPT2 e MBR1, que utilizaram o mesmo tipo de betume base, os resultados mostraram que a mistura MBR1 apresentou uma maior resistência à deformação permanente enquanto que a mistura MPT2 obteve um fraco desempenho.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram produzidos betumes modificados com borracha de pneus usados com o objectivo de avaliar a contribuição da origem dos materiais no desempenho das misturas betuminosas. Os ensaios de desempenho realizados foram de resistência à fadiga e resistência à deformação permanente. Os betumes-borracha foram produzidos em laboratório através do processo húmido, utilizando materiais portugueses (betumes convencionais PEN 50/70 e PEN 35/50 e borracha criogénica) e materiais brasileiros (betume base CAP-50/70 e borracha ambiente). A percentagem de borracha, o tempo de digestão e a temperatura de digestão foram as mesmas utilizadas para todos os betumes-borracha.

Neste estudo foi observado que as propriedades físicas do betume-borracha dependeram das propriedades físicas e químicas dos materiais utilizados, assim, para se obter as propriedades desejadas, devem ser identificados os materiais e condições de interacção apropriados.

Os betumes-borracha foram avaliados através de ensaios de caracterização, nos quais, pode observar-se que as propriedades obtidas pelo betume-borracha PT1 revelaram uma tendência de melhor comportamento para produção de misturas betuminosas. Além do aumento da viscosidade, os betumes-borracha apresentaram um ponto de amolecimento mais elevado do que os betumes convencionais que lhes deram origem. Para todos os betumes-borracha produzidos foi observado que a modificação do betume convencional aumentou a elasticidade, facto demonstrado através do ensaio de resiliência.

Relativamente aos ensaios de desempenho, tanto em relação à resistência à fadiga quanto à resistência à deformação permanente, a mistura produzida com o betume-borracha PT1 (borracha criogénica) apresentou um desempenho superior. O betume base convencional mais duro melhorou o desempenho da mistura betuminosa.

As misturas MBR1 e MPT2 apresentaram um desempenho semelhante quanto à resistência à fadiga. Em relação à deformação permanente, a mistura MPT2 não foi satisfatória.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao Programa ALβAN (Programa de Bolsas de Alto Nível da União Européia para a América Latina), pela bolsa nº E04D040507BR durante os trabalhos em Portugal e ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa no Brasil. Agradece-se também à empresa Greca Asfaltos pela participação na pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baker, T.E.; Allen, T.M.; Jenkins, D.V.; Mooney, T.M.; Pierce, L.M.; Christie, R.A.; Weston, J.T., 2003. *Evaluation of the Use of Scrap Tires in Transportation Related Applications in the State of Washington*. Report to the Legislature as Required by SHB 2308. Washington State Department of Transportation. Olympia, Washington, USA.

Caltrans, 2003. *Asphalt Rubber Usage Guide*. State of California Department of Transportation. Materials and Testing Services. Office of Flexible Pavement Materials. Sacramento, California, USA.

Caltrans, 2005. *Use of Scrap Tire Rubber*. State of California Department of Transportation. Materials and Testing Services. Office of Flexible Pavement Materials. Sacramento, California, USA.

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.

Greenbook, 2000. *Standard Specifications for Public Works Construction*, 2000 Edition. Public Works Standards, Inc. Anaheim, California, USA.

Hicks, R.G. & Epps, J.A., 2000. *Quality Control for Asphalt Rubber Binders and Mixes*. Rubber Pavement Association. Tempe, Arizona, USA.

Hicks, R.G., 2002. *Asphalt Rubber Design and Construction Guidelines, Volume I – Design Guidelines*. Northern California Rubberized Asphalt Concrete Technology Center (NCRCTC) and California Integrated Waste Management Board (CIWMB). Sacramento, California, USA.

Roberts, F.L.; Kandhal, P.S.; Brown, E.R.; Dunning, R.L., 1989. *Investigation and Evaluation of Ground Tire Rubber in Hot Mix Asphalt*. National Center for Asphalt Technology nº 89-3. Auburn, Alabama, USA.

RRI, 2006. *Rubber Recycling*. Recycling Research Institute Scrap Tire News. Leesburg, Virginia, USA.