

OS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS EM CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS. IMPACTES AMBIENTAIS DA DRENAGEM

Ana Rita Simões¹, Ana Estela Barbosa², Simona Fontul³ e Ana Cristian Freire⁴

¹, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Quinta da Torre, Edifício IX, 2829-616 Caparica, Almada, Portugal

email : ar.simoes@campus.fct.unl.pt

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente, Av. Brasil, 101 1700-066 Lisboa, Portugal

^{3,4} Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Transportes, Av. Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

Sumário

A precipitação e a temperatura são as variáveis que suscitam preocupações no que diz respeito ao comportamento dos pavimentos rodoviários em cenários de alterações climáticas. A primeira é relevante no que concerne à alteração do teor em água, influenciando a deterioração do pavimento. A segunda, tem efeitos ao nível do envelhecimento das infraestruturas rodoviárias. Outra problemática, é a alteração da qualidade das escorrências rodoviárias nestes cenários. Este artigo tem o objetivo multidisciplinar de investigar os potenciais efeitos do aumento da temperatura na acumulação de poluentes particulados à superfície do pavimento. Para isso recorreu-se à realização de ensaios laboratoriais e à criação de duas novas metodologias de avaliação de retenção de partículas em lajetas constituídas por misturas betuminosas.

Palavras-chave: Alterações climáticas; Adaptação; Pavimentos Rodoviários; Qualidade das águas de escorrência; Poluentes particulados

1 INTRODUÇÃO

O clima sempre representou um risco para os pavimentos rodoviários, sendo conjuntamente com as solicitações do tráfego uma das principais causas da sua deterioração. Nos últimos anos, as ondas de calor do Verão, as secas e o aumento das inundações têm causado danos visíveis nos pavimentos e prejuízos significativos aos utentes e aos responsáveis pela sua manutenção. Estes eventos tenderão a ocorrer com maior frequência e intensidade no futuro, com a prevista subida da temperatura, bem como com o aumento da frequência de eventos extremos de precipitação. Os pavimentos rodoviários são suscetíveis a danos superficiais em resultado do aumento de temperatura, e ainda a severos danos estruturais, como resultado de níveis de precipitação muito superiores aos critérios de dimensionamento da drenagem. A maneira como os pavimentos se tornam vulneráveis às ações do clima depende de fatores específicos da sua localização tais como a latitude; proximidade de zonas costeiras; geologia e ainda do volume e tipo de tráfego. A vulnerabilidade de um pavimento é superior quando existem outros problemas locais, como drenagem inadequada e humidade do solo.

Um outro aspeto ambiental a ter em consideração nas estradas é a poluição associada às suas águas de escorrência. Estas transportam quantidades significativas de sólidos em suspensão, matéria orgânica, metais pesados e hidrocarbonetos. Existem já estudos a nível internacional sobre os impactes das alterações climáticas nos pavimentos rodoviários, no entanto estes tendem a dar mais relevância às condições dos pavimentos, materiais e manutenção e raramente são considerados os impactes ambientais, nomeadamente na qualidade da água. Entende-se que a adaptação dos pavimentos rodoviários às alterações climáticas com o objetivo de melhorar a sua performance e reduzir custos de manutenção é também uma oportunidade para controlar a poluição proveniente das escorrências de estradas. Este artigo apresenta um estudo multidisciplinar efetuado no

âmbito duma dissertação de mestrado, integrando pesquisa bibliográfica e ensaios laboratoriais em misturas betuminosas, realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

2 IMPACTES DA TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO NOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Os impactes das alterações climáticas variam de região para região, refletindo diferenças na magnitude das variações e nas condições existentes. Estas alterações têm o potencial de afetar a sociedade, as atividades humanas e o meio ambiente de diferentes maneiras. Por exemplo, alterações no regime de precipitação afetam o ciclo da água e todas as atividades que usam este recurso, como a agricultura e o abastecimento de água às populações.

Temperatura, radiação solar, chuva e o aumento do nível de água subterrâneos são as variáveis relacionadas com as alterações climáticas que mais afetarão os pavimentos rodoviários. De seguida descrevem-se os principais efeitos da temperatura e precipitação no pavimento rodoviário.

2.1 Temperatura

Os primeiros impactes nos pavimentos rodoviários devidos à subida da temperatura serão exsudação, formação de cavados de rodeira e endurecimento por envelhecimento, o que resulta em desagregação e fendilhamento (cf. Fig.1)

O ligante das misturas betuminosas é um material viscoelástico e, portanto, as suas propriedades dependem da temperatura do pavimento. Como os ligantes betuminosos são classificados de acordo com o seu desempenho perante a temperatura, é expectável que as variações de temperatura alterem o comportamento de um material já colocado num determinado local. O fendilhamento poderá ser um problema quando se espera a conjugação do aumento da precipitação com a subida da temperatura máxima. A subida da temperatura à superfície do pavimento tem como consequência direta a perda de rigidez da mistura betuminosa o que, acompanhado pela intensificação da radiação UV, causa uma sobrelevação da taxa de oxidação. Este fenómeno implica a redução da capacidade de “flexibilidade” da mistura betuminosa (endurecimento por envelhecimento), provocando a diminuição de suporte das forças induzidas pelo tráfego automóvel, resultando no fendilhamento da superfície do pavimento e perda de material por desagregação. Com o fendilhamento da superfície, o pavimento torna-se muito mais suscetível à infiltração da água para as camadas interiores. A formação dos cavados de rodeira dá-se, principalmente, quando a temperatura da mistura betuminosa excede os 45°C.



Fig. 1. Anomalias em pavimentos rodoviários: exsudação [1], formação de cavalos de rodeira e fendilhamento [2]

Vários estudos demonstram a relação entre a temperatura da superfície do pavimento rodoviário e a temperatura ambiente, sendo a primeira mais elevada em cerca de 7°C [2]. Conforme observado em [3] a temperatura da superfície dos pavimentos rodoviários é mais alta quando comparada com superfícies como a relva, o solo ou o betão. Dada a importância do efeito da temperatura nas misturas betuminosas, esta variável é um fator determinante nos ensaios laboratoriais em que se estudam, por exemplo, as deformações permanentes dos pavimentos [4]. A temperatura condiciona fortemente o comportamento viscoelástico do material, e consequentemente o valor da deformação permanente sob a ação da passagem repetida do tráfego [4].

Para seleccionar a temperatura de ensaio mais adequada é necessário observar os registos climatológicos. Foi proposto para as diferentes zonas de Portugal continental, recorrendo ao Método do Espectro de Temperaturas no Pavimento (desenvolvido por [5]) a adoção de temperaturas de ensaio na ordem dos 40°C ou 50°C, consoante

a zona climática em que se situa o pavimento, conforme indicado no Quadro 1 [4]. Refira-se que este estudo considerou temperaturas ambientes médias registadas em Portugal continental entre 1967 e 1989. Em cenários de alterações climáticas e com previsões de aumento de temperatura, será pertinente vir a considerar a realização de ensaios à temperatura de 60°C.

Quadro 1. Temperaturas de ensaio propostas por zona climática de Portugal Continental [4]

Zona Climática	Temperatura (°C)
Zona quente	50°C
Zona média-Sul e zona média-Note	45°C
Zona temperada	40°C

Em climas mediterrânicos, como é o caso de Portugal é óbvio que os efeitos da temperatura no pavimento rodoviário terão variações sazonais, ao longo do ano. Os danos causados pela passagem de tráfego automóvel no Verão são muito mais significativos do que no Inverno, em termos de deformação permanente.

2.2 Precipitação

A precipitação pode afetar fortemente o desempenho do pavimento rodoviário. Uma modificação dos eventos de precipitação pode alterar o teor de humidade de um pavimento levando a problemas de deterioração do material à superfície (*cf.* Fig. 2) resultando em ninhos e peladas no pavimento rodoviário. Este desprendimento de material deve-se à combinação de fatores suscetíveis à ocorrência do fenómeno: envelhecimento da mistura betuminosa e a penetração de água até aos espaços de ar das camadas granulares subjacentes.



Fig. 2. Estado duma estrada após precipitação intensa

O envelhecimento devido ao aumento de temperatura leva a perda de propriedades viscoelásticas do ligante, que se torna quebradiço. No seguimento deste fenómeno ocorre a quebra de ligações nas camadas de mistura betuminosa, o que origina desagregação e perda de material. No entanto, o problema causado pelo excesso de precipitação que maior preocupação gera, é a destabilização das camadas inferiores não ligadas (base e sub-base). Com o tráfego automóvel são induzidas forças de compressão que geram pressão, fazendo com que a água ascenda à superfície, lavando as partículas finas do material granular. Nesta situação, se a água não for drenada com eficácia, a perda de capacidade de carga leva ao fendilhamento da camada superficial. Para evitar esta anomalia, os sistemas de drenagem devem ser eficientes para que a água de escorrência do pavimento não fique demasiado tempo acumulada na superfície do mesmo. [2]

Eventos de precipitação de maior intensidade e tempestades podem levar a dois problemas de extrema importância: a erosão das plataformas rodoviárias e o bloqueio do sistema de drenagem, devido não só a intensidade do fenómeno como à acumulação de detritos.

2.3 Temperatura e precipitação vs. Poluentes rodoviários

No Quadro 2 apresenta-se uma síntese dos potenciais impactes nos pavimentos rodoviários resultantes quer do aumento de temperatura, quer do aumento dos fenómenos extremos de precipitação, avaliados em combinação com os aspetos de poluição da drenagem, que são complementados no capítulo 3.

Quadro 2 Principais efeitos das alterações climáticas nos vários tipos de pavimentos e impactes diretos e indiretos nas escorrências rodoviárias e no meio hídrico (extraído de [6])

Tipo de pavimento	Aumento da temperatura tem como impactes diretos:	Aumento de eventos de precipitação extremos tem como impactes diretos:
Flexível e semi-rígido*	T1- Amolecimento do pavimento em funcionamento pode conduzir a uma incorporação de poluentes acumulados na própria mistura betuminosa ⇒ Redução de poluentes nas escorrências rodoviárias após períodos secos e quentes T2- O envelhecimento acelerados do ligante conduz à desagregação de partículas do pavimento ⇒ Incremento de partículas do pavimento e poluentes associados nas escorrências superficiais	P1- Maior estagnação de água na superfície dos pavimentos ⇒ Maior infiltração de água ⇒ Redução acelerada da capacidade estrutural ⇒ Consequências semelhantes a T2 e T3: Incremento de partículas do pavimento e poluentes associados nas escorrências superficiais P2 – Aumento do nível freático subjacente à estrutura do pavimento ⇒ Perda de capacidade de carga e ocorrência de deformações que podem conduzir tanto ao incremento de partículas nas escorrências como a maior infiltração de poluentes dissolvidos e contaminação de águas subterrâneas
Rígido	T3- Facilmente criam microfendilhamentos e se degradam ⇒ Incremento de partículas do pavimento e poluentes associados nas escorrências superficiais	

*Tipos mais comuns em Portugal

Impactes indiretos do aumento de temperatura e redução da precipitação média anual, em Portugal	Redução da vegetação nas zonas envolventes à estrada conduzirá a maior erosão em aterros. O fenómeno incrementa diretamente o transporte de sólidos, mas também conduz à instabilidade da plataforma rodoviária e restante envolvente ⇒ Incremento de partículas e poluentes nas escorrências superficiais
--	--

3 A DRENAGEM DO PAVIMENTO RODOVIÁRIO E A POLUIÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

A gama variada de poluentes presentes nas estradas está associada a atividades de manutenção, que incluem por exemplo a limpeza e manutenção dos sistemas de drenagem, a utilização de herbicidas para controlar o crescimento da vegetação nos taludes e separadores centrais. A aplicação de sal para acelerar o processo físico de degelo nas estradas, pode exacerbar a libertação de metais tóxicos associados a partículas de pequenas dimensões e a sedimentos. Nos últimos anos esta aplicação tem-se vindo a acentuar em Portugal, principalmente a maiores altitudes. Uma grande parte dos poluentes encontrados nas águas de escorrência rodoviária provem dos automóveis, como por exemplo: produtos de combustão de hidrocarbonetos; aditivos e catalisadores; perdas de líquido de lubrificação; desgaste dos pneus; e degradação de materiais provenientes da pintura, pneus e carroçaria [7]

O Projeto G-Terra “Diretrizes para a gestão integrada da poluição das escorrências de estradas em Portugal” identificou o Zn, Cu, Fe, SST e CQO como os poluentes prioritários a considerar na avaliação da qualidade das escorrências rodoviárias [7]. Os poluentes rodoviários encontram-se presentes nas escorrências nas formas particuladas (associadas a partículas de diferentes dimensões) ou dissolvidos. A maior parte dos poluentes particulados encontra-se associado às partículas de menores dimensões, assim sendo, a remoção destas

partículas, por exemplo, em bacias de retenção, permite que a escorrência rodoviária seja descarregada no meio ambiente, após tratamento, com uma menor carga poluente.

4 ÂMBITO E OBJETIVOS DO TRABALHO EXPERIMENTAL

Vários investigadores estão atualmente a avaliar os impactes diretos e indiretos das alterações climáticas na gestão dos recursos hídricos. A tarefa não é assim tão fácil, tendo em conta as incertezas associadas aos cenários futuros (por exemplo: [8]). Devido a alterações na precipitação, os processos relativos ao transporte de poluentes de fontes de poluição difusa, como é o caso do escoamento rodoviário, irão apresentar padrões diferentes, comparados com os habituais. Os estudos recentes dedicados aos impactes das alterações climáticas na manutenção dos pavimentos rodoviários estão principalmente focados nos materiais dos pavimentos e nos custos de manutenção e as conclusões têm por base ferramentas de modelação (por exemplo estudos de [9] e de [10]). Ao avaliar o escoamento de estradas no cenário das alterações climáticas, os especialistas preocupam-se com o transporte e descarga de maiores volumes de água e com o aumento dos caudais durante os eventos de precipitação (por exemplo: [11] e [12]). O foco destes trabalhos é a precipitação, que é claramente uma questão crítica que merece atenção. Relativamente à temperatura que também se prevê que venha a aumentar, esta não é considerada nos estudos apesar de ter sido correlacionada com a concentração de poluentes [13]. Na situação climática atual de Portugal, a temperatura em pavimentos flexíveis, em diferentes zonas climáticas do país, pode atingir os 40°C ou 50°C [14]. Portanto, em condições de futuras alterações climáticas podem-se esperar temperaturas mais elevadas, principalmente na região Sul do país. Em [6] foi referida a possibilidade de, sob temperaturas elevadas, o pavimento poder ter a capacidade de incorporar uma fração dos poluentes particulados acumulados à superfície, agindo assim como um acumulador de poluentes, contribuindo indiretamente para a retenção da poluição e para a proteção do ambiente.

A adaptação das infraestruturas rodoviárias às alterações climáticas é uma excelente oportunidade de inovar e explorar novas estratégias de controlo da poluição, combinando-a com a melhoria do projeto e desempenho dos materiais de pavimentação. Investigação relativa à avaliação dos efeitos da temperatura nas propriedades viscoelásticas das misturas betuminosas e à possibilidade do seu comportamento potenciar a retenção de partículas à superfície dos pavimentos rodoviários pode contribuir para novas metodologias para a adaptação às alterações climáticas.

No âmbito da uma dissertação de mestrado foram realizados trabalhos experimentais utilizando equipamentos disponíveis no Departamento de Transportes do LNEC. O objetivo deste trabalho experimental foi exatamente a busca de resultados que permitam validar a hipótese do pavimento rodoviários poder contribuir para o controlo da poluição particulada das escorrências rodoviárias em cenários de aumento de temperatura. Desde logo, a existência de uma prática, no Departamento de Transportes (DT) do LNEC, de ensaios de resistência à deformação permanente em lajetas de misturas betuminosas, a temperaturas elevadas, foi um aspeto chave para levar a bom porto um trabalho experimental inovador, num curto espaço de tempo. Refira-se que o DT tem um laboratório acreditado, o UPAVMAT (Unidade de Pavimentos e Materiais para Infraestruturas de Transportes) onde foram realizados os ensaios da metodologia desenvolvida.

5 MATERIAL UTILIZADO

5.1 Solo

Com base nos estudos de [15] e [16] conclui-se que, respetivamente, cerca de 80% das partículas depositadas no pavimento têm dimensão inferior a 0,005 mm e que cerca de 55% das partículas transportadas em águas de escorrência têm dimensão inferior a 0,038 mm. Assim, foi escolhido um solo com características físicas semelhantes às partículas que se encontram à superfície dos pavimentos rodoviários por forma a reproduzir as condições reais. A análise granulométrica do solo selecionado para este estudo, indica que a maior parte das partículas (cerca de 89%) deste têm uma dimensão inferior a 0,074 mm de diâmetro.

5.2 Lajetas

De um conjunto de lajetas com dimensões de 305 mm x 305 mm x 50 mm, disponíveis no DT (LNEC), escolheram-se 3 (BBR1, BBR2, FOSSA2)¹. As lajetas, produzidas no próprio laboratório e previamente utilizadas para outros ensaios, são constituídas por misturas betuminosas semelhantes às utilizadas nas infraestruturas rodoviárias de Portugal (pavimentos flexíveis) e noutros países do Sul da Europa. Conforme referido, as lajetas já tinham sido submetidas a ensaios de deformação, no entanto foram reaproveitadas, uma vez que para este estudo, o comportamento à deformação permanente não será avaliado. Os ensaios de deformação foram realizados na face já ensaiada, perpendicularmente à deformação já presente, e na face contrária, nas duas direções, de modo a gerir da melhor forma os recursos disponíveis.

6 DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE METODOLOGIAS DE ENSAIO

6.1 Validação das condições de ensaio

Antes de se dar início aos ensaios testaram-se possíveis abordagens para verificar a metodologia de simulação de acumulação de partículas no pavimento rodoviário e a sua posterior lavagem pela precipitação. Assim, começou por se preparar um suporte com uma inclinação de cerca de 2.5% de forma a simular a inclinação de uma estrada, colocando um pirex sob o extremo mais baixo da lajeta (cf. Fig. 4). Espalhou-se 30 g de solo por toda a superfície da lajeta, de forma homogénea, promovendo-se em seguida uma lavagem com o esguicho contendo 500 ml de água destilada durante aproximadamente 5 minutos, de modo a recriar um evento de precipitação de, sensivelmente, 5 mm



Fig. 3. Lajeta ensaiada: à esquerda antes e à direita após a lavagem

Concluiu-se que este método e material não seriam eficazes pela perda de água e solo que se deu nas laterais da lajeta. Desta forma angariou-se um tabuleiro de Inox, de maiores dimensões e introduziu-se um suporte no seu interior. Seguidamente, além deste método de remoção com água, idealizou-se um procedimento de remoção de solo da superfície da lajeta, usando métodos a seco e com ação direta na superfície desta. Para este fim, usou-se um aspirador e uma escova. Estes dois procedimentos foram adotados nos ensaios, com o objetivo de melhor compreender o grau de adesão das partículas de solo à mistura betuminosa, após o ensaio de compressão a temperatura elevada.

6.2 Preparação do ensaio

Antes dos ensaios, começou por se lavar e escovar todas as lajetas com água de modo a retirar qualquer vestígio de partículas finas, *filler*, que permanecesse dos ensaios anteriores. Posteriormente as lajetas foram identificadas, pesadas e armazenadas numa sala a temperatura constante (30 °C) - câmara seca - até que se encontrassem completamente secas. O solo foi guardado na mesma câmara para evitar variações de densidade devido à adsorção da humidade do ar. Após estarem secas, as lajetas foram preparadas para o ensaio de deformação no

¹ Usou-se a designação anteriormente dada às lajetas

Wheel-Tracking. O condicionamento dos provetes foi feito na câmara de ensaio do próprio equipamento (*Wheel-Tracking*), por um período de aproximadamente 6 horas, até alcançar a temperatura pretendida (4 horas para o equipamento alcançar a temperatura desejada e 2 horas de condicionamento, para que a temperatura da mistura betuminosa estabilizasse). Os ensaios realizaram-se às temperaturas de 40°C e 60°, por se julgar serem as temperaturas representativas das condições de serviço de misturas betuminosas em Portugal, em situações de alterações climáticas [14]. Após o período de condicionamento, dá início o ensaio propriamente dito, a temperatura constante, com a duração de aproximadamente 6 horas (correspondendo a 10 000 ciclos ou até se obter uma deformação de 20 mm).

6.3 Descrição dos métodos utilizados

Método húmido de remoção do solo excedente

Espalharam-se 30 g de solo por toda a superfície da lajeta. Após o ensaio de deformação (duas lajetas de cada vez) e depois das lajetas alcançarem novamente a temperatura ambiente foram expostas à simulação de um evento de precipitação, através do qual se procurou lavar todas as partículas de solo que permanecessem soltas à superfície da lajeta. Para isso, colocaram-se as lajetas (uma de cada vez), com uma inclinação de 2,5% sobre o tabuleiro metálico e procedeu-se à lavagem da superfície com um esguicho contendo 500 ml de água destilada, durante um período de 5 minutos, tentando remover a máxima quantidade de solo possível. Após esta lavagem, as lajetas foram pesadas e armazenadas na câmara seca. O tabuleiro contendo água e partículas de solo foi colocado numa estufa quente, a 100°C, até a água evaporar, pesando-se de seguida. Foram ensaiadas 3 lajetas: BBR1 à temperatura de 40°C e FOSSA2 e BBR2 à temperatura de 60°C.

Método seco e agressivo de remoção do solo excedente

Espalharam-se, de forma homogénea, 5 g de solo unicamente na faixa de 5 cm, onde passa a roda do *Wheel-Tracking*, e submeteram-se as lajetas ao ensaio de deformação (duas de cada vez), às temperaturas de 40°C e 60°C. Quando as lajetas atingiram novamente a temperatura ambiente, procedeu-se à remoção do solo com recurso a um aspirador doméstico; escovou-se e voltou-se a aspirar, tendo-se repetido o processo 2 vezes. Pesou-se o aspirador no início (livre de resíduos) e no fim de modo a avaliar a quantidade de partículas aspiradas. Foram ensaiadas 2 lajetas: FOSSA2 e BBR2 às temperaturas de 40°C e 60°C. Os ensaios realizaram-se com as lajetas em duas posições diferentes no *Wheel-Tracking* possibilitando ter 2 resultados para cada temperatura de ensaio.

6.4 Apresentação de Resultados

Ensaíram-se, pelo método húmido de remoção do solo excedente, 3 lajetas (duas a 60°C e uma a 40°C) e pelo método seco e agressivo, 2 lajetas, perfazendo um total de 4 ensaios (dois à temperatura de 40°C e dois à temperatura de 60°C). De seguida apresentam-se os resultados relativos aos ensaios. O Quadro 3 apresenta as variações de massa que permitem avaliar a retenção do solo das lajetas BBR2 e FOSSA2 testadas a 60°C e da BBR1 testada a 40°C, em conformidade com o método húmido de remoção do solo excedente. O Quadro 4 apresenta as variações de massa que permitem avaliar a quantidade de solo retido nas lajetas, sujeitas ao procedimento de remoção do solo excedente por via seca.

Quadro 3 Avaliação da massa de solo retido nas lajetas pelo método húmido

Identificação da lajeta	Temperatura (°C)	Espalhada na superfície	Massa solo (g)			Solo retido (%)	Partículas retidas (g/cm ²)
			Recolhida	Retida na lajeta	Média do solo retido		
BBR1	40	30	26	4	4	13%	0,0043
BBR2	60	30	18	12	11,5	38%	0,012
FOSSA2	60	30	19	11			

Quadro 4 Avaliação da massa de solo retido nas lajetas pelo método seco

Identificação da lajeta	Temperatura (°C)	Massa solo (g)			Média do solo retido	%solo retido	Partículas retidas (g/cm ²)
		Espalhada na superfície	Aspirado	Retida na lajeta			
BBR2	40	5	3,4	1,6	1,6	32%	0,01
FOSSA2	40	5	3,4	1,6			
BBR2	60	5	3,2	1,8	2	40%	0,013
FOSSA2	60	5	2,8	2,2			

As Figuras 5 e 6 ilustram a presença de solo nas lajetas nas diferentes fases do ensaio do método seco de remoção do solo excedente. Nas Figuras 7, 8 e 9 observam-se as partículas à superfície das lajetas após os ensaios do método húmido de remoção do solo excedente. A Figura 10 compara o nível de aglutinação das partículas de solo retido nas lajetas, em função da temperatura e do método de remoção usado.



Fig. 4 Lajeta BBR2 antes durante e após aspiração (ensaio 40°C)

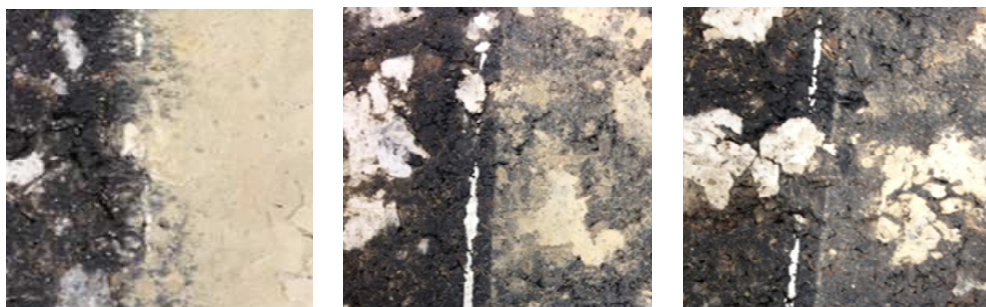


Fig. 5 Lajeta FOSSA2 antes, durante e após aspiração (ensaio a 40°C)



Fig. 7 BBR2 após lavagem (ensaio a 60°C)



Fig. 8 FOSSA2 após lavagem (ensaio a 60°C)



Fig. 6 BBR1 após lavagem (ensaio a 40°C)

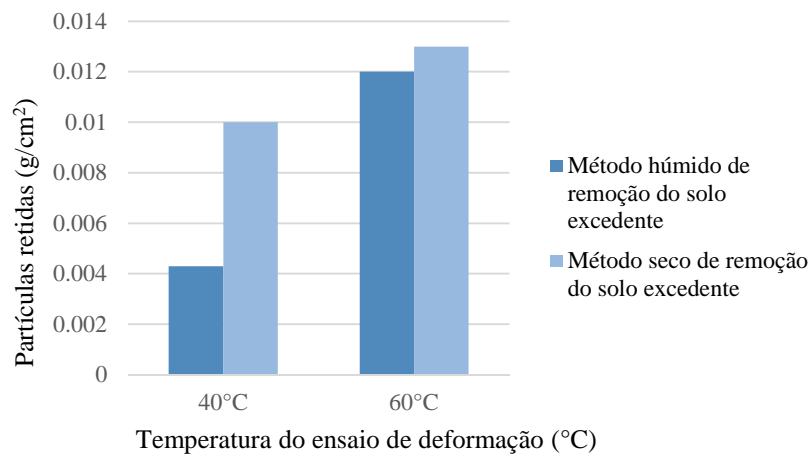


Fig. 9 Gráfico ilustrativo das partículas de solo retido nas lajetas

7 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Começando por analisar o método húmido de remoção do solo excedente, observou-se que os valores do solo retido para a temperatura de 60°C são cerca de 38% do solo total. Para a lajeta submetida ao ensaio *Wheel-Tracking* a 40°C apenas 4g de solo ficaram retidos na superfície da lajeta (aproximadamente 13% - cf. Quadro 3). Relativamente ao ensaio a 40°C visto só se ter resultados apenas para 1 lajeta, será um dado indicativo. A razão deste último valor ser inferior aos dois primeiros, é justificável com o facto do valor da temperatura a que a lajeta foi sujeita durante o ensaio de deformação (40°C) ser inferior aos 60°C a que as outras duas lajetas foram submetidas, logo, há uma menor liquefação do ligante, possibilitando a retenção de uma menor fração das partículas de solo. A segunda metodologia - método seco de remoção do solo excedente – permitiu obter resultados idênticos aos do procedimento anterior, isto é, uma maior quantidade de solo permaneceu agregada às lajetas sujeitas a ensaios de deformação permanente a 60°C. Observou-se que 1,6g de solo permaneceram aglutinados à mistura betuminosa, em comparação com os 2g de solo que ficaram retidos nas lajetas ensaiadas a 60°C, correspondendo a 0,013g/cm² conforme se pode notar no Quadro 4. Como se pode observar nas Figuras 5 e 6, há uma porção de partículas de solo incrustadas na mistura betuminosa, mesmo após aspiração. Este método apenas quantifica os resultados da primeira aspiração dado que durante as escovagens (antes da segunda aspiração) se terá perdido algum solo.

Os resultados dos ensaios laboratoriais apoiam a hipótese de que a liquefacção de misturas betuminosas sujeitas a aumentos de temperatura potencia a retenção de partículas na superfície do pavimento rodoviário. O número limitado de lajetas disponibilizadas para a realização de ensaios condicionou os resultados obtidos, porém não se prevê que dados de mais ensaios conduzissem a uma conclusão diferente. De que forma ocorre o fenómeno de retenção e qual é a força da ligação entre as partículas de solo e as da mistura betuminosa, são questões que podem ser respondidas em estudos futuros que poderão fundamentar a criação de misturas betuminosas resilientes a temperaturas elevadas e com capacidade de reter poluentes, contribuindo para reduzir custos de manutenção e impactes ambientais, em cenários de alterações climáticas.

8 REFERÊNCIAS

1. A. C. Freire, “Agregados para misturas betuminosas” Palestra na Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Almada, 2004.
2. A. Carrera, A. Dawson, and J. Stegar, “P2R2C2- Effects of Climate on Current Roads,” 2010, Available at: <http://www.nottingham.ac.uk>.

3. K. Guan, “*Surface and ambient air temperatures associated with different ground material: a case study at the University of California, Berkeley*,” University of California, 2011.
4. A. C. Freire, “*Deformações permanentes de misturas betuminosas em pavimentos rodoviários*” Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2002.
5. L. Picado-Santos, “*Consideração da Temperatura no Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis*” Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Novembro, 2 volumes, 1994.
6. A. E. Barbosa, S. Fontul, A. Freire, and J. Fernandes, “*Os pavimentos rodoviários e a qualidade das escorrências de estradas num cenário de alterações climáticas*” 12º Congresso da água, 16º ENASB; XVI SILUBESA; 5 a 8 Março 2014; APRH; APESB e ABES; Lisboa, 13 pp, 2014.
7. A. E. Barbosa, A. Telhado, J. Calição, J. Fernandes, J. Vieira, L. V. Almeida, M. Whitehead, P. J. Ramísio, P. B. Antunes, and R. Baguinho, *Directrizes para a gestão integrada das escorrências de estradas em Portugal*. Barbosa, A.E. (ed), Europress, 84 pp, 2011.
8. S. Dunn, I. Brown, and H. J and Post, “Relationships between climate, water resources, land use and diffuse pollution and the significance of uncertainty in climate change,” *J. Hydrol.*, vol. 434–435, pp. 19–35, 2012.
9. Q. Li, L. Mills, and S. McNeil, “*The Implications of Climate Change on Pavement Performance and Design*” University of Delaware, 2010.
10. G. Chai, R. Stadenb, A. Guana, G. Kellya, and S. Chowdhury, “*The impacts of climate change on pavement maintenance in Queensland, Australia*” Transport Research Arena 2014, Paris, 10 pp, 2014.
11. T. Hvitved-Jacobsen, J. Vollertsen, and A. H. Nielsen, “*Urban and Highway Stormwater Pollution*” Taylor and Francis Inc, 347 pp, 2010.
12. Z. Kalantari, A. Briel, S. Lyonb, B. Olofssona, and L. Folkesson, “On the utilization of hydrological modelling for road drainage design under climate and land use change” *Sc Tot Env.*, vol. 475, pp. 97–103, 2014.
13. B. Crabtree, P. Dempsey, F. Moy, C. Brown, and M. Song, “*Improved determination of pollutants im highway runoff*” Phase 2. Final Report. Highways Agency Contract Reference 3/376. Report No. UC7697. August 2008, 74 pp, 2008.
14. A. C. Freire, M. L. Antunes, and L. Picado-Santos, “Characterization of Bituminous Mixtures for Numerical Modeling of Permanent Deformations,” *Road Materials and Pavement Design Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 87–102. ISSN 1468–0629, 2006.
15. Y. Yun, H. Park, L. Kim, and S. Ko, “Size Distributions and Settling Velocities of Suspended Particles from Road and Highway” *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 481–488, 2010
16. M. Kayhanian, E. R. McKenzie, J. E. Leatherbarrow, and T. M. Young, “Characteristics of road sediment fractionated particles captured from paved surfaces, surface run-off and detention basins,” *Sci. Total Environ.*, vol. 439, pp. 172–186, 2012.