

AVALIAÇÃO LABORATORIAL DO EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA (POR VIA SECA) NA RESISTÊNCIA À FADIGA, DEFORMAÇÃO PERMANENTE E EVOLUÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE FENDAS EM MISTURAS BETUMINOSAS

Luís da Silva¹, Agostinho Benta² e Luís de Picado Santos³

¹Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

email: luisf@ua.pt <http://www.ua.pt/decivil>

² Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

³ Universidade de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

Sumário

O estudo do comportamento das misturas betuminosas com a adição de borracha por via seca, por ser um processo de fabrico mais barato e menos complexo que o processo por via húmida, assume-se como uma alternativa tecnológica importante. Neste estudo foram produzidas e caracterizadas, em laboratório, misturas betuminosas sem borracha e misturas betuminosas com alta percentagem de borracha (com partículas de borracha de dimensões ultrafinas), utilizando o processo de fabrico por via seca. São avaliados o comportamento à fadiga, comportamento à deformação permanente e a evolução da propagação de fendas das misturas betuminosas com e sem borracha. As misturas com borracha apresentaram um comportamento significativamente melhor.

Palavras-chave: Misturas betuminosas; borracha; via seca; fadiga; deformação permanente.

1 INTRODUÇÃO

Durante décadas o granulado de borracha, proveniente da reciclagem pneus usados, tem sido utilizado como aditivo nas misturas betuminosas. Esta utilização teve início nos anos 60, quando a borracha se tornou interessante para a indústria de pavimentação, devido às suas propriedades elásticas que tinham potencial para melhorar a durabilidade das misturas betuminosas e o atrito do pavimento [1, 2, 3]. A utilização do granulado de borracha nas misturas betuminosas constitui, também, uma vantagem ambiental por ajudar a escoar o material proveniente da reciclagem de pneus [4].

O estudo do comportamento das misturas betuminosas com a adição de borracha por via seca assume-se como uma necessidade da atualidade porque é um processo de fabrico muito mais barato e menos complexo que o processo por via húmida, e potencialmente [5] pode constituir uma alternativa vantajosa não só às misturas com borracha produzidas por via húmida como principalmente às tradicionais.

A incorporação de borracha granulada em misturas betuminosas pode ser feita através do processo húmido (*wet process*) e do processo seco (*dry process*). No processo húmido, a borracha granulada é adicionada ao betume convencional produzindo um “novo tipo de betume” denominado betume-borracha (BMB). A incorporação de borracha no processo húmido pode ser feita através do sistema *continuous blend* (mistura do betume e da borracha em tanques especiais na própria central) e através do sistema *terminal blend* (mistura do betume e da borracha realizado em unidades industriais). No processo a seco, as partículas de borracha (normalmente 1% a 3% por massa do agregado total na mistura) são utilizadas em substituição de parte dos agregados finos [6, 7, 8].

À semelhança de estudos anteriores [9, 10] o presente trabalho reforça a convicção que o processo de fabrico por via seca que utiliza partículas de borracha de dimensões ultrafinas (como no processo por via húmida, diâmetro nominal inferior a 0,8 mm) produz misturas betuminosas descontínuas com qualidade similar às produzidas por via húmida.

Este artigo apresenta resultados laboratoriais que corroboram o melhor comportamento de misturas betuminosas com borracha, adicionada por via seca, quando comparadas com misturas betuminosas convencionais. São avaliados o comportamento à fadiga, comportamento à deformação permanente e a evolução da propagação de fendas das misturas betuminosas com e sem borracha.

A resistência à fadiga das misturas betuminosas é a capacidade que estas apresentam para resistir a esforços de flexão repetidos sem que as camadas das mesmas atinjam a rotura. Esta é normalmente expressa como uma relação entre a extensão inicial, ou a tensão inicial, e o número de repetições de carga que produzem a ruína. Este número é habitualmente determinado usando ensaios laboratoriais de flexão repetida, realizados a determinados níveis de extensão ou tensão [11]. A norma EN12697-24 [12] indica cinco tipos de ensaios de caracterização da resistência à fadiga: ensaio de flexão em dois pontos com provetes trapezoidais, ensaio de flexão em dois pontos com provetes prismáticos, ensaio de flexão em três pontos com provetes prismáticos, ensaio de flexão em quatro pontos com provetes prismáticos e ensaio de tração indireta em provetes cilíndricos. O ensaio considerado neste estudo foi o ensaio de flexão em quatro pontos com provetes prismáticos.

Para avaliar o comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas, com e sem borracha, foram realizados ensaios com simulador de tráfego (*Wheel Tracking*). Estes ensaios foram realizados de acordo com a norma EN 12697-22 [13]. O ensaio *Wheel Tracking* permite, de forma empírica, caracterizar comparativamente o comportamento à deformação permanente de duas ou mais misturas betuminosas. Este ensaio, vulgarmente denominado como ensaio de pista, assenta na medição da profundidade da rodeira formada após sucessivas passagens de uma roda sobre o provete a temperatura constante. Este ensaio pode ser realizado recorrendo a 3 tipos alternativos de dispositivos de ensaio: dispositivos de muito grande porte (*extra large-size devices*), dispositivos de grande porte (*large-size devices*) e dispositivos de pequeno porte (*small-size devices*). Nos dispositivos de grande e muito grande porte os provetes são acondicionados ao ar durante o ensaio. Nos dispositivos de pequeno porte os provetes podem ser acondicionados ao ar, procedimento B, ou em água, procedimento A [13, 14]. Neste estudo foi utilizado o dispositivo de pequeno porte com os provetes acondicionados ao ar, ou seja, procedimento B da norma EN 12697-22.

A avaliação resistência ao fendilhamento e da propagação de fendas recorreu á execução de fendas induzidas em provetes prismáticos (ensaio de fadiga) e em lajes retangulares (ensaio *Wheel Tracking*).

2 MATERIAIS UTILIZADOS

Neste estudo foram produzidas e caracterizadas, em laboratório, misturas betuminosas sem borracha e misturas betuminosas com alta percentagem de borracha (20% de borracha em relação à massa total de ligante betuminoso), utilizando o processo de fabrico por via seca. Este processo de fabrico utilizado é distinto dos dois processos mundialmente mais conhecidos, o "*Plus Ride*" [15] e o "*TAK Genérico*" [16], onde o granulado de borracha substitui uma fração do agregado mineral. No processo de fabrico deste estudo, a incorporação de granulado de borracha nas misturas betuminosas, foi efetuada, não como substituição do agregado, mas sim, de forma a que este fizesse parte da percentagem total de ligante (betume convencional + borracha), de modo equivalente ao que acontece no processo por via húmida. Desta forma, são utilizadas partículas de borracha de dimensões ultrafinas (como no processo por via húmida, diâmetro nominal inferior a 0,8 mm).

A mistura betuminosa sem borracha produzida foi o betão betuminoso convencional, AC14 Surf [17]. A mistura betuminosa rugosa com alta percentagem de borracha produzida foi denominada por MBR-BBA [17], nomenclatura que designa, nas misturas por via húmida, uma mistura betuminosa rugosa com betume modificado com alta percentagem de borracha. Apesar de a borracha ser adicionada por via seca, como o granulado de borracha possui as mesmas características do utilizado nas misturas betuminosas com borracha adicionada por via húmida, adotou-se a mesma nomenclatura para a mistura, ou seja, MBR-BBA.

O betume asfáltico utilizado para a formulação das misturas betuminosas com e sem borracha foi o betume 35/50. Este betume cumpriu as especificações da norma NP EN 12591 [18].

O granulado de borracha utilizado neste estudo foi obtido por trituração mecânica. Conforme o especificado pelo Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal [17], o granulado de borracha foi obtido a partir da reciclagem de borracha de pneus 100% vulcanizada, e possui um elevado conteúdo de borracha natural, um teor em fibra máximo de 0,1%, um teor em aço máximo de 0,3% e um teor em água máximo de 2%.

Na Figura 1 apresenta-se a curva granulométrica do granulado de borracha, onde se verifica que o mesmo cumpre os limites granulométricos preconizados pelo Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal [17].

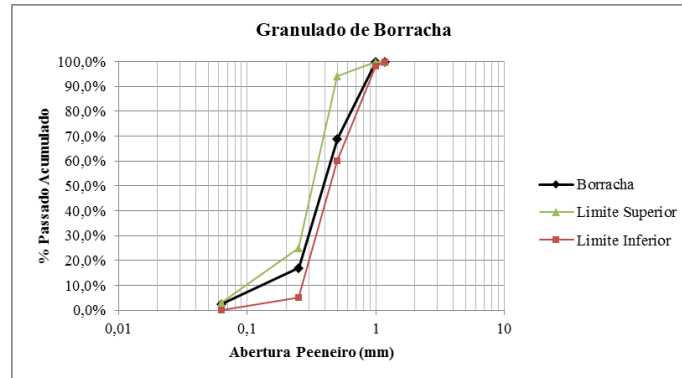


Figura 1. Curva granulométrica do granulado de borracha

Neste estudo foram utilizados agregados graníticos britados, provenientes da exploração de formações homogêneas de uma pedra localizada em Santa Maria da Feira, Portugal. Foi utilizado também filer comercial calcário procedente de Leiria, Portugal.

Os agregados minerais utilizados na produção das misturas betuminosas possuem a seguinte designação granulométrica: brita 8/20 – tamanho nominal entre 8,0 e 20,0 mm; brita 4/12 – tamanho nominal entre 4,0 e 12,0 mm; brita 4/10 – tamanho nominal entre 4,0 e 10,0 mm; e brita 0/4 (pó-de-pedra) – tamanho nominal inferior a 4,0 mm. De forma a cumprir o fuso granulométrico do Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal [17], foi, ainda, utilizado filer comercial com partículas de tamanho inferior a 0,5 mm.

Apresenta-se, na Figura 2, a curva granulométrica da mistura betuminosa MBR-BBA, enquadrada nos limites granulométricos preconizados pelo Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal [17].

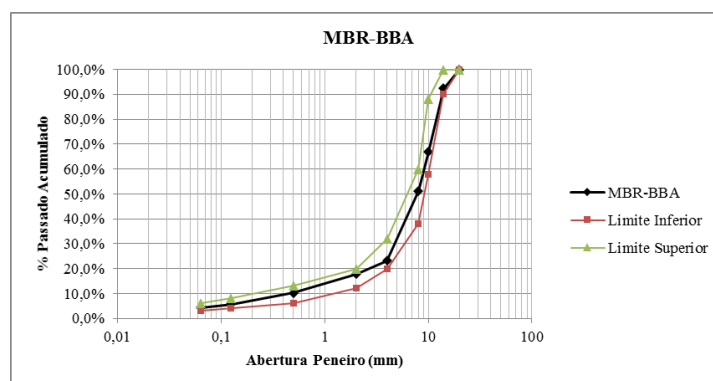


Figura 2. Curva granulométrica da mistura MBR-BBA

Apresenta-se, na Figura 3, a curva granulométrica da mistura betuminosa AC14 Surf, enquadrada nos limites granulométricos preconizados pelo Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal [17].

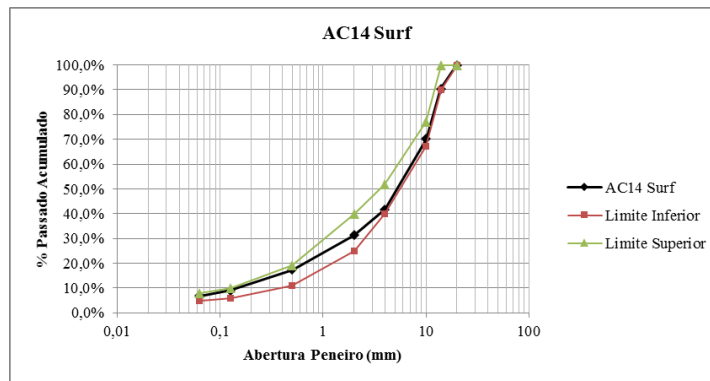


Figura 3. Curva granulométrica da mistura AC14 Surf

Uma vez obtidas as curvas granulométricas para as misturas betuminosas MBR-BBA e AC14 Surf, procedeu-se à determinação da percentagem ótima em betume de ambas. Para tal adotou-se o método Marshall. Este método é aplicável a misturas betuminosas a quente, densas ou abertas, desde que a dimensão máxima do agregado não seja superior a 25,4 mm [19]. Foi, assim, encontrada a percentagem ótima de betume de 8,0% para a mistura betuminosa MBR-BBA e de 5,0% para a mistura betuminosa AC14 Surf.

3 DEFORMAÇÃO PERMANENTE (*Wheel Tracking*)

Como descrito anteriormente, a avaliação do comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas foi efetuada recorrendo a ensaios com simulador de tráfego (*Wheel Tracking*) de acordo com a norma EN 12697-22 [13]. Foi utilizado o dispositivo de pequeno porte com os provetes acondicionados ao ar, ou seja, procedimento B da norma EN 12697-22.

Foram realizadas lajes com as dimensões de 300x400x60 mm³. Estas foram compactadas, utilizando o equipamento *Roller Compacter*, de acordo com a norma EN 12697-33 [20].

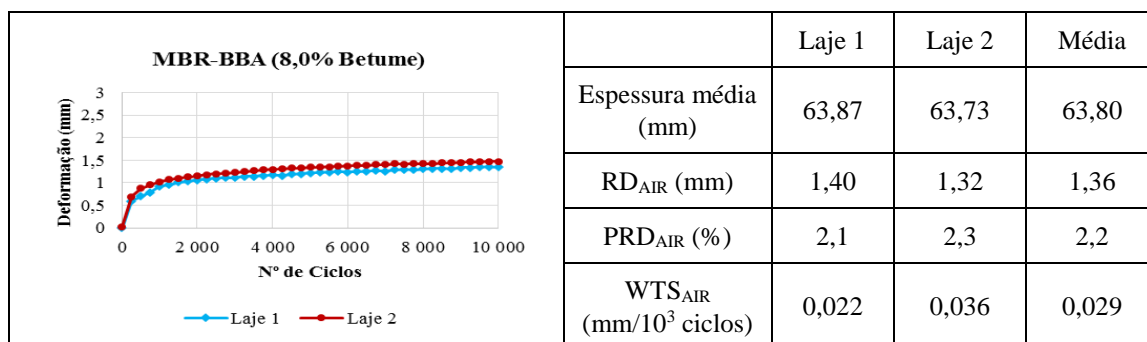
Para cada tipo de mistura betuminosa, de acordo com a norma EN 12697-22, foram aplicados 10 000 ciclos de carga a um mínimo de 2 lajes (procedimento B), dando-se o ensaio por terminado quando se atingiu este valor ou quando a profundidade da rodeira atingiu 20 mm.

Os principais resultados que são possíveis retirar do ensaio de pista foram a média da variação da deformação permanente ao ar – *Wheel Tracking Slope in air* (WTS_{AIR}), a média proporcional da profundidade da rodeira nos dois provetes ensaiados – *Mean Proportional Rut Depth in air* (PRD_{AIR}) e a profundidade média da rodeira – *Mean Rut Depth in air* (RD_{AIR}).

De acordo com o Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal [17], a temperatura de ensaio adotada foi de 60°C. Foi garantido que, antes do início da execução do ensaio, as lajes estiveram acondicionadas a uma temperatura também de 60°C durante o mínimo de 4 horas. Este tempo de acondicionamento vem de encontro ao estipulado pela norma EN 12697-22 que estabelece um tempo de acondicionamento mínimo, à temperatura do ensaio $\pm 1^\circ\text{C}$, de 4 horas para lajes com espessura até 60 mm e de 6 horas para as restantes. De acordo, também, com a mesma norma não foi ultrapassado o tempo de acondicionamento máximo de 24 horas.

Para as lajes da mistura betuminosa MBR-BBA, e para a percentagem de betume de 8,0%, são apresentados, no Quadro 1, os resultados do ensaio *Wheel Tracking*.

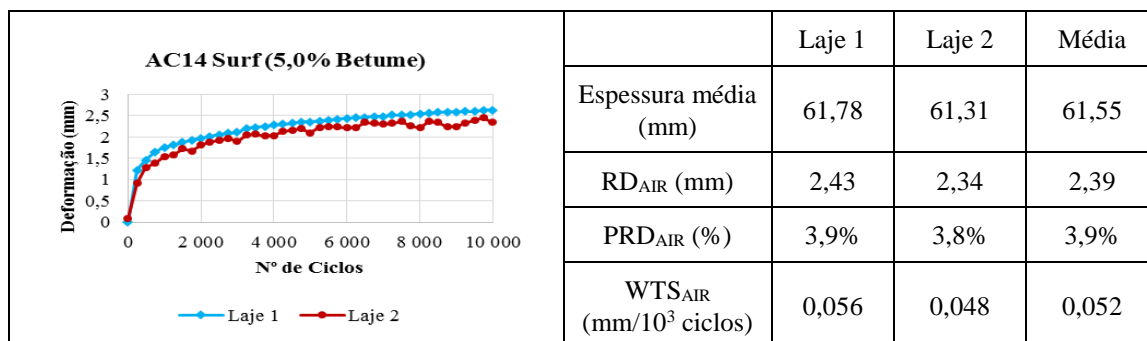
Quadro 1. Resultados do ensaio *Wheel Tracking* à mistura MBR-BBA



Dos resultados do ensaio *Wheel Tracking* à mistura MBR-BBA verifica-se que são cumpridos os limites afixados no Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal [17], ou seja, para o betume 35/50, a média da variação da deformação permanente ao ar (WTS_{AIR}) inferior a 0,08 mm e a média proporcional da profundidade da rodeira (PRD_{AIR}) inferior a 6,0%. Verifica-se ainda que, para ambas as percentagens de betume, a profundidade média da rodeira (RD_{AIR}) é bastante inferior a 20 mm (valor que define a paragem antecipada do ensaio *Wheel Tracking*).

São apresentados, no Quadro 2, os resultados do ensaio *Wheel Tracking* das lajes da mistura betuminosa AC14 Surf, para a percentagem de betume de 5,0%.

Quadro 2. Resultados do ensaio *Wheel Tracking* à mistura AC14 Surf



Do Quadro 2, verifica-se que as lajes apresentam uma curva de deformação muito próxima. Tal facto poderá, também, estar associado ao cuidado que se teve: com a pesagem e acondicionamento de cada tipo de material, em especial o betume asfalto e as diferentes frações de agregado; e com a mistura e compactação dos materiais.

Do Quadro 1 e do Quadro 2 verifica-se que a mistura AC14 Surf, em relação à mistura MBR-BBA, apresenta cerca do dobro da média da variação da deformação permanente ao ar (WTS_{AIR}). O mesmo acontece para os valores da média proporcional da profundidade da rodeira (PRD_{AIR}) e da profundidade média da rodeira (RD_{AIR}).

4 FADIGA (4-Point Bending Test)

Como referido anteriormente, o ensaio considerado para a avaliação da resistência à fadiga das misturas betuminosas, com e sem borracha, foi, de acordo com a norma EN12697-24 [12], o ensaio de flexão em quatro pontos com provetes prismáticos.

No ensaio de flexão em quatro pontos com provetes prismáticos, a caracterização do comportamento à fadiga das misturas betuminosas é efetuada através da aplicação de um carregamento sinusoidal controlado que provoca

flexão em quatro pontos em provetes prismáticos de secção quadrada ou retangular. De acordo com a Figura 4, os apoios são dispostos de forma simétrica em relação à secção de meio-vão do provete. O carregamento é aplicado por meio dos dois apoios interiores, que se localizam, respetivamente, a um terço e a dois terços do comprimento entre os dois apoios exteriores. O carregamento aplicado deve ser constante e igual em ambos os apoios interiores. Os dois apoios exteriores têm posição vertical fixa. Todos os apoios devem permitir livre rotação e translação horizontal do provete [12, 21].

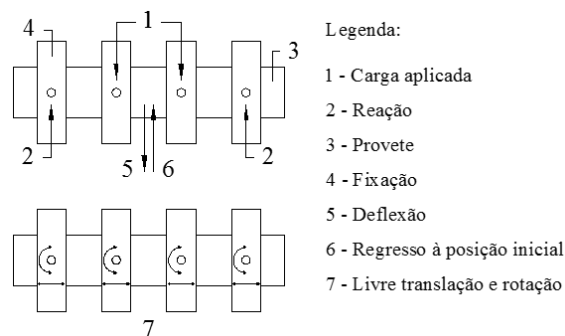


Figura 4. Esquema do ensaio à flexão em quatro pontos, adaptado de [12]

Os provetes de ensaio (vigas prismáticas) foram obtidos recorrendo ao fabrico de quatro lajes de cada mistura betuminosa, MBR-BBA e AC14 Surf. De cada laje foram serrados cinco provetes de secção aproximadamente quadrada com 5 cm de aresta, e 40 cm de comprimento.

4.1 Caracterização do módulo de deformabilidade

Neste estudo, a avaliação do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas seguiu o recomendado pelas normas EN 12697-24 e EN 12697-26 [12, 22]. Para tal, nos ensaios, foi considerada a temperatura de 20°C e uma extensão de 50 µm/m.

Apresenta-se, na Figura 5, o módulo de deformabilidade médio das vigas das misturas AC14 Surf e MBR-BBA.

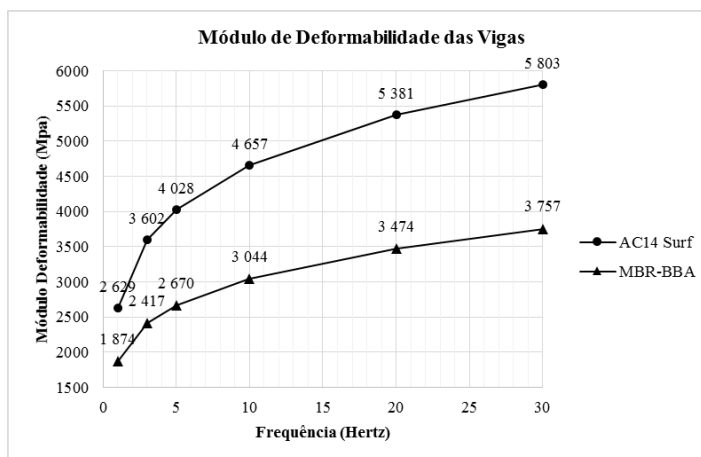


Figura 5. Módulo de deformabilidade médio das vigas das misturas AC14 Surf e MBR-BBA

4.2 Caracterização da resistência à fadiga

Os ensaios de resistência à fadiga foram realizados considerando a extensão controlada e temperatura de 20°C. O critério de rotura adotado foi o usual para este modo de carregamento, ou seja, a diminuição do módulo de

deformabilidade para 50% do seu valor inicial. O ensaio iniciou com a determinação do módulo de deformabilidade inicial do provete, onde, para tal, o equipamento efetuou inicialmente uma série de 100 ciclos.

Apresentam-se, na Figura 6, as linhas de fadiga das misturas betuminosas MBR-BBA e AC14 Surf.

De acordo com esta representação mais usual da lei de fadiga das misturas betuminosas, obteve-se para a mistura betuminosa MBR-BBA a seguinte relação entre a extensão de tração inicial, ϵ , e o número de ciclos até atingir o critério de rotura, N:

$$\epsilon = 4133,694 \times N^{-0,195} \quad (1)$$

Para a mistura betuminosa AC14 Surf obteve-se a seguinte relação entre a extensão de tração inicial, ϵ , e o número de ciclos até atingir o critério de rotura, N:

$$\epsilon = 2053,373 \times N^{-0,170} \quad (2)$$

Complementarmente à lei de fadiga, a norma EN 12697-24 [12] estipula que deverá ser apresentado o valor de ϵ_6 e ainda a inclinação da linha de fadiga. O valor de ϵ_6 representa o nível de extensão para o qual o número de ciclos necessário para se atingir a rotura é 1 000 000. Estes parâmetros estão presentes na Figura 6 tanto para a mistura betuminosa MBR-BBA como para a mistura betuminosa AC14 Surf.

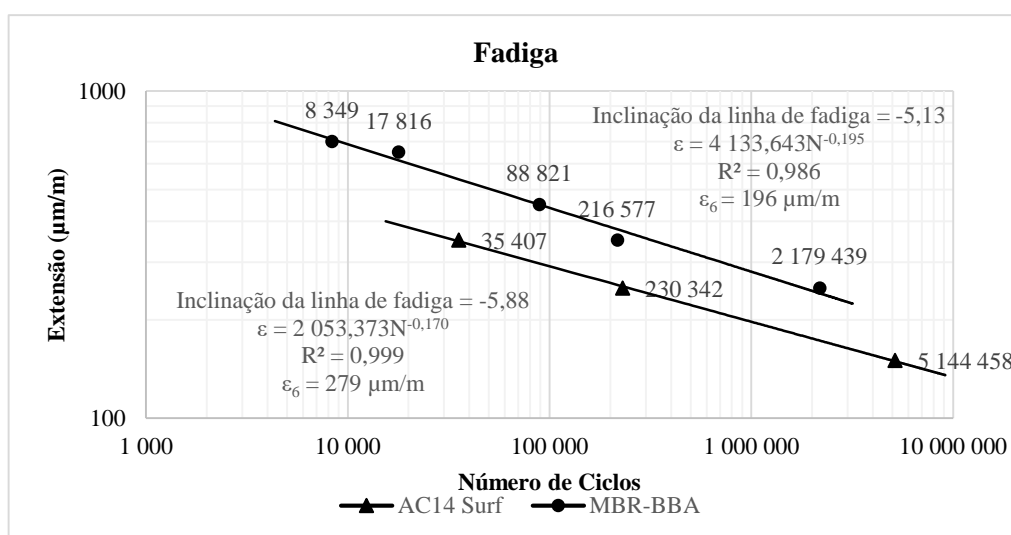


Figura 6. Comportamento à fadiga das vigas das misturas AC14 Surf e MBR-BBA

5 FADIGA COM FENDA INDUZIDA

No sentido de perceber como se comportam as misturas betuminosas, estudadas neste trabalho, à presença de fendilhamento no pavimento, procedeu-se à realização de um ensaio de carregamento cíclico idêntico ao utilizado na verificação à fadiga. O ensaio foi em tudo semelhante ao ensaio de fadiga, com a exceção dos provetes ensaiados apresentarem uma fenda induzida (Figura 7). De forma a perceber como evoluía o fendilhamento nos provetes, optou-se por um critério de paragem do ensaio diferente, ou seja, o ensaio terminou quando o provete apresentou um módulo de deformabilidade de 20% em relação ao módulo de deformabilidade inicial.



Figura 7. Provede betuminoso com fenda induzida

A fim de saber qual a profundidade de corte a adotar (corte de 5,0 mm de espessura com serra circular), efetuou-se uma simulação, no programa de elementos finitos SAP2000, do comportamento dos provetes betuminosos em condições de carregamento similares às do ensaio de fadiga.

Apresenta-se, na Figura 8, os resultados da máxima tensão de tração na base do provete betuminoso para todas as profundidades de fenda consideradas no modelo de elementos finitos. Desta análise, como seria de esperar, verifica-se que a tensão de tração aumenta com o aumento do comprimento da fenda induzida. Contudo, este aumento é mais acelerado até aos 6 mm, sendo menos evidente a partir dos 8 mm. Desta forma adotou-se que a fenda induzida, a considerar no ensaio, teria uma profundidade de 10 mm, valor médio entre os 8 e os 12 mm.

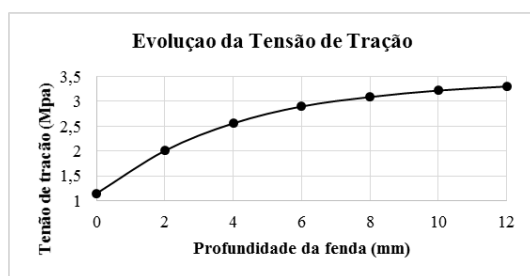


Figura 8. Máxima tensão de tração na base do provete do modelo de elementos finitos

Apresenta-se, na Figura 9, o número de ciclos que cada mistura suporta, na extensão de 250 $\mu\text{m/m}$, para o critério de paragem de 50% e 20% do módulo de deformabilidade inicial. São ainda apresentados dois pontos que representam número de ciclos que cada mistura suportou no ensaio de fadiga sem fenda induzida, também, na extensão de 250 $\mu\text{m/m}$.

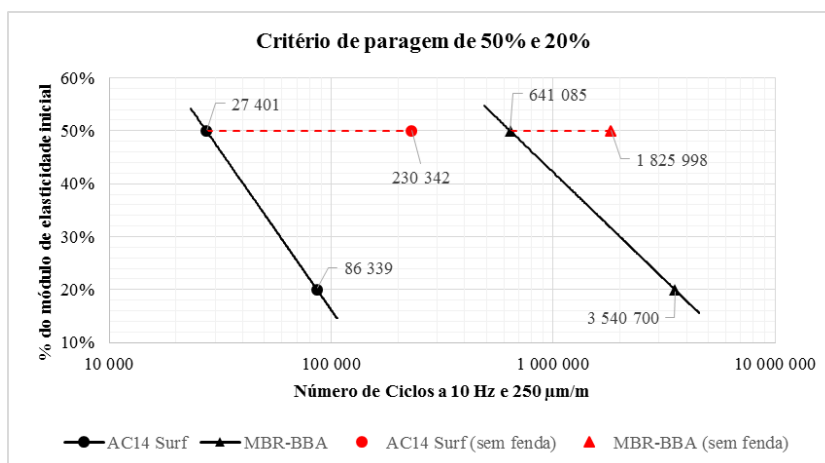


Figura 9. Número de ciclos para diferentes critérios de paragem

Da análise da Figura 9, no que respeita ao comportamento à fadiga das misturas betuminosas MBR-BBA e AC14 Surf, podem obter-se várias conclusões. Para o critério de paragem de 50% do módulo de deformabilidade inicial, a mistura betuminosa MBR-BBA, em relação à mistura AC14, suporta um número de ciclos bastante superior (mais de 20 vezes superior). Quando o critério de paragem é 20% do módulo de deformabilidade inicial, esta diferença é ainda maior, cerca de 40 vezes superior. Tal indica que a mistura betuminosa com borracha adicionada por via seca, MBR-BBA, possui uma maior capacidade para absorver os acréscimos de tensão gerados na zona envolvente à fenda induzida nos provetes, ou seja, terá uma maior capacidade para resistir à propagação de fendas.

Quando comparado o número de ciclos que cada mistura suporta em provetes com fenda induzida e em provetes sem fenda induzida, verifica-se uma diferença acentuada entre a mistura MBR-BBA e a mistura AC14 Surf. Como seria de esperar, ambas as misturas, com provetes com fenda induzida, suportam um número de ciclos inferior às misturas com provetes sem fenda induzida. Esta diferença é muito mais acentuada na mistura betuminosa AC14 Surf (cerca de 8 vezes inferior) do que na mistura betuminosa MBR-BBA (cerca de 3 vezes inferior). Desta forma, também por aqui, se verifica que a mistura betuminosa com borracha adicionada por via seca, MBR-BBA, tem uma maior capacidade para resistir à propagação de fendas.

6 DEFORMAÇÃO PERMANENTE COM FENDA INDUZIDA

De forma a perceber melhor como reagem as misturas betuminosas à propagação de fendas, realizou-se uma adaptação ao ensaio de deformação permanente com recurso ao *Wheel Tracking*. Aqui foi também utilizado o dispositivo de pequeno porte com os provetes acondicionados ao ar, ou seja, procedimento B da norma EN 12697-22 [13].

A adaptação que se efetuou ao ensaio seguiu, essencialmente, o seguinte (Figura 10): o ensaio considerou-se terminado ao fim de 20 000 ciclos e não ao fim de 10 000 ciclos; em vez de utilizar uma única laje por ensaio, utilizaram-se duas lajes coladas, sendo que a laje inferior possuía uma fenda longitudinal central em toda a espessura da laje; o conjunto das duas lajes passou a estar apoiado sobre duas membranas de borracha neoprene com a espessura de 8 mm cada; as lajes, durante o ensaio, deixaram de estar confinadas por um molde metálico, estando apenas amparadas por dois apoios laterais; a temperatura do ensaio foi de 20°C e 40°C; e, por limitações de espaço disponível no equipamento de ensaio e no molde de compactação, a espessura de cada laje foi de 45 mm.

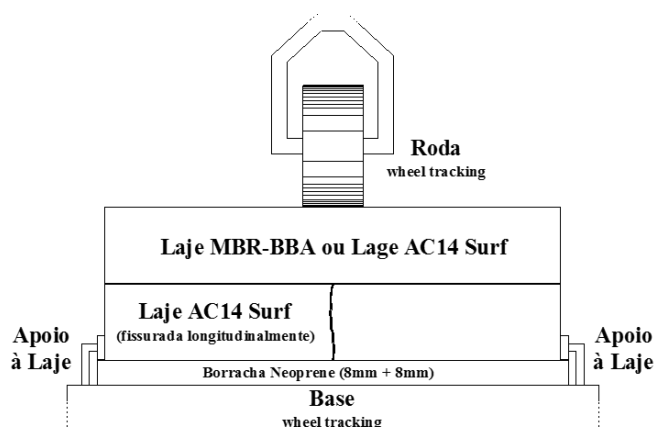


Figura 10. Disposição das lajes no ensaio de deformação permanente com fenda induzida

Apresenta-se, na Quadro 3, os resultados do ensaio *Wheel Tracking* para os diferentes grupos de lajes.

Quadro 3. Resultados do ensaio *Wheel Tracking* para diferentes combinações de lajes

Laje	Temp. do ensaio (°C)	Espessura Laje (mm)	Final do ensaio		RD _{AIR} (mm)	PRD _{AIR} (%)	WTS _{AIR} (mm/10 ³ ciclos)
			Duração (min)	Nº ciclos			
AC14 Surf + MBR-BBA	20	91,3	766	20000	1,39	01,52	0,042
	40	91,5	766	20000	3,12	03,41	0,052
AC14 Surf + AC14 Surf	20	92,6	766	20000	1,45	01,57	0,060
	40	92,1	766	20000	15,63	16,97	0,301

Do Quadro 3 podem obter-se várias observações. Para a temperatura de ensaio de 20°C o comportamento, à deformação permanente, do grupo de lajes AC14 Surf + MBR-BBA é ligeiramente melhor do que o do grupo de lajes AC14 Surf + AC14 Surf. Este último apresenta uma média da variação da deformação permanente ao ar, WTS_{AIR} , cerca de 1,5 vezes superior. Para a temperatura de ensaio de 40°C a diferença é bem mais acentuada. Para o grupo de lajes AC14 Surf + AC14 Surf o valor de WTS_{AIR} é mais de 5 vezes superior. A mesma diferença se verifica para a profundidade média da rodeira, RD_{AIR} , e para a média proporcional da profundidade da rodeira nos dois provetes ensaiados, PRD_{AIR} .

Relembrando o ensaio *Wheel Tracking* às lajes das misturas betuminosas MBR-BBA e AC14 Surf sem fenda induzida, à temperatura de 60°C, onde os valores de WTS_{AIR} , RD_{AIR} e PRD_{AIR} foram resumidos no Quadro 1 e no Quadro 2, verifica-se que a mistura betuminosa AC14 Surf apresentou uma média da variação da deformação permanente ao ar, WTS_{AIR} , cerca de 2 vezes superior à mistura MBR-BBA. Neste caso, com a presença de uma fenda induzida, na temperatura de 40°C, esta diferença foi maior (5 vezes). Tal permite inferir que a mistura betuminosa com borracha adicionada por via seca, MBR-BBA, para além de ter um melhor comportamento à deformação permanente do que a mistura betuminosa sem borracha, AC14 Surf, também apresenta uma melhor resposta à presença de fendas nas camadas que a suportam.

7 CONCLUSÕES

Verificando-se que a mistura AC14 Surf, em relação à mistura MBR-BBA, apresenta cerca do dobro de WTS_{AIR} de PRD_{AIR} e de RD_{AIR} , pode concluir-se que a mistura MBR-BBA apresenta maior resistência à deformação permanente do que a mistura AC14 Surf.

Em relação à resistência à fadiga, verificou-se que a mistura betuminosa com borracha adicionada por via seca, em relação à mistura betuminosa sem borracha, para o mesmo número de ciclos de carga, suporta um nível de extensão bastante superior. De forma análoga, para o mesmo nível de extensão, a mistura betuminosa com borracha suporta um número de ciclos de carga, também, bastante superior (pelo menos 6 vezes mais).

No que respeita à propagação de fendas pode concluir-se que esta tem uma influência mais acentuada na mistura betuminosa sem borracha.

Do ensaio de fadiga com fenda induzida verificou-se que para o mesmo nível de ruína da viga betuminosa, critério de paragem de 20% do módulo de deformabilidade inicial, a mistura MBR-BBA suporta cerca de 40 vezes mais ciclos de carga que a mistura betuminosa AC14 Surf. Observou-se, ainda, que a diferença entre o número de ciclos que suportam os provetes com fenda induzida e sem fenda induzida é mais alargada na mistura betuminosa AC14.

Do ensaio de deformação permanente com fenda induzida verificou-se que, principalmente à temperatura de 40°C, o valor de WTS_{AIR} da mistura betuminosa AC14 Surf é bastante superior ao da mistura MBR-BBA, concluindo-se também daqui que a mistura betuminosa MBR-BBA apresenta uma melhor resposta à presença de fendas nas camadas que a suportam.

Desta forma, com este estudo pode concluir-se que a mistura betuminosa com alta percentagem de borracha adicionada por via seca, MBR-BBA, apresenta um melhor desempenho estrutural que a mistura betuminosa sem borracha, AC14 Surf., com um efeito pronunciado na resistência à progressão de fendilhamento na própria mistura, o que traduz um comportamento que deve ser valorado quando se pretende reabilitar pavimentos com deterioração avançada provocada por aquele tipo de degradação.

8 AGRADECIMENTOS

Fundação para a Ciência e a Tecnologia, FCT, pela bolsa de doutoramento de referência SFRH/BD/79151/2011.

Laboratório de Vias de Comunicação do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.

Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

9 REFERÊNCIAS

1. P. Cong, P. Xun, M. Xing e S. Chen., “Investigation of Asphalt Binder Containing Various Crumb Rubbers and Asphalts,” *Constr. Build. Mater.* , vol. 40, p. 632, 2013.
2. J. Yin, S. Wang e F. LV, “Improving the Short-Term Aging Resistance of Asphalt by Addition of Crumb Rubber Radiated by Microwave and Impregnated with Epoxidized Soybean Oil,” *Constr. Build. Mater.* , vol. 49, p. 712, 2013.
3. H. Wang, Z. Dang, L. Li e Z. You, “Analysis on Fatigue Crack Growth Laws for Crumb Rubber Modified (CRM) Asphalt Mixture,” *Constr. Build. Mater.* , vol. 47, p. 1342, 2013.
4. N. A. Hassana, G. D. Aireyb, R. P. Jayaa, N. Mashrosa e M. M. A. Aziza, “A Review of Crumb Rubber Modification in Dry Mixed Rubberised Asphalt Mixtures,” *Jurnal Teknologi* , vol. 70, 2014.
5. L. Picado Santos e J. Feiteira, “Assessment Performance of Bituminous Mixtures Incorporating Rubber Modified Bitumen,” em *Sixth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPA6)*, Turin, 2009.
6. Fontes e L. P. T. L., *Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos*, Tese de Doutoramento. Guimarães: Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2009.
7. F. J. López-Moro, M. C. Moro, F. Hernández-Olivares, B. W. Schultz e M. Alonso-Fernández, “Microscopic Analysis of the Interaction Between Crumb Rubber and Bitumen in Asphalt Mixtures Using the Dry Process,” *Constr. Build. Mater.* , vol. 48, p. 691, 2013.
8. F. Moreno, M. C. Rubio e M. J. Martínez-Echevarria, “The Mechanical Performance of Dry-Process Crumb Rubber Modified Hot Bituminous Mixes: The Influence Of Digestion Time and Crumb Rubber Percentage,” *Constr. Build. Mater.* , vol. 26, p. 466, 2012.
9. F. Dias e L. Picado Santos, “Avaliação de Desempenho de Misturas Betuminosas Rugosas com Incorporação de Alta Percentagem de Granulado de Borracha de Pneus Usados,” em *XV Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto*, Lisboa, 2009.
10. J. Feiteira, L. Picado Santos e S. Capitão, “Mechanical performance of dry process fine crumb rubber asphalt mixtures placed on the Portuguese road network,” *Construction and Building Materials*, vol. 73, pp. 247-254, 2014.
11. J. Pais e C. Palha, “Resistência à Fadiga em Misturas Betuminosas para Pavimentos Rodoviários,” em *8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental*, Guimarães, 2010.
12. CEN, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue. EN 12697-24, Bruxelas: European Committee for Standardization, 2004-a.
13. CEN, Test methods for hot mix asphalt - Part 22: wheel tracking. EN 12697-22, Bruxelas: European Committee for Standardization, 2003-b.
14. F. Morea e R. Zerbino, “Wheel tracking test (WTT) conducted under different standards. Study and correlation of test parameters and limits,” *Materials and Structures*, vol. 48, p. 4019 – 4028, 2015.
15. Turner Fairbank Highways Research Center, “User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction,” Washington, USA, 2005.
16. CEDEX, *Manual de Empleo de NFU en meclados bituminosos*, Espanha: Ministério de Fomento, 2007.
17. EP, *Caderno de Encargos Tipo Obra - Pavimentação*, Lisboa, Portugal: Estradas de Portugal, 2014.

18. IPQ, Betumes e ligantes betuminosos. Especificações para betumes de pavimentação. NP EN 12591, Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2011.
19. IPQ, Misturas betuminosas. Métodos de ensaio para misturas betuminosas a quente. Parte 34: Ensaio Marshall. NP EN 12697 – 34, Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2004.
20. CEN, Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 33: Specimen prepared by roller compactor. EN 12697-33, Bruxelas: European Committee for Standardization, 2003-a.
21. J. M. L. Crucho, Contribuição para o estudo da resistência à fadiga de misturas betuminosas com incorporação de ASIC, Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2011.
22. CEN, Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt, Part 26: Stiffness. EN 12697-26, Bruxelas: European Committee for Standardization, 2004-b.