

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MISTURAS STONE MASTIC ASPHALT

Henrique M. Borges Miranda^{1,2}, Fátima Alexandra Batista³, Maria de Lurdes Antunes⁴ e José Neves⁵

¹ ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro, n.º 1, 1959-007 Lisboa, Portugal

² CITTA – Centro de Investigação do Território, Transportes e Ambiente, Coimbra, Portugal

email: hmiranda@dec.isel.pt orcid.org/0000-0003-4062-1402 <http://www.isel.pt>

³ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Núcleo de Infraestruturas de Transportes, Av. do Brasil, n.º 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

⁴ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Conselho Diretivo, Av. do Brasil, n.º 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

⁵ CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa

Sumário

Desde 2010 foram aplicadas em Portugal mais de 350 mil toneladas de misturas Stone Mastic Asphalt (SMA), tendo os resultados obtidos demonstrado, de uma forma geral, ser possível a aplicação deste tipo de misturas com sucesso. Todavia, existem ainda algumas aplicações em que se verifica um desempenho inferior ao espetável. Este artigo apresenta uma análise comparativa de duas misturas SMA, com composições ponderais distintas, em termos do seu desempenho à deformação permanente, fadiga, sensibilidade à água e textura superficial. Os resultados obtidos permitiram constatar a importância da composição ponderal dos materiais constituintes das SMA no seu desempenho quer mecânico quer funcional.

Palavras-chave: Pavimento; Stone Mastic Asphalt; SMA; Desempenho mecânico; Desempenho funcional

1 INTRODUÇÃO

Desde 2010, foram aplicadas em Portugal mais de 350 mil toneladas de misturas Stone Mastic Asphalt (SMA), a que corresponde um número de aplicações atualmente superior a 40, quer em obra nova, quer em contexto de reabilitação de pavimentos flexíveis. Os resultados obtidos a nível nacional, à semelhança do que sucede internacionalmente, têm demonstrado, de uma forma geral, ser possível a aplicação de misturas SMA com sucesso, sendo os resultados obtidos nos últimos oito anos promissores.

Todavia, existem aplicações em que se constatou por vezes um desempenho inferior ao espetável, nomeadamente funcional. Tal facto resultou da maior sensibilidade das misturas SMA relativamente a ligeiras alterações na sua composição, a qual requer um especial cuidado em cada etapa do seu desenvolvimento (formulação, fabrico, transporte e aplicação). A menor atenção em qualquer uma destas etapas potenciará a obtenção de uma mistura betuminosa com um comportamento desadequado [1]. Assim, considera-se particularmente relevante a necessidade de uma crescente preocupação do meio técnico-científico (donos de obra, projetistas, empresas construtoras e investigadores) relativamente à avaliação de forma global do desempenho das misturas SMA, e de outras, ao invés do foco incidir isoladamente no desempenho mecânico ou funcional. Ter, para uma mistura SMA, elevado desempenho mecânico, não é sinónimo de equivalente desempenho funcional e vice-versa, tal como constatado por Miranda [2]. Atualmente, as exigências das condições de circulação do tráfego rodoviário e, conseqüentemente, das características dos pavimentos, vão muito para além do elevado desempenho mecânico requerido, nomeadamente, quanto à resistência à deformação permanente. Nesse sentido, importa a adoção na prática de novos métodos de formulação das misturas SMA, como seja, o desenvolvido por Miranda [2] [3].

Neste âmbito, o estudo apresentado neste artigo tem como principal objetivo contribuir para um maior conhecimento das misturas SMA, nomeadamente, no que respeita à influência da sua composição ponderal no desempenho mecânico e funcional das camadas em SMA.

São igualmente apresentadas algumas recomendações práticas no que concerne à formulação, fabrico e aplicação deste tipo de misturas betuminosas, com o intuito de contribuir para um aumento do desempenho e durabilidade das SMA em Portugal.

2 MATERIAIS E METODOLOGIA

No estudo que se apresenta, a mistura de agregados utilizada no fabrico das misturas SMA foi obtida a partir de duas frações granulométricas distintas (0/4 mm e 6/10 mm) e de fíler comercial. Relativamente ao betume e aditivo estabilizante, foram utilizados, respetivamente, um betume modificado (PmB 45/80-55) e granulado de fibras celulósicas aglomeradas com betume. Assim, os materiais utilizados no fabrico das duas misturas SMA foram os mesmos, tendo, no entanto, sido adotadas composições diferentes para cada uma delas, conforme a seguir se descreve.

A definição da composição ponderal dos materiais granulares (fíler, 0/4 mm e 6/10 mm) utilizados na mistura de agregados foi realizada com o intuito de se obter: uma mistura SMA12 com composição granulométrica mais “densa” (SMA-A); e uma mistura SMA12 com composição granulométrica mais “drenante” (SMA-B). Na Figura 1 são apresentadas as curvas granulométricas da mistura de agregados de cada uma destas misturas betuminosas (SMA-A e SMA-B), para além do fuso F10 correspondente a uma mistura do tipo SMA10 utilizado em Espanha e dos limites gerais do fuso granulométrico para uma SMA12 segundo a norma de produto EN 13108-5, relativa às misturas do tipo SMA.

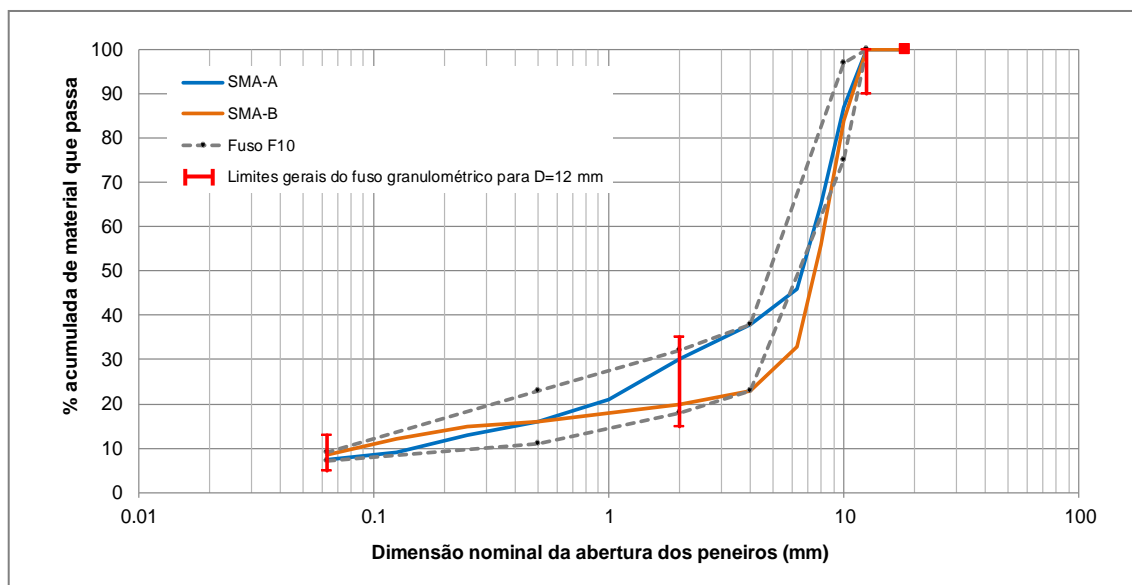


Fig. 1. Curvas granulométricas dos agregados de cada mistura SMA 12

Uma vez estabelecida a composição granulométrica de cada uma das SMA12 em estudo, procedeu-se à determinação do teor ótimo em betume de acordo com o método de formulação Marshall (adotando, na compactação de impacto, 50 pancadas aplicadas nos topos de cada provete) [4], complementado, no caso da mistura SMA-B, com critérios de formulação desenvolvidos por Miranda [2]. Após análise dos resultados obtidos nos estudos de formulação realizados, foram adotadas as seguintes composições para as misturas SMA12:

SMA-A

- Fração 6/10: 60.7 %
- Fração 0/4: 28.7 %
- Fíler comercial: 4.7 %
- Fibras celulósicas revestidas com betume (em granulado) 0.4 %
- Betume modificado: 5.5 %

SMA-B

- Fração 6/10: 74.4 %
- Fração 0/4: 8.4 %
- Fíler comercial: 10.2 %
- Fibras celulósicas revestidas com betume (em granulado) 0.5 %
- Betume modificado: 6.5 %

Ambas as misturas SMA12 foram fabricadas em laboratório e submetidas a ensaio na unidade laboratorial UPAVMAT/LNEC-EM, do Núcleo de Infraestruturas de Transportes (NIT) do Departamento de Transportes do LNEC, tendo os materiais sido fornecidos pela empresa *Rettenmaier Ibérica S.L Y CIA S. COM (JRS)*.

Conforme referido, as misturas SMA12 fabricadas foram avaliadas no que concerne ao seu desempenho mecânico e funcional, tendo-se para tal utilizado os ensaios e respetivas condições que se apresentam no Quadro 1.

Quadro 1 – Ensaio para avaliação do desempenho e respetivas condições

Propriedades	Desempenho mecânico			Desempenho funcional	
	Comportamento à deformação permanente	Comportamento à fadiga	Sensibilidade à água	Microtextura	Macrotextura
Ensaio	Ensaio de simulação em pista de laboratório (WT), @ 60°C, 10 000 ciclos (EN 12697-22, SSD, método B, ao ar)	Ensaio de flexão em 4 pontos (4PB), @ 20°C & 10Hz, 50% módulo inicial (EN 12697-24, Anexo D)	Determinação da resistência conservada em ensaios de tração indireta, @ 15°C (EN 12697-12, método A)	Ensaio de medição do atrito com o pêndulo britânico (EN 13036-4)	Ensaio de medição da profundidade de textura pela técnica volumétrica da mancha (EN 13036-1)

No Quadro 1 é possível observar, nomeadamente, que o desempenho mecânico das misturas SMA em apreço foi avaliado quanto às seguintes características:

- avaliação do comportamento à deformação permanente, que foi efetuada de acordo com o procedimento indicado na norma EN 12697-22 (método B, ao ar), utilizando o equipamento de pequenas dimensões (*SSD – Small Size device*), para 10 000 ciclos e uma temperatura de ensaio de 60 °C;
- avaliação do comportamento ao fendilhamento por fadiga, que foi efetuada através do ensaio de flexão em quatro pontos, a extensão controlada, de acordo com a EN 12697-24. Os ensaios foram realizados a uma temperatura constante de 20 °C e frequência de aplicação da carga de 10 Hz. Os valores de extensão imposta situaram-se entre 300×10^{-6} e 700×10^{-6} ;
- avaliação da sensibilidade à água, que foi efetuada através de ensaios de tração indireta a uma temperatura de 15 °C, de acordo com o procedimento indicado na norma EN 12697-12.

Ainda no que concerne à caracterização mecânica das misturas SMA12, procedeu-se também à avaliação da influência do envelhecimento das misturas betuminosas na sua resistência ao fendilhamento por fadiga. O envelhecimento acelerado em laboratório das misturas SMA12 foi efetuado segundo o método LTOA (“Long-Term Oven Aging”) estabelecido na norma AASTHO R30-02. Este método pretende simular o envelhecimento dos materiais betuminosos a longo prazo, através do aquecimento em estufa dos provetes das misturas betuminosas compactadas, durante um período de 5 dias, a uma temperatura de 85 °C.

Por similaridade dos materiais pétreos utilizados (proveniência e natureza), a avaliação do desempenho mecânico foi ainda complementada com uma mistura AC14 surf 35/50-55 escolhida como mistura de controlo, a qual foi obtida do estudo realizado por Pimentel (2013) [5].

No que concerne ao desempenho funcional, o mesmo foi avaliado através do ensaio com o pêndulo britânico (EN 13036-4) e do ensaio pela técnica volumétrica da mancha (EN 13036-1), para avaliação da microtextura e macrotextura, respetivamente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Desempenho mecânico

Para a avaliação do comportamento mecânico das misturas SMA12 em estudo, foram moldados provetes com as misturas fabricadas.

Para a realização dos ensaios de avaliação quer do comportamento à deformação permanente, quer do comportamento à fadiga, foram moldados provetes prismáticos utilizando o compactador de rolo (“roller compacter”), com diferentes dimensões, em função do ensaio a que se destinavam.

Assim, para a realização do ensaio de simulação em pista de laboratório (WT – “wheel tracking”) com o equipamento de pequenas dimensões (SSD) e de acordo com as condições apresentadas no Quadro I, foram preparadas lajetas com cerca de 30 cm de comprimento de cada um dos lados e 5 cm de espessura (Figura 2.a). Os parâmetros obtidos neste tipo de ensaio são os seguintes: cavado de rodeira, RD_{AIR} (“maximum rut depth, in air”); percentagem de profundidade de rodeira, PRD_{AIR} (“maximum proportional rut depth”, in air); e, taxa de deformação, WTS_{AIR} (“wheel tracking slope, in air”).

Já para o caso dos ensaios de flexão em quatro pontos, após moldagem de provetes prismáticos, estes foram cortados por forma a se obterem vigas com cerca de 5 cm de largura e altura e 40 cm de comprimento (Figura 2.b). O resultado deste tipo de ensaio é uma lei de fadiga, representada por uma reta quando em escala logarítmica, de onde podem ser extraídos os seguintes parâmetros: valor da extensão para um milhão de aplicações de carga (ϵ_6) e inclinação da reta (p).

Para a avaliação da sensibilidade à água em ensaios de compressão diametral (Figura 2.c-esq.), foram moldados provetes cilíndricos, com o compactador de impacto e aplicando 50 pancadas em cada extremo do provete. Neste tipo de ensaio, para além de se analisar a superfície de rotura dos provetes ensaiados (Figura 2.c-dir.), é habitual

determinar-se a resistência conservada (ITS_R), ou seja, a relação percentual entre a resistência à tração indireta dos provetes imersos (ITS_w) e a dos provetes “a seco” (ITS_d).

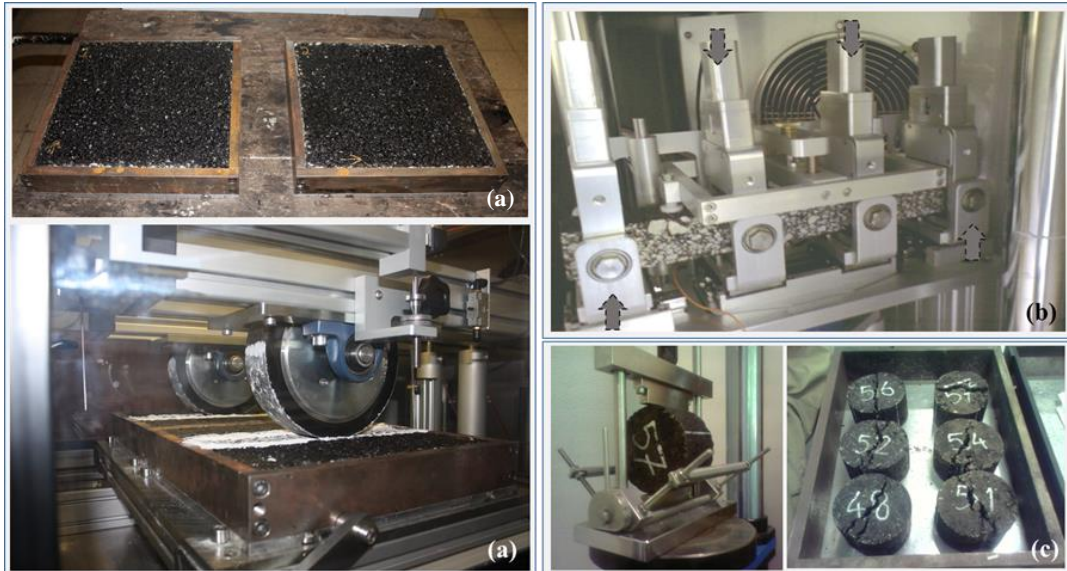


Fig. 2. *a)* Ensaio de simulação sobre lajetas; *b)* Ensaio de flexão em quatro pontos com viga; *c)* Ensaio de compressão diametral sobre provetes cilíndricos (à esquerda) e provetes já ensaiados (à direita)

Nas Figuras 3 a 5 é efetuada a apresentação gráfica dos resultados obtidos nos ensaios para avaliação do desempenho mecânico (comportamento à deformação permanente, comportamento à fadiga e sensibilidade à água) das misturas SMA12 avaliadas no presente estudo, sendo apresentada no Quadro 2 uma sùmula desses resultados.

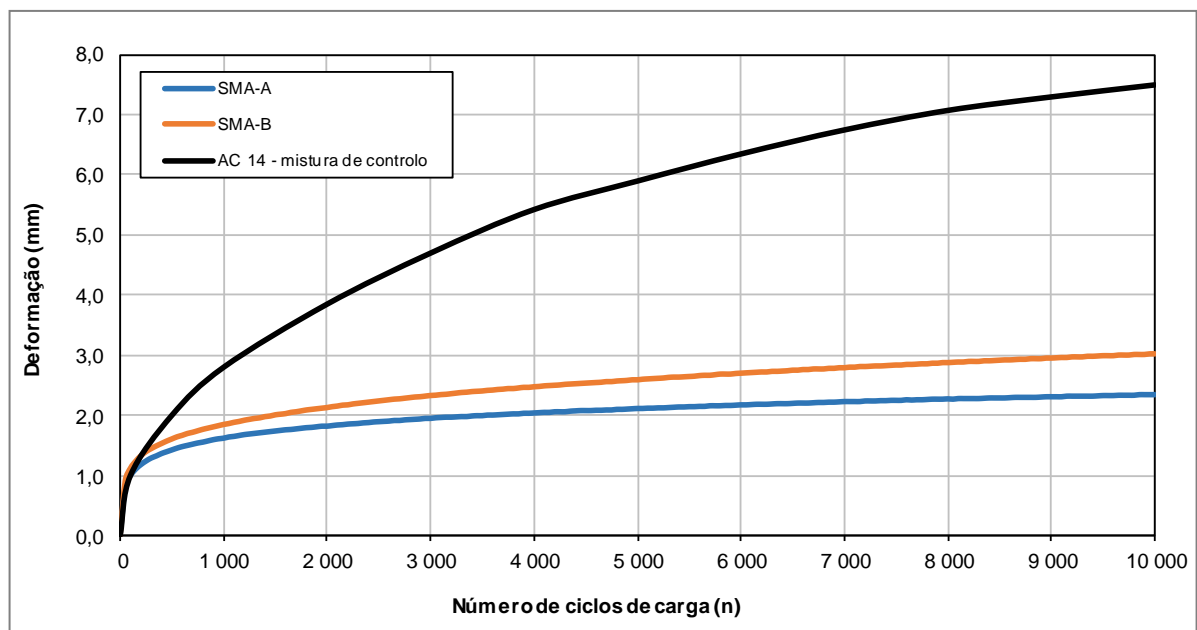


Fig. 3. Evolução da deformação permanente das misturas betuminosas em ensaios WT

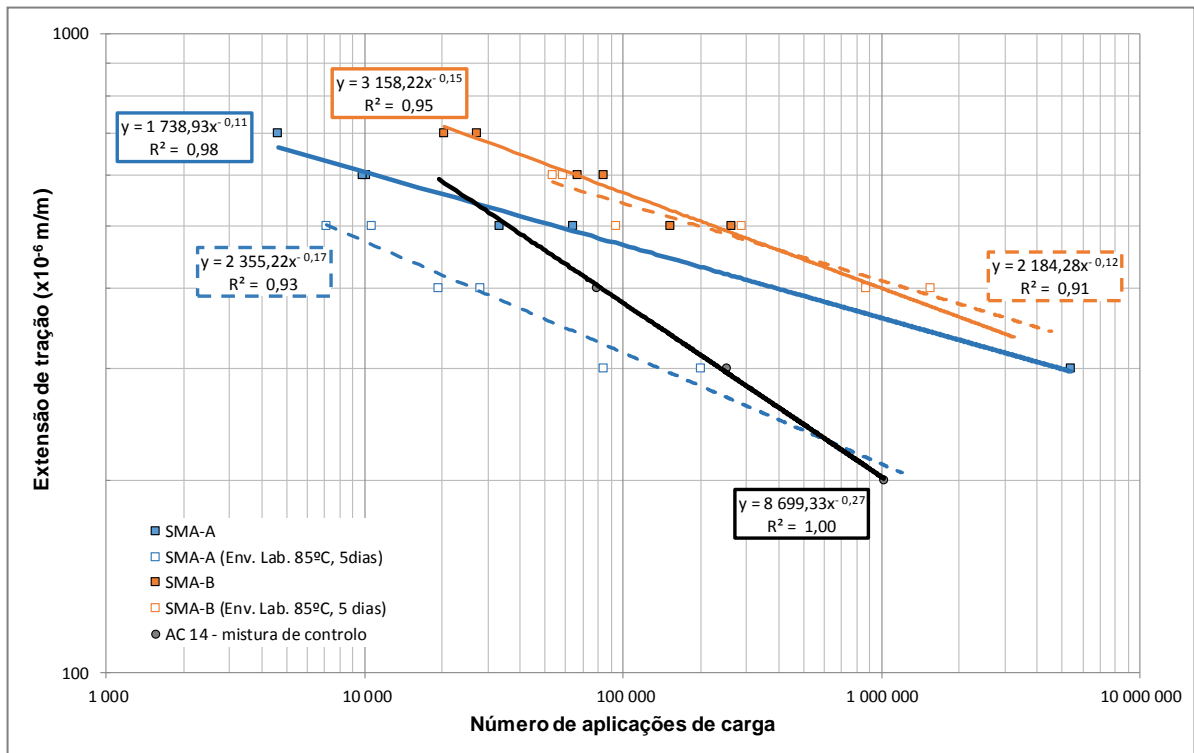


Fig. 4. Leis de fadiga das misturas SMA (com e sem envelhecimento) em ensaios 4PB

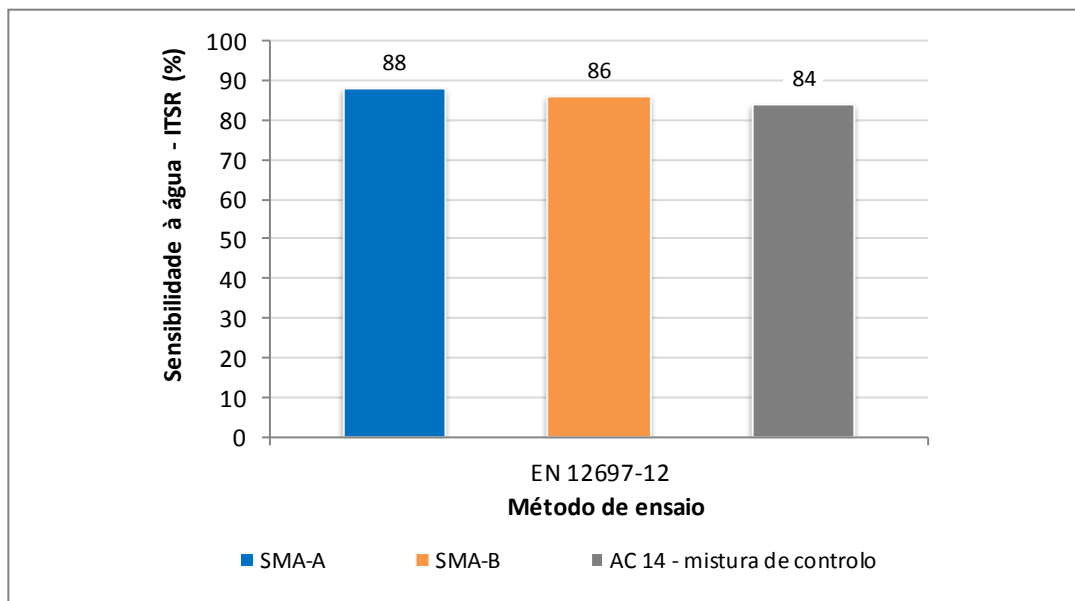


Fig. 5. Resultados da sensibilidade à água das misturas betuminosas (em ensaios de tração indireta)

Quadro 2 – Desempenho mecânico das misturas

Identificação das misturas betuminosas	Comportamento à deformação permanente (WT)			Comportamento à fadiga (4PB)		Comportamento à fadiga (4PB) de provetes envelhecidos (LTOA)		Sensibilidade à água
	RD_{AIR} (mm)	WTS_{AIR} (µm/ciclos)	PRD_{AIR} (%)	ϵ_6 (10^{-6} m/m)	P	ϵ_6 (10^{-6} m/m)	P	ITSR (%)
AC14 ⁽¹⁾ (Pb=5.0%)	7.5	0.35	15.0	203	-3.7	-	-	84
SMA-A (Pb=5.5%)	2.3	0.05	4.7	337	-10.8	212	-5.7	88
SMA-B (Pb=6.5%)	3.0	0.09	6.0	400	-6.7	410	-8.3	86

1) Mistura betuminosa de controlo (Pimentel, 2013 [5])

Na Figura 3 e no Quadro 2 é possível observar que as misturas SMA apresentaram elevada resistência à deformação permanente comparativamente à mistura betuminosa de controlo (AC14 surf 35/50-55). Ambas as misturas SMA tenderam a apresentar comportamento similar à deformação permanente. Contudo, a mistura SMA-A (com 5.5% de betume), apesar de apresentar menor percentagem de agregados grossos, fundamentais à adequada obtenção do efeito de “stone-on-stone”, tendeu ainda assim a apresentar ligeiramente uma maior resistência à deformação permanente entre ambas as misturas SMA. Tal resultado poderá estar ainda relacionado com o facto da SMA-B apresentar maior percentagem de betume (6.5 %), a qual não condicionou significativamente o seu comportamento à deformação permanente.

Relativamente ao comportamento à fadiga (Figura 4 e Quadro 2), observou-se, à semelhança da deformação permanente, que ambas as misturas SMA apresentaram elevada resistência comparativamente à mistura betuminosa de controlo, se considerada a extensão de tração para um milhão de aplicações de carga (ϵ_6). De ambas as misturas, a SMA-B tendeu a apresentar o melhor comportamento à fadiga, resultado da maior percentagem de betume utilizada, decorrente da utilização de uma curva granulométrica mais “drenante” (maior percentagem de agregados grossos) comparativamente à SMA-A.

Os resultados obtidos relativamente à resistência ao fendilhamento por fadiga, permitem verificar que o envelhecimento das duas misturas SMA em estudo, torna mais evidente o seu diferente desempenho, observando-se uma reduzida sensibilidade ao envelhecimento da mistura SMA-B, nomeadamente no que concerne à redução do ϵ_6 , ao contrário do que sucedeu com a SMA-A. Ainda assim, ambas as misturas SMA tenderam a apresentar maior resistência ao fendilhamento por fadiga após envelhecimento, comparativamente à mistura betuminosa de controlo sem envelhecimento.

No que concerne à resistência à ação da água e dada a maior descontinuidade da sua curva granulométrica, seria expectável que a mistura SMA-B apresentasse maior sensibilidade à água. Contudo, de acordo com a Figura 5 e o Quadro 2, é possível observar que ambas as misturas SMA apresentaram um comportamento similar e relativamente melhor ao obtido para a mistura betuminosa de controlo.

A utilização de elevada percentagem de agregados grossos para obtenção de um efeito de “stone-on-stone” nas misturas SMA, não corresponde necessariamente a misturas betuminosas com um melhor comportamento à deformação permanente. Contudo, quando complementarmente observado o comportamento à fadiga e em especial a sensibilidade ao envelhecimento, constata-se uma melhoria significativa do seu comportamento, resultante da utilização de uma elevada percentagem de agregados grossos que permite a obtenção de uma estrutura pétreia com adequado volume de vazios para acomodar um mástique com elevada percentagem de betume, sem com isso condicionar a sensibilidade à água da mistura betuminosa.

3.2 Desempenho funcional

Para avaliação do desempenho funcional da superfície das misturas compactadas, foram realizados ensaios com o Pêndulo Britânico para medição do coeficiente de atrito pontual, bem como ensaios segundo a técnica volumétrica da mancha para medição da profundidade de textura (Figura 6).

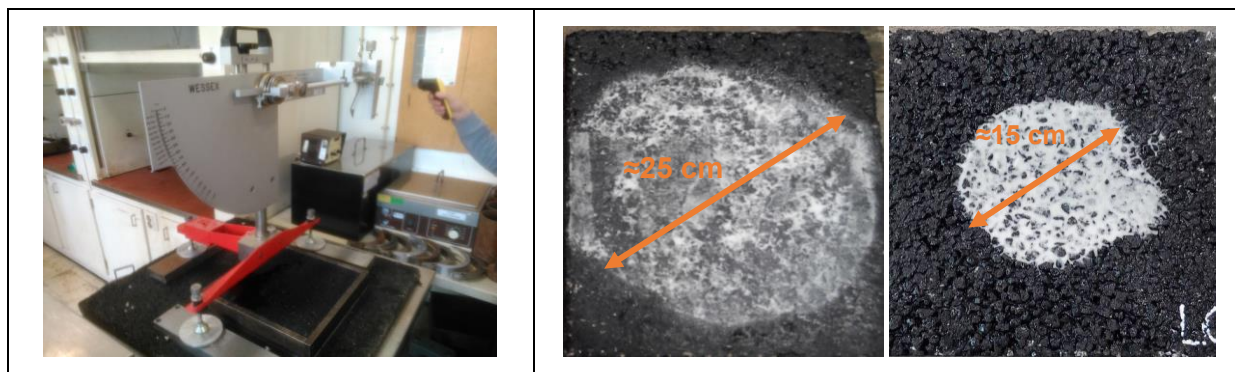


Fig. 6. Ensaio com o Pêndulo Britânico (à esquerda), ensaio segundo a técnica volumétrica da mancha (à direita)

No Quadro 3 é apresentada uma súmula do desempenho funcional obtido para as misturas SMA avaliadas no presente estudo.

Quadro 3 – Desempenho funcional das misturas SMA

Identificação das misturas betuminosas	Microtextura	Macrotextura
	Coefficiente de atrito (pontual) PTV (“Pendulum Test Value”)	Profundidade de textura MPD (“Mean Profile Depth”), mm
SMA-A (P _b =5.5%)	61	0.34
SMA-B (P _b =6.5%)	63	1.57

De acordo com o Quadro 3, a mistura SMA-B apresentou elevado desempenho funcional comparativamente à mistura SMA-A. Estes resultados foram mais evidentes quando considerada a avaliação da macrotextura. Apesar da menor percentagem de betume utilizada na mistura SMA-A, e ao contrário do que poderia ser espectável, a sua macrotextura foi muito reduzida, mesmo inferior à habitualmente estipulada para o betão betuminoso contemplado no CETO-EP [6], no valor igual ou superior a 0.7 mm.

À semelhança do que foi constatado para o desempenho mecânico, a utilização de elevada percentagem de agregados grossos, contribuiu também no desempenho funcional para a melhoria da macrotextura das misturas betuminosas.

Apesar dos resultados obtidos poderem, eventualmente, induzir os utilizadores a formular misturas SMA com o propósito único de maximizar a percentagem de agregados grossos para melhorar o seu desempenho e durabilidade, importa compreender que a percentagem de agregados grossos deve ser adequadamente quantificada, assim como a quantidade de mástique betuminoso e respetiva composição passível de preencher o volume de vazios dos agregados grossos. Uma menor atenção à primeira premissa, poderá resultar na formulação e aplicação de misturas SMA com uma elevada permeabilidade. Nesse sentido, importa a adoção na prática de novos métodos de formulação das misturas SMA, como seja, o desenvolvido por Miranda [2] [7].

4 CONCLUSÕES

No presente estudo é efetuada a análise comparativa de duas misturas SMA, com composições ponderais distintas, em termos do seu desempenho à deformação permanente, fadiga, sensibilidade à água e textura superficial.

Em suma, os resultados obtidos neste estudo, como contributo para um maior conhecimento das misturas SMA, no que respeita, nomeadamente, a influência da composição no desempenho e durabilidade das SMA aplicadas em Portugal, permitiu obter as seguintes conclusões principais:

- (i) A utilização de fusos granulométricos para definição da composição granulométrica das misturas SMA é limitativa e promotora de induzir nos utilizadores uma pretensa garantia de obtenção de um efeito de “stone-on-stone” na mistura SMA formulada e conseqüentemente um adequado desempenho e durabilidade.
- (ii) A utilização de uma elevada percentagem de agregados grossos contribui para uma estrutura pétreia com maior volume de vazios para preenchimento com mástique betuminoso. Tal estrutura não contribui necessariamente para a melhoria do comportamento à deformação permanente e sensibilidade à água, podendo neste último caso ser inclusivamente condicionante. Porém, contribui de forma direta para melhorar a macrotextura e de forma indireta para melhorar o comportamento à fadiga e sensibilidade ao envelhecimento, como resultado da utilização de maior percentagem de betume.
- (iii) A formulação de misturas SMA, tendo como principais métodos de avaliação do desempenho, a resistência à deformação permanente e a sensibilidade à água, poderá condicionar o potencial desempenho e durabilidade das misturas SMA, nomeadamente, no que concerne à resistência ao fendilhamento por fadiga, sensibilidade ao envelhecimento e macrotextura.
- (iv) Com o intuito de mitigar a redução do desempenho funcional em obra, recomenda-se que, no mínimo, a avaliação do desempenho funcional (microtextura e macrotextura) possa ser realizada previamente nos provetes prismáticos destinados à posterior avaliação da resistência à deformação permanente, de acordo com a metodologia desenvolvida em Miranda [2].
- (v) É fundamental a utilização de novos métodos de formulação volumétricos que permitam uma adequada quantificação do efeito de “stone-on-stone” como os indicados no presente estudo.

5 REFERÊNCIAS

1. T.M. Clark, K.K. McGhee, *Commonwealth of Virginia's (USA) implementation of Stone Matrix Asphalt, Proc. 25th Southern African Transport Conference (SATC 2006)*, Vol.1, pp. 325-334, Pretoria, 10-13 Julho 2006.
2. H.M.B. Miranda, “*Stone Mastic Asphalt – mix design, production, application and performance*”, Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2016.
3. H.M.B. Miranda, F.A. Batista, M.L. Antunes, J. Neves. “*Stone Mastic Asphalt: Development of a new laboratory compaction method for optimization of stone-on-stone effect in coarse aggregate mixture*” (*artigo submetido em fev./2019 à revista Road Materials and Pavement Design*).
4. Asphalt Institute, “*Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types*”. The Asphalt Institute, Maryland, 1984.
5. C. Pimental, “*Formulação de misturas betuminosas a quente - Contribuição para um novo método de formulação*”, Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa, 2013.
6. EP S.A. (atual IP – Infraestruturas de Portugal), *Caderno de Encargos Tipo Obra, 14.03 – Pavimentação, características dos materiais*, Almada, 2014.
7. H.M.B. Miranda, F.A. Batista, M.L. Antunes, J. Neves, “*A new SMA mix design approach for optimization of stone-on-stone effect*”, *Road Materials and Pavement Design*, 2019 (DOI: 10.1080/14680629.2019.1588779).