

ARTIGO REF: 6586

MISTURAS BETUMINOSAS COM PARTÍCULAS ULTRAFINAS DE BORRACHA ADICIONADAS POR VIA SECA

Luís da Silva^{1(*)}, Agostinho Benta¹, Luís de Picado Santos²

¹Universidade de Aveiro, Depart. Eng^a Civil, Aveiro, Portugal

²Universidade de Lisboa, Depart. de Eng^a Civil, Arquitetura e Georrecursos do IST, Lisboa, Portugal

(*)*Email*: luisf@ua.pt

RESUMO

O conhecimento das misturas betuminosas com a adição de borracha por via seca assume-se como uma necessidade da atualidade porque estas têm um processo de fabrico muito mais barato e menos complexo que as fabricadas por via húmida e, potencialmente, podem constituir uma alternativa vantajosa não só às misturas produzidas por via húmida como principalmente às tradicionais. É avaliado o comportamento à fadiga, o comportamento à deformação permanente e a evolução da propagação de fendas de misturas betuminosas sem borracha e com partículas ultrafinas de borracha adicionadas por via seca. Para dimensionamento dum reforço sobre um pavimento fendilhado, pode concluir-se que um reforço com a mistura com borracha terá uma vida útil superior a um reforço com a mesma espessura da mistura sem borracha de pelo menos 10 vezes, no que respeita à resistência à fadiga, e de pelo menos 2,5 vezes, no que respeita à resistência à deformação permanente.

INTRODUÇÃO

A utilização do o granulado de borracha 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 (Cong, Xun, Xing, & Chen., 2013; Wang, Dang, Li, & You, 2013; Yin, Wang, & LV, 2013). Esta utilização do granulado de borracha nas misturas betuminosas constitui, também, uma vantagem ambiental por ajudar a escoar o material proveniente da reciclagem de pneus (Hassan, Airey, Jaya, Mashros, & Aziz, 2014).

O conhecimento das betuminosas com a adição de borracha por via seca assume-se como uma necessidade da atualidade porque estas têm um processo de fabrico muito mais barato e menos complexo que as fabricadas por via húmida, e potencialmente (Picado-Santos & Feiteira Dias, 2009) podem constituir uma alternativa vantajosa não só às misturas 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 (BB). 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 (Fontes, 2009; López-Moro, Moro, Hernández-

Olivares, Schultz, & Alonso-Fernández, 2013; Moreno, Rubio, & Martinez-Echevarria, 2012).

Recentemente têm sido realizados estudos que procuram contribuir para o melhor conhecimento das misturas betuminosas com partículas ultrafinas de borracha adicionadas por via seca. Tem sido utilizado granulado de borracha com dimensões até 0,8 mm, numa percentagem que varia entre 0,5% e 1,5% em relação à massa total da mistura betuminosa. As principais propriedades avaliadas neste tipo de misturas betuminosas são: a sensibilidade à água; a resistência à deformação permanente, através do ensaio *wheel tracking*; e a resistência à fadiga, através do ensaio de flexão em quatro pontos - *four-point bending tests* (Feiteira Dias, Picado-Santos, & Capitão, 2014; Hassan, Hainin, Yaacob, Ismail, & Yunus, 2013; López-Moro et al., 2013; Moreno et al., 2012).

À semelhança de estudos anteriores (Feiteira Dias & Picado-Santos, 2009; Feiteira Dias et al., 2014) 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.

Neste trabalho, perante condições de suporte mais adversas (por exemplo, camadas betuminosas fendilhadas) comprova-se o melhor comportamento da mistura betuminosa com partículas ultrafinas de borracha, adicionadas por via seca, MBR-BA, quando comparada com a mistura betuminosa de referência, sem borracha, do tipo AC14 Surf. É avaliado o comportamento à fadiga, o comportamento à deformação permanente e a evolução da propagação de fendas das misturas betuminosas com e sem borracha. São ainda apresentadas orientações de aplicação para a mistura MBR-BA.

A resistência à fadiga das misturas betuminosas foi avaliada recorrendo ao ensaio de flexão em quatro pontos com provetes prismáticos (CEN, 2004a). A avaliação do comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas, com e sem borracha, recorreu à realização de ensaios com simulador de tráfego, *Wheel Tracking*, (CEN, 2003a). A avaliação resistência ao fendilhamento e da propagação de fendas recorreu à execução de fendas induzidas em vigas (ensaio de fadiga) e em lajes retangulares (ensaio *Wheel Tracking*).

MATERIAIS UTILIZADOS

Neste trabalho 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” (FHWA, 2005) e o “TAK Genérico” (CEDEX, 2007), onde o granulado de borracha substitui uma fração do agregado mineral. No processo de fabrico deste trabalho, 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 do tipo AC14 Surf (EP, 2014). A mistura betuminosa rugosa com alta percentagem de borracha produzida foi denominada por MBR-BA. Esta mistura, com a exceção do processo de adição de borracha, é idêntica à mistura betuminosa rugosa com betume modificado com alta

percentagem de borracha adicionada por via húmida, MBR-BBA. Desta forma, a mistura MBR-BA seguiu os limites impostos, pelo Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal - CET EP (EP, 2014), às misturas MBR-BBA.

O betume asfáltico utilizado para a formulação das misturas betuminosas com e sem borracha foi o betume de penetração nominal 35/50. Este betume cumpriu as especificações da norma NP EN 12591 (IPQ, 2011).

O granulado de borracha utilizado neste estudo foi obtido por trituração mecânica. Conforme o especificado pelo CET EP (EP, 2014), o granulado de borracha foi proveniente da reciclagem de borracha de pneus 100% vulcanizada, 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%. Apresenta-se, na Figura 1, a curva granulométrica do granulado de borracha, onde se verifica que o mesmo cumpre os limites granulométricos preconizados pelo CET EP (EP, 2014).

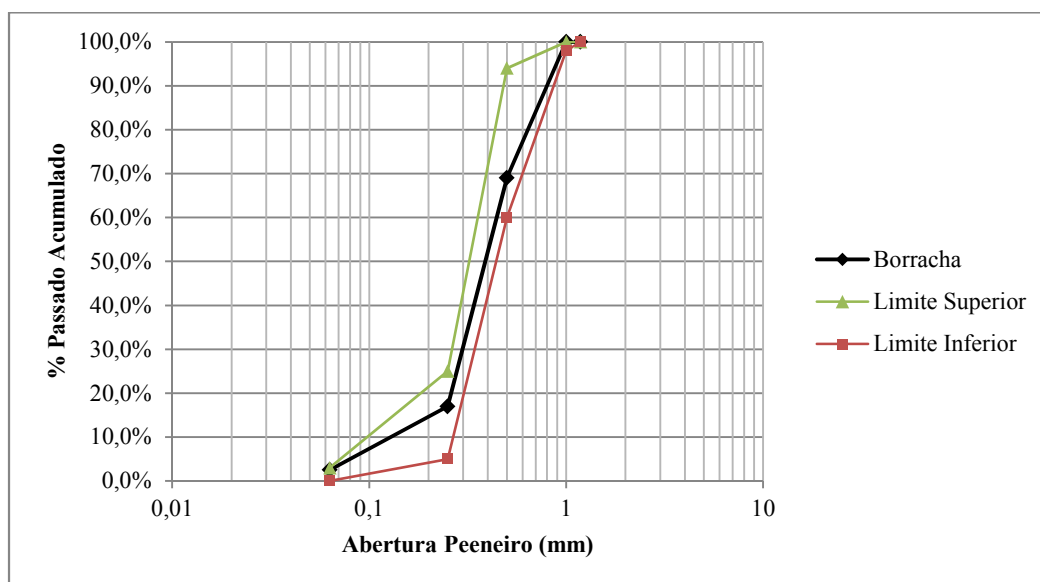


Fig. 1 - Curva granulométrica do granulado de borracha

Neste trabalho foram utilizados agregados graníticos britados, provenientes da exploração de formações homogêneas de uma pedra localizada em Santa Maria da Feira, Portugal. Estes agregados 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 CET EP (EP, 2014), foi, ainda, utilizado filer comercial, com partículas de tamanho inferior a 0,5 mm, procedente de Leiria, Portugal.

Apresentam-se, na Figura 2 e na Figura 3, as curvas granulométrica das misturas betuminosas MBR-BA e AC14 Surf, respetivamente, ambas enquadradas nos limites granulométricos preconizados pelo CET EP (EP, 2014).

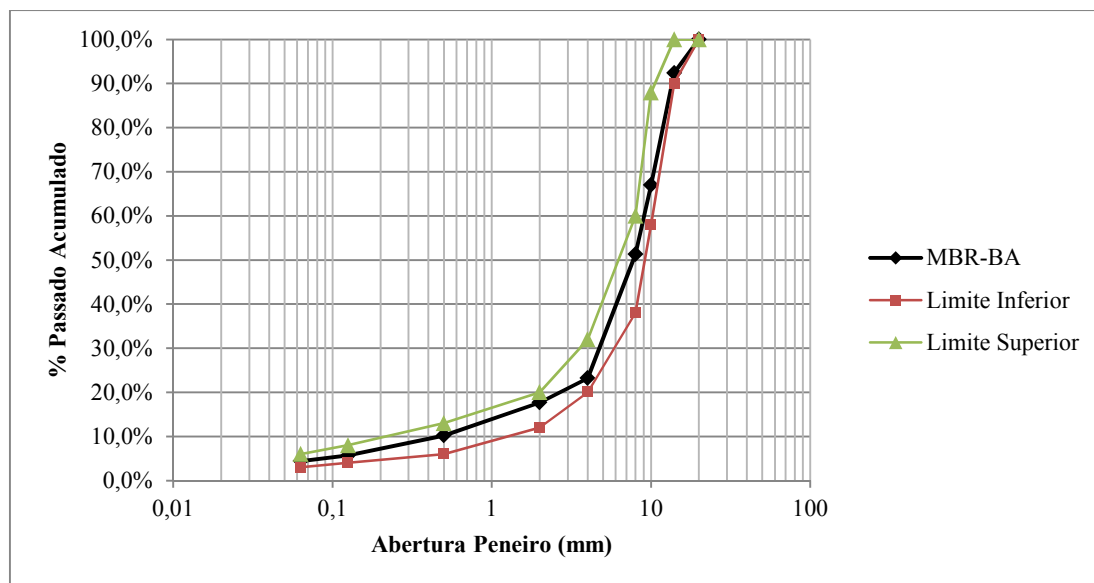


Fig. 2 - Curva granulométrica da mistura MBR-BA

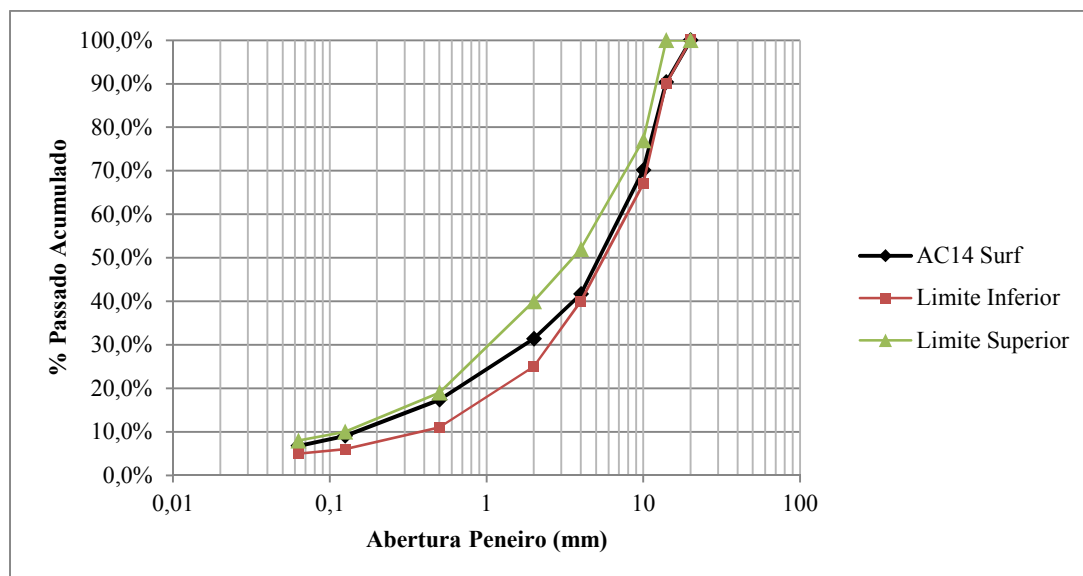


Fig. 3 - Curva granulométrica da mistura AC14 Surf

A adoção da percentagem de betume para ambas as misturas betuminosas teve em consideração estudos anteriores efetuados com o mesmo tipo de misturas betuminosas (Feiteira Dias, 2011; Feiteira Dias et al., 2014). Para tal adotaram-se as percentagens de 8,0%, para a mistura betuminosa MBR-BA, e de 5,0%, para a mistura betuminosa AC14 Surf. Estas percentagens de betume foram validadas através da determinação das principais propriedades das misturas betuminosas, através da realização de provetes Marshall, nomeadamente, a estabilidade, a baridade, a porosidade, a deformação e o VMA (Quad).

Quadro 1 - Características Marshall da mistura AC14 Surf

Mistura	Betume (%)	Estabilidade (kN)	Baridade (kg/m ³)	Porosidade (%)	Deformação (mm)	VMA (%)
MBR-BA	8,0	10,5	2185	3,7	4,1	20,6
AC14 Surf	5,0	9,1	2296	3,7	3,8	14,9

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 (CEN, 2003a), recorrendo ao dispositivo de pequeno porte com os provetes acondicionados ao ar.

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 (CEN, 2003b). 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, possíveis de 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}).

Conforme o especificado no CET EP (EP, 2014), a temperatura de ensaio adotada foi de 60°C. De acordo com a norma EN 12697-22, 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, não ultrapassando o máximo de 24 horas.

Para as lajes das misturas betuminosas MBR-BA e AC14 Surf, são apresentados, na Figura 4 e no Quadro 2, os resultados do ensaio *Wheel Tracking*.

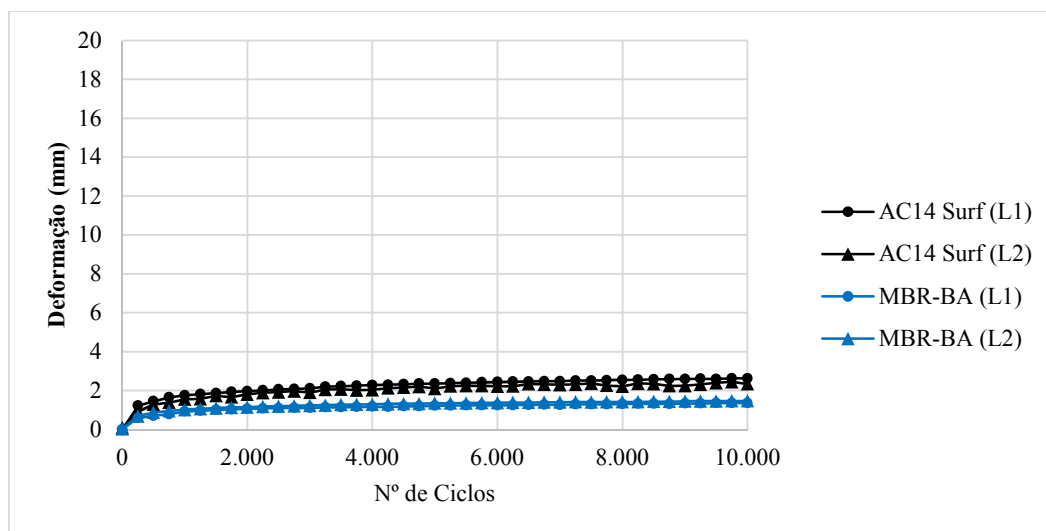


Fig. 4 - Curvas do ensaio *Wheel Tracking* às misturas MBR-BA e AC14 Surf

Quadro 2 - Resultados do ensaio *Wheel Tracking* às misturas MBR-BA e AC14 Surf

	MBR-BA			AC14 Surf		
	Laje 1	Laje 2	Média	Laje 1	Laje 2	Média
Espessura média (mm)	63,87	63,73	63,80	61,78	61,31	61,55
RD_{AIR} (mm)	1,40	1,32	1,36	2,43	2,34	2,39
PRD_{AIR} (%)	2,1	2,3	2,2	3,9	3,8	3,9
WTS_{AIR} (mm/10 ³ ciclos)	0,022	0,036	0,029	0,056	0,048	0,052

Dos resultados do ensaio *Wheel Tracking* à mistura MBR-BA (Figura 4 e Quadro 2) verificou-se que são cumpridos os limites afixados no CET EP (EP, 2014), ou seja, para o betume de penetração nominal 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%. Verificou-se ainda que, para ambas as percentagens de betume, a profundidade média da rodeira (RD_{AIR}) foi bastante inferior a 20 mm (valor que define a paragem antecipada do ensaio *Wheel Tracking*). Verificou-se, ainda, que a mistura AC14 Surf, em relação à mistura MBR-BA, apresentou cerca do dobro da média da variação da deformação permanente ao ar (WTS_{AIR}), acontecendo o mesmo para os valores da média proporcional da profundidade da rodeira (PRD_{AIR}) e da profundidade média da rodeira (RD_{AIR}).

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 (CEN, 2004a), o ensaio de flexão em quatro pontos com provetes prismáticos (vigas) (*4-Point Bending Test*).

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 vigas de secção quadrada ou retangular. 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 (CEN, 2004a; Crucho, 2011).

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

Módulo de deformabilidade

Neste trabalho, a avaliação do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas seguiu o recomendado pelas normas EN 12697-24 e EN 12697-26 (CEN, 2004a, 2004b). Para tal, nos ensaios, foi considerada a temperatura de 20°C e uma extensão de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$. Apresentam-se, na Figura 5, os valores médios dos módulos de deformabilidade das vigas das misturas AC14 Surf e MBR-BA.

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 **Fig**, as linhas de fadiga das misturas betuminosas MBR-BA e AC14 Surf.

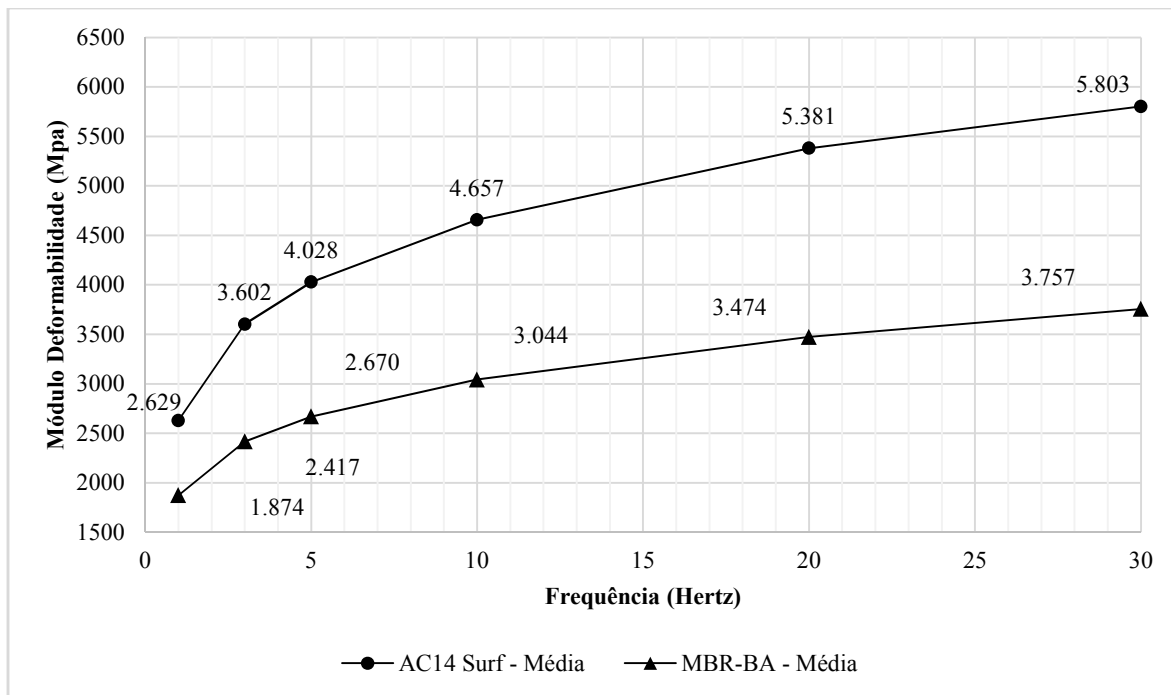


Fig. 5 - Módulo de deformabilidade das vigas das misturas AC14 Surf e MBR-BA à temperatura de 20°C

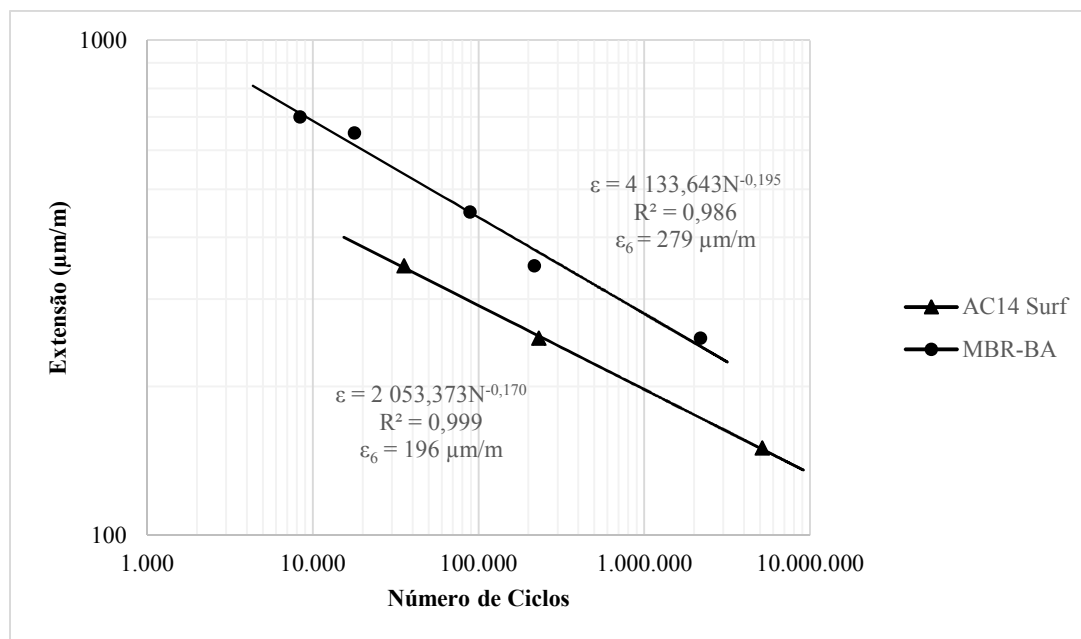


Fig. 6 - Comportamento à fadiga das vigas das misturas AC14 Surf e MBR-BA à temperatura de 20°C

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

$$\epsilon = 4133,643 \times N^{-0,195} \tag{1}$$

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 :

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

Complementarmente à lei de fadiga, a norma EN 12697-24 (CEN, 2004a) 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-BA, como para a mistura betuminosa AC14 Surf.

Verifica-se, da Figura 6, que o valor ε_6 da mistura MBR-BA é cerca de 1,5 vezes superior ao valor ε_6 da mistura AC14-Surf. Tal significa que a mistura betuminosa com borracha adicionada por via seca, em relação à mistura betuminosa de referência, 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 MBR-BA suporta um número de ciclos de carga, também, bastante superior (pelo menos 6 vezes mais).

De forma resumida pode dizer-se que a mistura MBR-BA apresenta melhor comportamento à fadiga que a mistura AC14 Surf. Este é um comportamento esperado já que para a temperatura de 20°C uma maior percentagem de ligante induz um melhor comportamento à fadiga quando analisado da forma descrita.

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.



Fig. 7 - Provete 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. Assim, 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, verificou-se que a tensão de tração aumenta com o aumento do comprimento da fenda induzida. Contudo, este aumento foi 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.

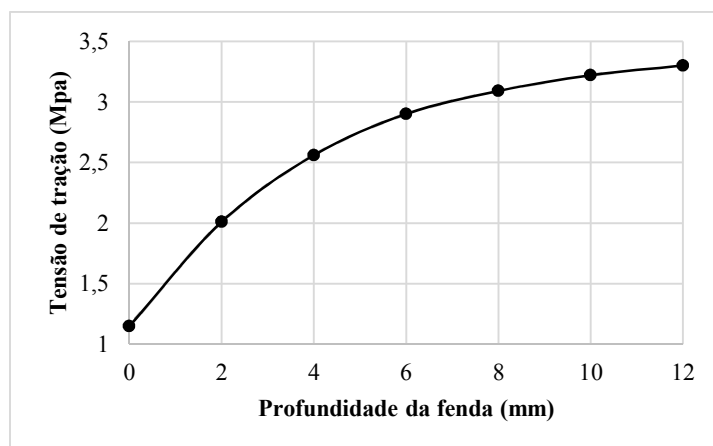


Fig. 8 - Máxima tensão de tração na base do provete do modelo de elementos finitos

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 $\mu\text{m/m}$.

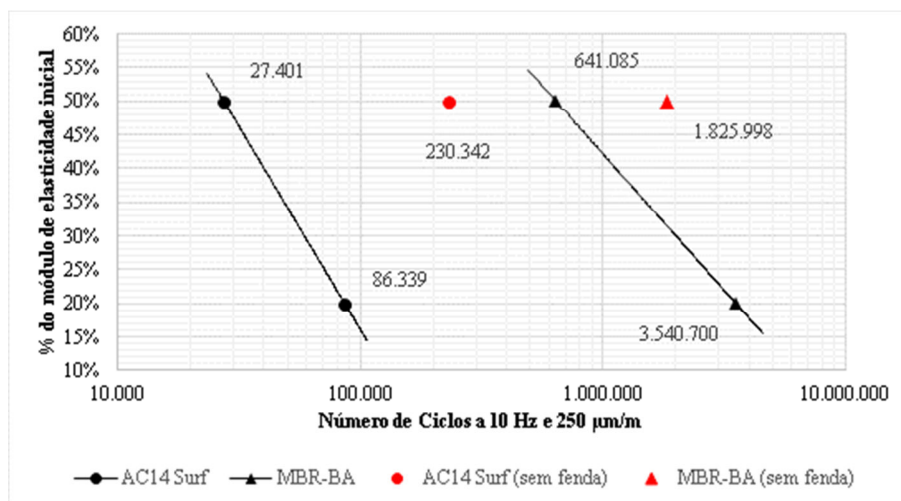


Fig. 9 - Número de ciclos para diferentes critérios de paragem (50% e 20%) à temperatura de 20°C

Da análise da Figura 9, no que respeita ao comportamento à fadiga das misturas betuminosas MBR-BA e AC14 Surf, podem obter-se várias inferências. Para o critério de paragem de 50% do módulo de deformabilidade inicial, a mistura MBR-BA, em relação à 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. Ou seja, quando se permite uma maior incidência de propagação da fenda (passar do critério de paragem de 50% para 20% tem esse efeito) nas mesmas condições de ensaio a MBR-BA permite um acréscimo de cerca de 100000 repetições por cada decréscimo de 1% de módulo de deformabilidade contra 2000 repetições da AC14surf nas mesmas condições. Tal indica, sem margem para dúvida e para as condições de ensaio descritas, que a mistura betuminosa com borracha adicionada por via seca, MBR-BA, possui uma muito maior capacidade para absorver os acréscimos de tensão gerados na zona envolvente à fenda induzida nos provetes, pelo que é legítimo admitir que terá uma muito maior capacidade para

resistir ao atravessamento por fendilhamento vindo de camadas inferiores, vulgo propagação de fendas.

Também, da Figura 9, é possível observar outra particularidade. 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-BA e a mistura AC14 Surf. Como seria de esperar, ambas as misturas, em provetes com fenda induzida, suportam um número de ciclos inferior às misturas em provetes sem fenda induzida, no entanto esta diferença é muito mais acentuada na mistura betuminosa AC14 Surf (cerca de 8 vezes inferior) do que na mistura betuminosa MBR-BA (cerca de 3 vezes inferior). Desta forma, também por aqui, se verifica que a mistura betuminosa com borracha adicionada por via seca, MBR-BA, tem uma muito maior capacidade para resistir à propagação de fendas, levando em conta as condições de ensaio descritas.

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* (Figura 10). Aqui foi também utilizado o dispositivo de pequeno porte com os provetes acondicionados ao ar, ou seja, procedimento B da norma EN 12697-22 (CEN, 2003a).

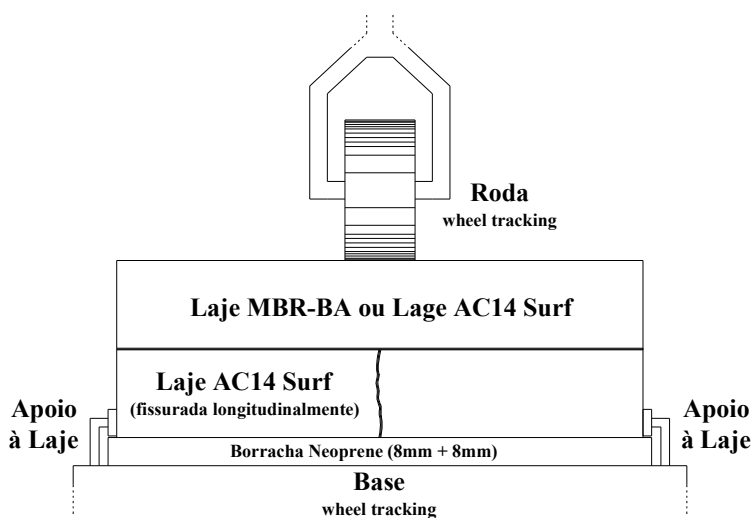


Fig. 10 - Disposição das lajes no ensaio de deformação permanente com fenda induzida

A adaptação que se efetuou ao ensaio, de acordo com a Figura 10, seguiu, essencialmente, o seguinte: 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.

Na Figura 11 está representada, para a temperatura de 20°C, a evolução da deformação do grupo de lajes AC14 Surf + AC14 Surf e AC14 Surf + MBR-BA ao longo do ensaio *Wheel Tracking*.

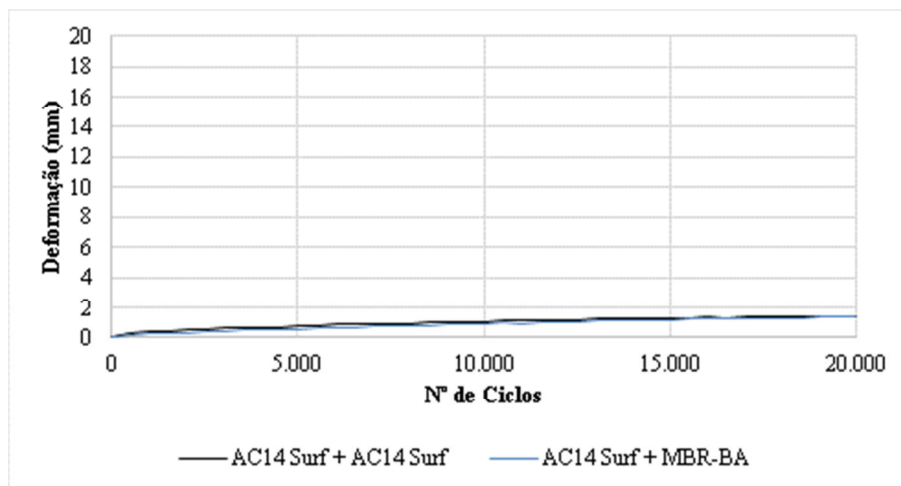


Fig. 11 - Deformação permanente à temperatura de 20°C

Na Figura 12 está representada, para a temperatura de 40°C, a evolução da deformação do grupo de lajes AC14 Surf + AC14 Surf e AC14 Surf + MBR-BA ao longo do ensaio *Wheel Tracking*.

Do Quadro 2 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-BA 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, PRD_{AIR} .

Relembrando o ensaio *Wheel Tracking* às lajes das misturas betuminosas MBR-BA e AC14 Surf sem fenda induzida, à temperatura de 60°C, (valores de WTS_{AIR} , RD_{AIR} e PRD_{AIR} resumidos 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-BA. Neste caso, com a presença de uma fenda induzida, na temperatura de 40°C, esta diferença foi maior (5 vezes).

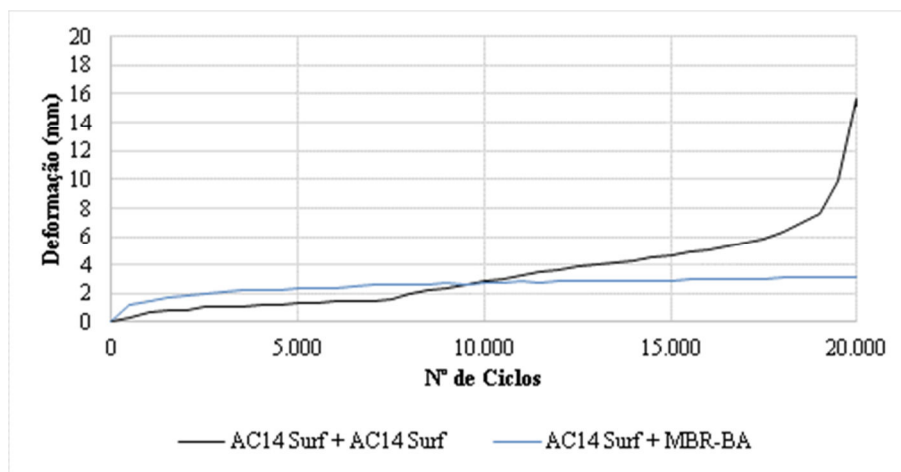


Fig. 12 - Deformação permanente à temperatura de 40°C

Apresenta-se, no 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-BA	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

De acordo com os resultados obtidos pode inferir-se que a mistura betuminosa com borracha adicionada por via seca, MBR-BA, 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.

CONCLUSÕES

Verificando-se que a mistura AC14 Surf, em relação à mistura MBR-BA, apresentou cerca do dobro de WTS_{AIR} de PRD_{AIR} e de RD_{AIR}, pode concluir-se que a mistura MBR-BA 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, suportou um nível de extensão bastante superior. De forma análoga, para o mesmo nível de extensão, a mistura betuminosa com borracha suportou 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 teve 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-BA suportou 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 suportaram os provetes com fenda induzida e sem fenda induzida foi mais alargada na mistura betuminosa AC14 Surf.

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 foi bastante superior ao da mistura MBR-BA, concluindo-se também daqui que a mistura betuminosa MBR-BA apresenta uma melhor resposta à presença de fendas nas camadas que a suportam.

Para efeitos de dimensionamento de um reforço sobre um pavimento fendilhado, considerando plausível a utilização dum coeficiente de translação de 2 para aplicação real (hipótese também verificada em Claessen et al. (1977), embora a indicação para a avaliação, por exemplo, à fadiga pelo método da Shell tivesse sido dada noutra sentido) ou seja sendo muito conservador, considerando que a vida útil da mistura betuminosa em serviço é metade da vida útil verificada em laboratório, indica-se o seguinte como orientação prática (Claessen Edwards, Sommer, & Ugé, 1977):

- no que respeita à resistência à fadiga, para um valor final do módulo de deformabilidade de 50% do valor inicial, um pavimento fendilhado reforçado com a mistura MBR-BA terá uma vida útil pelo menos 10 vezes superior a um pavimento reforçado com a mesma espessura dum mistura do tipo AC14 Surf;

- ainda relativamente à resistência à fadiga, para um valor final do módulo de deformabilidade de 20% do valor inicial, um pavimento fendilhado reforçado com a mistura MBR-BA terá uma vida útil pelo menos 20 vezes superior a um pavimento reforçado com a mesma espessura numa mistura do tipo AC14 Surf;
- em termos de comportamento à deformação permanente, um pavimento fendilhado reforçado com a mistura MBR-BA terá uma vida útil pelo menos 2,5 vezes superior a um pavimento reforçado com a mesma espessura numa mistura do tipo AC14 Surf.

Desta forma, com este estudo pode concluir-se que a mistura betuminosa com alta percentagem de borracha adicionada por via seca, MBR-BA, 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.

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.

REFERÊNCIAS

- [1]-CEDEX. (2007). Manual de Empleo de NFU en mezclas bituminosas. Espanha: Ministério de Fomento.
- [2]-CEN. (2003a). Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: wheel tracking. EN 12697-22. Bruxelas: European Committee for Standardization.
- [3]-CEN. (2003b). Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt - Part 33: Specimen prepared by roller compactor. EN 12697-33. Bruxelas: European Committee for Standardization.
- [4]-CEN. (2004a). Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue. EN 12697-24. Bruxelas: European Committee for Standardization.
- [5]-CEN. (2004b). Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness. EN 12697-26. Bruxelas: European Committee for Standardization.
- [6]-Claessen, A., Edwards, J., Sommer, P., & Ugé, P. (1977). Asphalt Pavement Design Manual: the SHELL Method. In 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements. Ann Arbor-Michigan: University of Michigan.
- [7]-Cong, P., Xun, P., Xing, M., & Chen., S. (2013). Investigation of Asphalt Binder Containing Various Crumb Rubbers and Asphalts. Construction and Building Materials, 40, 632-641.
- [8]-Crucho, J. (2011). 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 da Universidade de Lisboa.

- [9]-EP. (2014). *Caderno de Encargos Tipo Obra - Pavimentação*. Lisboa, Portugal: Estradas de Portugal.
- [10]-Feiteira Dias, J. (2011). *Misturas Betuminosas Incorporando por Via Seca Borracha de Pneus Usados - Caracterização e Validação Tecnológica*. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Tese de Doutoramento. Coimbra.
- [11]-Feiteira Dias, J., & Picado-Santos, L. (2009). *Avaliação de Desempenho de Misturas Betuminosas Rugosas com Incorporação de Alta Percentagem de Granulado de Borracha de Pneus Usados*. In XV Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto. Lisboa.
- [12]-Feiteira Dias, J., Picado-Santos, L., & Capitão, S. D. (2014). Mechanical performance of dry process fine crumb rubber asphalt mixtures placed on the Portuguese road network. *Construction and Building Materials*, 73, 247-254.
- [13]-FHWA. (2005). *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction*. Washington, D. C.: Federal Highway Administration.
- [14]-Fontes, L. (2009). *Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos*. Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Tese de Doutoramento. Guimarães.
- [15]-Hassan, N. A., Airey, G. D., Jaya, R. P., Mashros, N., & Aziz, M. M. A. (2014). A Review of Crumb Rubber Modification in Dry Mixed Rubberised Asphalt Mixtures. *Jurnal Teknologi*, 70, 127-134.
- [16]-Hassan, N. A., Hainin, M. R., Yaacob, H., Ismail, C. R., & Yunus, N. Z. M. (2013). Evaluation on Mix Design and Rutting Resistance of Dry Mixed Rubberised Asphalt Mixtures. *Jurnal Teknologi*, 65, 115-120.
- [17]-IPQ. (2011). *Betumes e ligantes betuminosos. Especificações para betumes de pavimentação*. NP EN 12591. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- [18]-López-Moro, F. J., Moro, M. C., Hernández-Olivares, F., Schultz, B. W., & Alonso-Fernández, M. (2013). Microscopic Analysis of the Interaction Between Crumb Rubber and Bitumen in Asphalt Mixtures Using the Dry Process. *Construction and Building Materials*, 48, 691-699.
- [19]-Moreno, F., Rubio, M. C., & Martinez-Echevarria, M. J. (2012). The Mechanical Performance of Dry-Process Crumb Rubber Modified Hot Bituminous Mixes: The Influence Of Digestion Time and Crumb Rubber Percentage. *Construction and Building Materials*, 26(1), 466-474.
- [20]-Picado-Santos, L., & Feiteira Dias, J. (2009). Assessment Performance of Bituminous Mixtures Incorporating Rubber Modified Bitumen. In *Sixth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPA6)*. Turin.
- [21]-Wang, H., Dang, Z., Li, L., & You, Z. (2013). Analysis on Fatigue Crack Growth Laws for Crumb Rubber Modified (CRM) Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*, 47, 1342-1349.
- [22]-Yin, J., Wang, S., & LV, F. (2013). Improving the Short-Term Aging Resistance of Asphalt by Addition of Crumb Rubber Radiated by Microwave and Impregnated Inepoxidized Soybean Oil. *Construction and Building Materials*, 49, 712-719.