

ESTUDO DO DESEMPENHO DE MISTURAS BETUMINOSAS COM INCORPORAÇÃO DE FIBRAS CELULÓSICAS

Márcia Lopes Afonso¹, Maria Maia¹, Marisa Dinis-Almeida¹, Fernando Martinho², Cristina Fael¹

¹ Centre of Materials and Building Technologies (C-MADE), University of Beira Interior, Calçada Fonte do Lameiro, Edifício II das Engenharias, 6200-358 Covilhã, Portugal, Tel: +351 275329706, Fax: +351 275329969, marcia.afonso@ubi.pt, marisa.dinis@ubi.pt, maria_msa5@hotmail.com, cfael@ubi.pt

² CERENA/DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001 Lisboa, Portugal; fernando.martinho@tecnico.ulisboa.pt

Resumo

As administrações de estradas em todo o mundo têm tomado consciência da importância do estudo das misturas betuminosas a aplicar nas camadas superficiais dos pavimentos rodoviários, face à necessidade de aumentar a durabilidade e o desempenho mecânico e funcional dos pavimentos. O principal objetivo deste estudo é avaliar o comportamento de quatro tipos de misturas, duas misturas drenantes e duas misturas densas. Foi, ainda, avaliada a influência da incorporação de fibras celulósicas aditivadas, com vista a melhorar a adesividade entre os agregados e o ligante. As fibras, de dois tipos distintos, irão contribuir para evitar a perda de ligante por escorrência, aumentar a afinidade entre agregado e betume e aumentar a resistência à deformação permanente.

Palavras Chave: Afinidade; Ensaio de *Wheel Tracking*, Ensaio Cântabro, Sensibilidade à água.

1 Introdução

A importância de alargar o ciclo de vida dos materiais, que fazem parte das diferentes camadas dos pavimentos, tem motivado diversas investigações e estudos sobre materiais mais amigos do ambiente e que aumentem a sua vida útil, levando a que menos recursos sejam gastos na conservação e reabilitação dos pavimentos.

Assim, a necessidade de melhorar a durabilidade das misturas tem levado à incorporação de aditivos, como as fibras celulósicas [1 - 5]. Estas fibras apresentam várias vantagens, como a ampla disponibilidade e o custo relativamente baixo, têm capacidade de ser recicladas, são biodegradáveis, não são perigosas para a natureza, apresentam pegada de carbono zero e boas propriedades mecânicas e físicas (baixa densidade e equilíbrio da rigidez, tenacidade e resistência [6, 7]. Um dos principais objetivos da utilização das fibras celulósicas é inibir o escorrimento do ligante (em misturas com maiores percentagens), evitando a sua perda durante o armazenamento, transporte e aplicação [8].

As primeiras gerações de misturas drenantes eram produzidas com altas percentagens de ligante para permitir uma melhor ligação entre os agregados surgindo, no entanto, o problema do seu endurecimento devido à baixa quantidade de mástique. Atualmente, são utilizados betumes modificados com polímeros com características diferenciadoras, como a elasticidade, a resistência face ao envelhecimento e às deformações plásticas, a boa adesividade com os agregados e a baixa suscetibilidade térmica.

O objetivo desta investigação é avaliar o desempenho e o comportamento de diferentes misturas betuminosas com e sem incorporação de fibras celulósicas. Estudaram-se quatro misturas diferentes, duas densas e duas drenantes, com e sem promotor de adesividade, na forma de fibras celulósicas impregnadas com uma amina. Depois de definida a composição e produzidas as misturas betuminosas, foi avaliado o seu desempenho através de ensaios laboratoriais de avaliação da sensibilidade à água e da resistência à deformação permanente.

2 Materiais e métodos

Esta investigação consistiu no estudo de formulação de quatro misturas betuminosas diferentes e na caracterização dos materiais utilizados na produção das mesmas. Produziram-se misturas sem fibras celulósicas (PA e AC14) e com fibras celulósicas (PA-F e SMA11-F). Posteriormente, foram realizados os ensaios de desempenho descritos na secção *Métodos*.

2.1 Materiais

Este artigo apresenta o estudo de quatro misturas betuminosas, duas misturas drenantes e duas misturas densas, constituídas por agregados naturais de origem granítica, fíler calcário, betume convencional 50/70, betume modificado com polímeros (do tipo SBS) e, ainda, fibras celulósicas, com e sem promotor de adesividade.

2.1.1 Aditivo

As fibras celulósicas utilizadas são grânulos constituídos por uma mistura de fibras naturais de celulose com betume, comercializadas pela JRS, J. Rettenmaier & Söhne. Estas fibras foram incorporadas como aditivo nas misturas betuminosas drenantes, de modo a melhorar as suas características, aumentando a sua durabilidade e o seu desempenho. Dado que as misturas betuminosas drenantes apresentam uma estrutura com poucos finos e, conseqüentemente, uma menor superfície de contacto entre os agregados grossos, a utilização das fibras celulósicas Viatop Premium visa permitir o aumento da quantidade de betume na mistura sem se verificar escorrência. Para além da retenção do ligante betuminoso e da homogeneização na sua repartição, as fibras favorecem o revestimento dos agregados, ou seja, a formação de uma película de betume com maior e constante espessura.

As fibras Viatop Plus AD10 incluem um aditivo que apresenta diversas vantagens, como a redução do envelhecimento e a melhoria do comportamento da mistura betuminosa a longo prazo. O ponto fulcral da incorporação deste aditivo nas misturas densas está relacionado com a melhoria da afinidade entre a superfície do agregado e o betume, conferida através da ação do promotor de adesividade e da quantidade de betume que é acrescida à mistura.

A caracterização pormenorizada apresenta-se na Tabela 1.

Tabela 1. Características das fibras celulósicas usadas

Características	Viatop Premium	Viatop Plus AD10
Do granulado:		
Aspeto	Grânulos cilíndricos	Grânulos cilíndricos
Conteúdo de fibras celulósicas	87 a 93%	83%
Comprimento médio dos grânulos	2 a 8 mm	2 a 8 mm
Diâmetro médio dos grânulos	5 ± 1 mm	3 a 5 mm
Densidade aparente	440 a 520 g/l	450 a 550 g/l
Análise granulométrica	max. 10% (#< 4,5mm)	max. 7% (#< 3,55mm)
Do betume:		
Betume de pavimentação 50/70	≈ 10% (cf. EN 12591)	≈ 10% (cf. EN 12591)
Do promotor de adesividade:		
<i>Fatty acid amide amine</i>	-	≈ 7%

2.1.2 Ligantes

O ligante utilizado na produção das misturas betuminosas drenantes foi o betume modificado com polímeros PMB 45/80-60, comercializado como Betume Elaster 13/60 da CEPESA Portuguesa Petróleos, S.A., indicado para aplicação em misturas descontínuas e abertas, como as misturas betuminosas drenantes. Este betume asfáltico modificado é obtido por reação química entre o ligante base e polímeros

de tipo elastomérico, que cumpre a especificação da norma EN 14023. A gama de temperaturas recomendadas para o fabrico das misturas situa-se entre os 155 a 165°C e para a compactação entre os 150 a 160°C. Quanto à recuperação elástica, segundo a norma EN 13398, o betume PMB 45/80-60 obteve um resultado superior a 70%.

O ligante utilizado na produção das misturas betuminosas densas foi o betume convencional 50/70 da mesma entidade. A gama de temperaturas recomendadas para o fabrico das misturas situa-se entre os 151 a 157°C e para a compactação entre os 142 a 146°C.

A caracterização dos betumes foi baseada no ensaio de penetração, segundo a norma EN 1426, e na temperatura de amolecimento, segundo a norma EN 1427, cujos valores são de 53 dmm e 63,2°C para o betume PMB 45/80-60 e 59 dmm e 47°C para o betume 50/70, respetivamente.

2.1.3 Análise granulométrica dos agregados

Esta investigação foi desenvolvida com agregados naturais de origem granítica, provenientes da região centro de Portugal. Foram utilizados granitos de diferentes frações (bago de arroz, pó de pedra e brita 5/15) e um fíler calcário.

A análise granulométrica dos agregados foi realizada de acordo com o método da peneiração, norma EN 933-1, cujos resultados estão na Figura 1. Na mistura drenante foi usado o fuso PA 12,5 e na mistura densa foi usado o fuso AC 14 surf, segundo o Caderno de Encargos Tipo Obra da Infraestruturas de Portugal, ex- Estradas de Portugal [9].

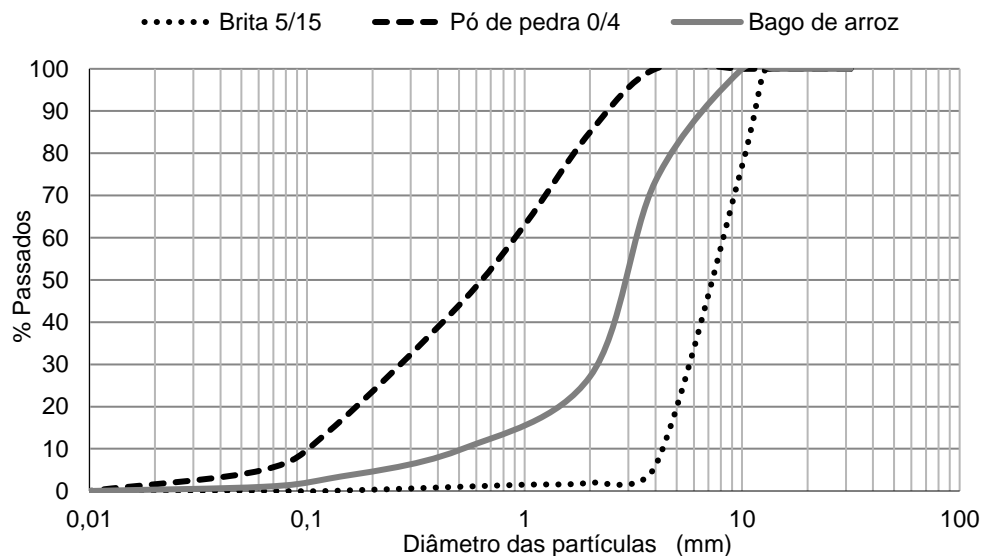


Figura 1. Curvas granulométricas dos agregados

2.2 Métodos

O programa experimental foi iniciado pela definição da composição das misturas betuminosas. Após a seleção da percentagem ótima de ligante para as misturas foi analisada a influência da adição de fibras celulósicas.

O ensaio de afinidade entre agregado e betume permitiu avaliar a influência desta propriedade na durabilidade e desempenho das misturas betuminosas densas. Por meio do ensaio de escorrimento selecionou-se a percentagem de fibras celulósicas que obteve o menor escorrimento no caso das misturas drenantes. Posteriormente, foram produzidas duas misturas betuminosas drenantes com a percentagem de fibras adotada. O desempenho das quatro misturas estudadas foi avaliado pelo ensaio de sensibilidade à água e deformação permanente.

2.2.1 Ensaio de afinidade agregado/betume

A norma europeia EN 12697-11 descreve o ensaio de afinidade entre agregado e betume através do registo visual da superfície de agregado coberta com betume. Este ensaio também pode ser utilizado como ferramenta de apoio no estudo de formulação de uma mistura betuminosa no sentido de procurar um betume com maior afinidade a um determinado agregado ou vice-versa.

Foi usado o método dinâmico com garrafa rotativa com água destilada, que inclui a preparação de dois conjuntos de amostras. O primeiro grupo, “sem aditivo”, consiste em envolver 600g de brita com 16 g de betume e o segundo grupo, “com aditivo” consiste na adição de fibras celulósicas com promotor de adesividade à mesma quantidade de agregado e betume. De seguida cada grupo de agregado é dividido em três parcelas, cada uma delas é transferida para garrafas, que posteriormente encher-se-ão de água destilada. O ensaio inicia com a colocação das garrafas na máquina giratória, com uma velocidade de 60 rotações por min. e, ao fim de $6\text{ h} \pm 15\text{ min.}$, é feita a primeira leitura. Depois deste período, regista-se a percentagem da superfície de agregado coberta com betume e o ensaio prossegue até perfazer as 24 horas. No final, regista-se novamente a percentagem da superfície dos agregados ainda revestida com betume.

A afinidade é expressa pelo registo visual da superfície de agregado coberta com betume, em percentagem da superfície total de agregado, após a influência da ação de agitação mecânica.

2.2.2 Influência das fibras celulósicas pelo ensaio de escorrimento

O objetivo da incorporação das fibras celulósicas nas misturas drenantes é, para além das vantagens referidas na secção anterior (relativamente ao aumento de afinidade entre agregado e betume), obter misturas descontínuas com maior conteúdo de ligante, não se verificando o escorrimento do ligante betuminoso enquanto são armazenadas e/ou transportadas. A adição de fibras celulósicas inibe a ocorrência de heterogeneidades na repartição do mástique da camada aplicada, como porosidades muito diferentes e consequentes degradações precoces. A incorporação das fibras retém o ligante betuminoso e favorece o revestimento dos agregados, levando a um maior desempenho e durabilidade das misturas. Face a esta situação, nas misturas com adição de fibras, optou-se pela utilização de uma percentagem superior de betume.

A influência das fibras celulósicas foi analisada através da determinação do escorrimento do ligante nas misturas betuminosas drenantes pelo Método de *Schellenberg* de acordo com a norma EN 12697-18. As misturas foram produzidas com diferentes percentagens de fibras celulósicas: 0,0; 0,2; 0,4 e 0,5% (limite máximo recomendado pelo fabricante). O procedimento consistiu em produzir três amostras de mistura para cada percentagem de fibras colocando-se em estufa durante 60 minutos à temperatura de ensaio, neste caso de 180°C . Através do quociente entre o peso dos resíduos da mistura após os 60 minutos em estufa e o peso da mistura logo após ser produzida resulta a percentagem de escorrimento obtida. O resultado final é a média das três amostras realizadas por percentagem de fibras utilizada.

2.2.3 Caracterização das misturas

Após a produção das misturas betuminosas, de acordo com o estudo de composição e a incorporação da percentagem de fibras mais adequada, procedeu-se à caracterização das misturas betuminosas PA, PA-F, AC14 e SMA11-F. No caso das misturas PA e PA-F as propriedades determinadas foram a baridade, a porosidade e a perda por desgaste pelo ensaio Cântabro, húmido e seco. No caso das misturas AC14 e SMA11-F, as propriedades determinadas foram a baridade, a porosidade, e a estabilidade e deformação Marshall.

2.2.4 Ensaio de Sensibilidade à água

O ensaio de sensibilidade à água foi realizado de acordo com a norma EN 12697-12. Por cada percentagem ótima de betume produziram-se oito provetes cilíndricos. Estes foram separados em dois

grupos. O grupo a seco foi acondicionado ao ar a 20°C durante um período de 68 a 72h. O grupo imerso foi previamente submetido a vácuo em água durante 30 minutos com uma pressão absoluta de 6,7 kPa seguido do banho em água a 40°C durante 68 a 72 horas. De seguida, os dois grupos foram ensaiados à compressão diametral de acordo com a norma EN 12697-23 com uma aplicação de carga a velocidade constante de 50 mm/min. Os resultados do ensaio de sensibilidade à água são a resistência conservada em tração indireta (ITRS - *Indirect Tensile Strength Ratio*) pela EN 12697-12 e a resistência à tração indireta (ITS - *Tensile Strength Indirect*) pela EN 12697-23. A avaliação da sensibilidade à água em misturas drenantes é importante, porque é uma propriedade que está diretamente relacionada com o desempenho e durabilidade das misturas durante o tempo de vida do pavimento.

2.2.5 Resistência à deformação permanente

A resistência à deformação permanente das quatro misturas foi avaliada pelo *Wheel Tracking test*, de acordo com a norma EN 12697-22, usando um equipamento de pequenas dimensões e o procedimento B (ao ar). Foram preparadas duas lajetas por cada mistura, com as dimensões de 30 x 30 x 4 cm, compactadas com uma placa vibratória. O ensaio teve início após 7 dias de tempo de cura. A temperatura de realização do ensaio foi de 50°C (que é uma temperatura mais adequada à realidade climática da região), sendo que as lajetas foram acondicionadas à mesma temperatura, antes da realização do ensaio, por um período mínimo de 4 h. A carga aplicada foi de 700 N com uma frequência de 26,5 ciclos de carga/minuto. O ensaio terminou quando se atingiram os 10 000 ciclos de carga aplicados.

Os parâmetros obtidos para este ensaio são o declive máximo de rodeira (WTS_{AIR} - *Wheel Tracking Slope in air*), a profundidade média proporcional (PRD_{AIR} - *mean Proportional Rut Depth in air*) e a profundidade média de rodeira (RD_{AIR} - *Mean Rut Depth in air*).

3 Resultados e discussão

3.1 Composição das misturas betuminosas

O estudo de composição granulométrica das misturas é apresentado na Tabela 2. Verifica-se que para as misturas PA e PA-F os valores apresentados são iguais pois a composição granulométrica apenas depende dos agregados e não da percentagem de aditivo.

Tabela 2. Composição das misturas betuminosas (%)

Materiais	PA	PA-F	AC14	SMA11-F
Betume PMB 45/80-60 (*)	4,6	5,1	-	-
Betume 50/70 (*)	-	-	5,3	5,8
Filler calcário	2	2	5	8
Pó de Pedra	4	4	17	16
Bago de Arroz	-	-	23	32
Brita 5/15	94	94	55	44

(*) Percentagem sobre o peso total de agregados

3.2 Ensaio de afinidade agregado /betume

Relativamente ao grupo “sem aditivo”, verifica-se através da observação da Figura 2, que após 6 horas de ensaio a percentagem de revestimento é igual a 77% e após as 24 horas é igual a 43%. Relativamente ao grupo “com aditivo”, verifica-se que após 6 horas de ensaio a percentagem de revestimento é igual a 78% e após as 24 horas é igual a 53%.

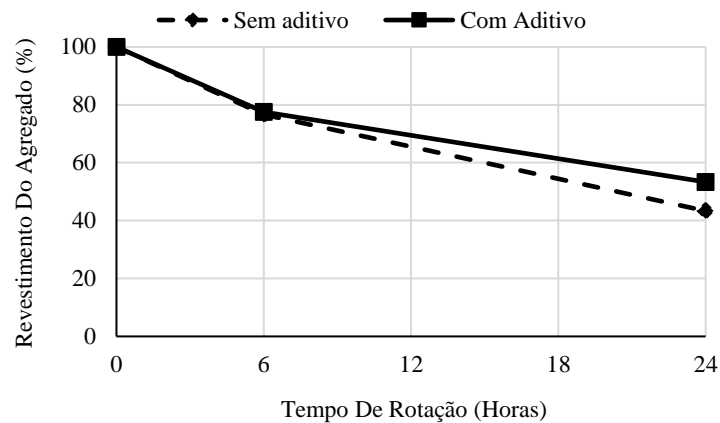


Figura 2. Percentagem de revestimento do agregado após 6 horas e 24 horas.

Pela análise dos resultados pode concluir-se que ao fim de 6 horas a diferença da percentagem de revestimento do agregado com betume não é significativa. No entanto, ao fim de 24 horas verifica-se que a mistura com aditivo apresenta valores superiores em cerca de 10%, confirmando o efeito do promotor de adesividade. Esta realidade pode ser observada nos agregados mostrados na Figura 3.



Figura 3. Aspeto de agregados após ensaio de afinidade agregado/betume

3.3 Ensaio de escorrimento (método de Schellenberg)

A produção de misturas com adição de fibras celulósicas realizou-se com as percentagens de betume de 5,1% para a mistura betuminosa drenante, variando a quantidade de fibras em 0,0; 0,2; 0,4 e 0,5% (limite recomendado pelo fabricante). Os resultados obtidos pelo Método de Schellenberg estão apresentados na Figura 4. Observa-se que, no geral, o escorrimento do ligante vai diminuindo à medida que a percentagem de fibras celulósicas aumenta. A utilização de 0,5% de fibras celulósicas para a mistura PA-F apresenta uma redução de 0,3%, em relação à mistura sem fibras. Tendo em conta os resultados, a percentagem de fibras celulósicas selecionada como a mais adequada para a mistura drenante foi de 0,5%. Os ensaios de desempenho apresentados de seguida caracterizam estas misturas e as misturas sem fibras celulósicas.

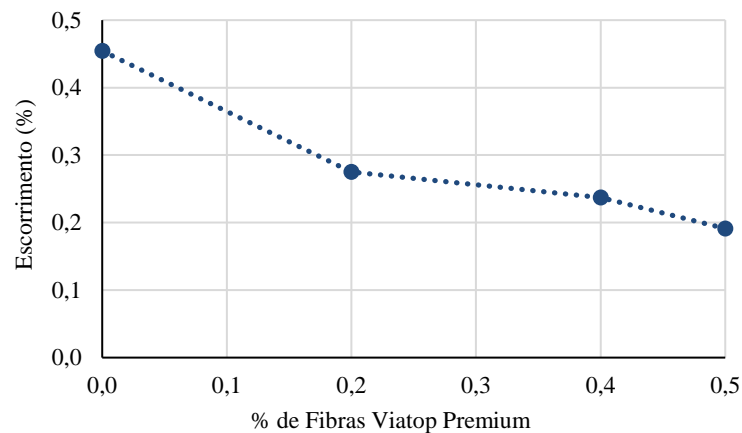


Figura 4. Resultados do ensaio de escorrimento para as misturas betuminosas drenantes

3.4 Caracterização das misturas betuminosas

Os resultados da baridade, porosidade e ensaio Cântabro para as misturas drenantes apresentam-se na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades das misturas drenantes

Mistura betuminosa	Betume (%)	Baridade (kg/m ³)	Porosidade (%)	Cântabro seco PA (%)	Cântabro húmido PS (%)
PA	4,6	1950	20,7	7	8
PA-F	5,1	1940	18,6	9	21

Os resultados da baridade, porosidade, estabilidade e deformação Marshall para as misturas densas apresentam-se na Tabela 4.

Tabela 4. Propriedades das misturas densas

Mistura betuminosa	Betume (%)	Baridade (kg/m ³)	Porosidade (%)	Estabilidade Marshall (kN)	Deformação Marshall (mm)
AC14	5,3	2300	4,0	17,7	5,2
SMA11-F	5,8	2330	1,8	16,8	5,5

3.5 Ensaio de sensibilidade à água

A Figura 5 apresenta os resultados do ensaio de sensibilidade à água. Os provetes secos apresentam maiores valores de ITS, como era esperado, devido ao efeito da presença de água a 40°C nos provetes imersos.

O Caderno de Encargos [9] não referencia qualquer requisito para o ensaio de sensibilidade à água. A norma espanhola PG3-3 [10] refere um valor de ITSr mínimo de 80% para a misturas densas. As misturas AC14 e SMA11-F obtiveram valores de 86% e 83%, respetivamente, estando acima desse valor. A norma suíça SN 640 [11] indica um valor de ITSr mínimo de 70% para misturas drenantes. As misturas PA e PA-F obtiveram valores de 60% e 66%, respetivamente, estando bastante próximas desse valor.

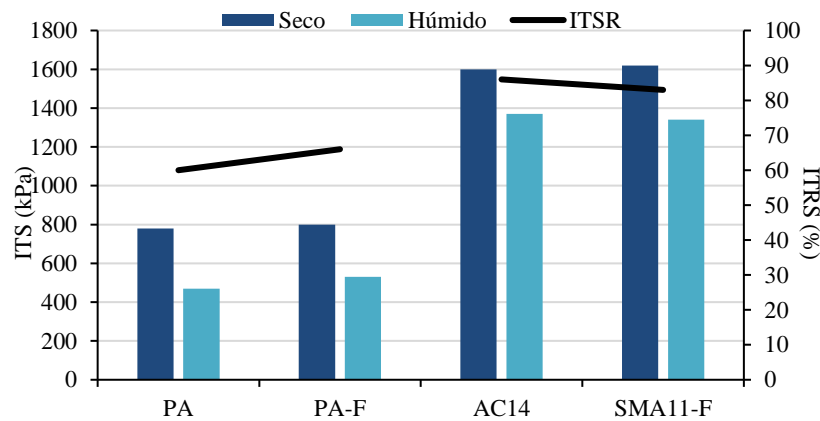


Figura 5. Sensibilidade à água, ITS e ITSR (média 3 provetes)

3.6 Resistência à deformação permanente

Na Figura 6 estão apresentados os resultados obtidos de profundidade de rodeira em função do número de ciclos, para as misturas betuminosas estudadas. Pela análise da figura é possível observar o efeito da adição de fibras celulósicas no desempenho da deformação permanente nas diferentes misturas. Tanto a mistura SMA11-F como a PA-F demonstram um desempenho melhorado em termos de resistência à deformação apesar de as misturas betuminosas terem mais betume incorporado, como pode ser observado pelas curvas com menor profundidade de rodeira. Estes resultados estão relacionados com a melhoria da adesão entre o betume e os agregados, proporcionada pela boa repartição, na mistura, dos mástiques que incluem as fibras celulósicas.

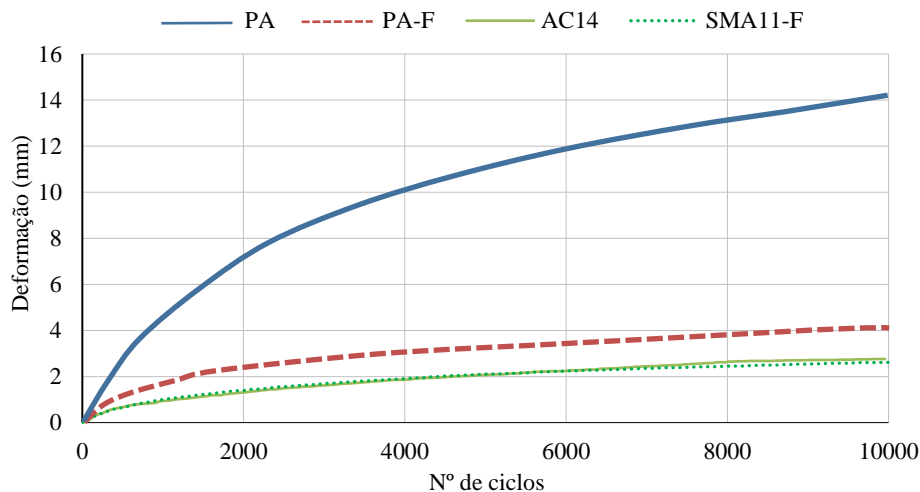


Figura 6. Resultados do ensaio de deformação permanente, a 50°C

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos nos ensaios de *wheel tracking* de acordo com os principais parâmetros que caracterizam a resistência à deformação permanente. Nas misturas drenantes sem fibras verificou-se que o betume funcionou como um lubrificante nas ligações dos agregados, aumentando a RD_{AIR} . A mistura PA apresentou a maior RD_{AIR} e o menor WTS_{AIR} , devendo-se ao facto de entre os 5 000 e os 10 000 ciclos a deformação ser praticamente constante, variando apenas 0,47 mm. Esta demonstração não pode ser observada na figura devido à representação das linhas de tendência logarítmicas, que facilitaram o traçado das curvas.

Tabela 5. Principais parâmetros obtidos pelo ensaio de deformação permanente

Parâmetros	<i>Misturas sem fibras</i>		<i>Misturas com fibras</i>	
	<i>AC14</i>	<i>PA</i>	<i>SMA11-F</i>	<i>PA-F</i>
Porosidade (%)	2,3	27,3	6,3	26,5
Taxa de Deformação Média (WTS_{AIR}) (mm/10 ³ ciclos)	0,14	0,09	0,11	0,45
Média da Profundidade de Rodeira (RD_{AIR}) (mm)	2,75	13,97	2,62	5,21

As misturas AC14 e SMA11-F apresentam valores muito próximos, pois são representadas pelo seu valor médio de profundidade de rodeira. No entanto, a mistura SMA11-F apresenta os melhores resultados e mais similares entre as duas amostras ensaiadas.

Neste estudo, fica clara a melhoria da resistência à deformação permanente das misturas com o uso de fibras celulósicas, com percentagens de betume superiores às incluídas nas misturas convencionais. Este aumento de betume traduzir-se-á num aumento da resistência à fadiga e num acréscimo da durabilidade das misturas.

4 Conclusões

Este artigo apresentou o desempenho de misturas betuminosas sem e com a adição de fibras celulósicas. A incorporação de fibras celulósicas permitiu aumentar a quantidade de betume das misturas, possibilitando a sua retenção e um melhor revestimento com os agregados e, conseqüentemente, uma maior durabilidade da mistura. Os ensaios realizados permitiram obter as seguintes conclusões:

- (1) O ensaio de afinidade entre o agregado e o betume confirmou o efeito de promotor de adesividade das fibras. Da mesma forma, o ensaio de escorrimento mostrou que a utilização de 0,5% de fibras inibe o escorrimento do betume, pelo que se considerou a percentagem ideal na composição das misturas drenantes;
- (2) Os resultados de sensibilidade à água para cada grupo de misturas densas e drenantes mostram valores muito próximos entre si, com e sem utilização de fibras. Os valores de ITSR da mistura PA apresentam-se ligeiramente inferiores à mistura PA-F, sendo estas mais resistentes na presença de água;
- (3) Na generalidade, os resultados de resistência à deformação permanente indicam um melhor comportamento das misturas com fibras celulósicas, verificando-se uma profundidade de rodeira superior para as misturas sem fibras celulósicas. Neste estudo, verificou-se que as misturas com maiores percentagens de betume até apresentaram melhor desempenho à deformação permanente. Este facto estará relacionado com uma melhor redistribuição do mástique e com a retenção do betume por parte das fibras celulósicas.

Em conclusão, a adição de fibras celulósicas em misturas leva a bons resultados de desempenho mecânico, permitindo a utilização deste tipo de misturas com garantias de maior durabilidade, bom funcionamento e, conseqüente, maior segurança para os utentes.

5 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à JRS, J. Rettenmaier & Söhne, pelo fornecimento das fibras celulósicas, à CEPESA pelo fornecimento do betume e à Pedreira da Capinha pelo fornecimento dos agregados novos. Este trabalho é apoiado por fundos nacionais Portugueses pela FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia referente ao projeto UID/ECI/04082/2013.

6 Referências

- [1] Ardanuy, M., Claramunt, J., & Toledo Filho, R. D. (2015). Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and Building Materials*, 79, 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>
- [2] Kandhal, P. S. (2002). Design, construction and maintenance of open-graded asphalt friction courses. *National Asphalt Pavement Association*, 115, 29.
- [3] NCHRP. (2015). *Fiber additives in asphalt mixtures, A synthesis of highway practice. National Cooperative Highway Research Program NCHRP* (Vol. 475). National Cooperative Highway Research Program.
- [4] Putman, B. J. (2012). Evaluation of open-graded friction courses: construction, maintenance, and performance. *South Carolina Department of Transportation in Cooperation with FHWA Report No. FHWA-SC-12-04*, (October), 119.
- [5] Yan, L., Kasal, B., & Huang, L. (2016). A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. *Composites Part B: Engineering*, 92, 94–132. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.002>
- [6] Satyanarayana, K. G., Arizaga, G. G. C., & Wypych, F. (2009). Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers-An overview. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 34(9), 982–1021. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.12.002>
- [7] Wambua, P., Ivens, J., & Verpoest, I. (2003). Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, 63(9), 1259–1264. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00096-4](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00096-4)
- [8] Martinho, F., Lanchas, S., Nunez, R., Batista, F., & Miranda, H. (2013). A experiência portuguesa em misturas betuminosas do tipo SMA com fibras celulósicas. *7º Congresso Rodoviário Português, At Lisboa*, 1–10.
- [9] Estradas de Portugal, S. A. (2014). Caderno de Encargos Tipo Obra, Pavimentação, 14.03 Características dos materiais e 15.03 Métodos construtivos. Lisboa, Portugal: Estradas de Portugal. Retrieved from http://www.infraestruturasdeportugal.pt/sites/default/files/cet/14_03_set_2014.pdf
- [10] Dirección General de Carreteras. (2014). *Pliogo de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3)*. Ministerio de Fomento. España.
- [11] SN 640 431-7a-NA. (2008). Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 7: Offenporiger Asphalt. Requirements Bituminous mixtures – Material specifications – Part 7: Porous asphalt. *National Annex to the European Standard EN 13108-7*.