

RECOMENDAÇÕES PARA A APLICAÇÃO DE MISTURAS STONE MASTIC ASPHALT EM PORTUGAL

Henrique M. Borges Miranda^{1,2}, Maria de Lurdes Antunes³, Fátima Alexandra Batista⁴ 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, Conselho Diretivo, Av. do Brasil, n.º 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

⁴ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Núcleo de Infraestruturas de Transportes, 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, Portugal

Sumário

As misturas Stone Mastic Asphalt (SMA) têm adquirido nos últimos anos uma particular aceitação de destaque em Portugal, pelo bom desempenho que apresentam. Contudo, a sua utilização na rede rodoviária nacional nem sempre tem sido acompanhada de um adequado enquadramento regulatório, nomeadamente, no que concerne não só à sua caracterização final, mas também aos materiais utilizados no seu fabrico. Neste estudo apresenta-se uma sumula do âmbito de aplicação das misturas SMA, das propriedades e respetivos limites habitualmente definidos internacionalmente, para os materiais constituintes e respetivas misturas SMA, bem como recomendações relativamente à respetiva escolha para utilização em Portugal.

Palavras-chave: Pavimento; Stone Mastic Asphalt; SMA; Caderno de encargos; Especificação técnica

1 INTRODUÇÃO

Entre os diversos tipos de misturas betuminosas de alto desempenho para camadas de desgaste habitualmente utilizadas a nível mundial, tem em Portugal merecido na última década, um particular interesse a utilização de misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA). Tal deve-se essencialmente ao facto deste tipo de mistura betuminosa, pela sua granulometria descontínua, com elevada percentagem de agregados grossos, associada a uma maior percentagem de betume, garantir uma elevada resistência às solicitações do tráfego, em particular, à deformação permanente com origem nas camadas betuminosas [1], tornando-se numa alternativa economicamente interessante.

Apesar do interesse evidenciado em Portugal pela utilização de misturas SMA, verifica-se que o mesmo nem sempre tem sido acompanhado de uma adequada regulamentação da sua utilização, nomeadamente através de especificações técnicas, ou da sua incorporação nos cadernos de encargos rodoviários nacionais. Tal situação, limita uma uniforme e padronizada conduta dos diversos intervenientes, como sejam, projetistas, empresas construtoras e fiscalização, na aplicação das misturas SMA em camadas de desgaste, o que poderá conduzir a soluções diferentes quanto à durabilidade e desempenho estrutural e/ou funcional dos pavimentos.

Nesse âmbito, o presente estudo tem como objetivo contribuir para um maior conhecimento das misturas SMA, no que diz respeito, nomeadamente, à melhor resposta a dar às seguintes questões:

- Qual o âmbito da sua aplicação?
- Quais as propriedades a exigir aos materiais utilizados no seu fabrico?
- Quais as propriedades a definir na sua caracterização?

2 METODOLOGIA

No estudo que se apresenta é efetuada uma sumula das propriedades habitualmente utilizadas internacionalmente para os diferentes materiais constituintes das misturas SMA, assim como das propriedades a requerer para as mesmas após o fabrico e compactação.

O estudo realizado, que se inseriu no âmbito do doutoramento sobre misturas betuminosas do tipo SMA desenvolvido por Miranda [2], teve como base especificações técnicas e cadernos de encargos utilizados em 25 países (Quadro 1), entre eles, os maiores utilizadores de misturas SMA (EUA, Alemanha e Suécia), que totalizam mais de 80 % da aplicação mundial de misturas SMA ([3], [4] e [5], respetivamente).

Quadro 1 – Países considerados no estudo

Continentes	Países
Europeu	Alemanha; Áustria; Bulgária; Dinamarca; Escócia; Eslovénia; Finlândia; Grécia; Holanda; Noruega; Polónia; Reino Unido; República Checa; Roménia; Suécia; Suíça
Americano	Argentina; Brasil; EUA
Asiático	China; Hong-Kong; Índia; Singapura; Rússia
Oceânia	Nova Zelândia

Com o intuito de aferir o adequado enquadramento a nível nacional das especificações técnicas utilizadas noutros países, tendo em atenção, nomeadamente, os materiais disponíveis em Portugal, no presente estudo são também considerados os seguintes documentos:

- O Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO) da ex-EP (atual Infraestruturas de Portugal) [6], tendo-se para o efeito utilizado como comparativo as especificações para o microbetão betuminoso rugoso (AC10 surf – mBBr) e para a mistura betuminosa rugosa com betume modificado com média percentagem de borracha (MBR-BBM). Tal opção resulta de entre as misturas betuminosas com características de desgaste contempladas no CETO [6], o AC10 surf (mBBr) e a MBR-BBM serem as misturas betuminosas que apresentam uma curva granulométrica genérica mais próxima de uma mistura SMA.
- O estudo realizado por Castelo-Branco & Ferreira [7], que se reveste da máxima importância no panorama nacional pela dimensão da amostra utilizada para o levantamento das características dos agregados produzidos em Portugal.

3 ÂMBITO DE APLICAÇÃO DAS MISTURAS SMA

3.1 Tipos de aplicação

As misturas SMA, à semelhança das misturas betuminosas habitualmente aplicadas do tipo betão betuminoso, são misturas com baixas porosidades, o que as torna particularmente impermeáveis e propensas para serem utilizadas como camada de desgaste ou de regularização/ligação. Todavia, a aplicação de SMA como camada de regularização/ligação tem sido remetida para segundo plano devido a diferentes fatores, tais como:

- A utilização como camada de regularização/ligação torna irrelevantes as características superficiais comparativamente à elevada resistência à deformação requerida.
- A ausência de utilização habitual, segundo [8], deve-se essencialmente, a razões económicas [custo superior ao das misturas betuminosas convencionais na ordem dos 20 % a 25 %, uma vez que requerem agregados com melhores características, maiores percentagens de betume, aditivos e habitualmente betumes modificados [8] e [9]. Por esse motivo, segundo [8], é comum a utilização de misturas betuminosas densas como camada de regularização, as quais são complementadas com camada de desgaste em SMA, de acordo com o princípio dos “pavimentos de longa duração” ou “pavimentos perpétuos”.

Desta forma, a aplicação de SMA a nível mundial tem sido maioritariamente efetuada ao nível das camadas de desgaste por possibilitar a obtenção de uma superfície de desgaste de elevada durabilidade em combinação com uma elevada resistência à deformação permanente e ao fendilhamento [10].

3.2 Dimensões nominais dos agregados

Nas aplicações em pavimentos podem ser utilizados diferentes tipos de misturas SMA, consoante o tipo de aplicação e desempenho pretendido. De acordo com Miranda [2], constata-se internacionalmente que:

- A dimensão máxima nominal dos agregados utilizados no fabrico de misturas SMA varia entre 4 mm (SMA 4) e 22 mm (SMA 22), sendo também essa a gama contemplada na EN 13108-5 (norma europeia harmonizada de produto para as SMA).
- Dentro da gama de dimensões utilizadas, as misturas SMA 8, SMA 10, SMA 11, SMA 12, SMA 16 e SMA 19 são as que mais vezes são consideradas a nível internacional.
- Se efetuada uma análise por continente, observa-se uma clara distinção das misturas SMA usualmente utilizadas: os países do continente europeu tendem a contemplar maioritariamente as SMA 8, SMA 11 e SMA 16; os do continente americano as misturas SMA 9,5 e SMA 12,5; os do continente asiático as SMA 10, SMA 13 e SMA 20 e a Nova Zelândia da Oceânia as misturas SMA 7, SMA 10 e SMA 14.

Porém, independentemente da diversidade de dimensões, a escolha de uma maior ou menor dimensão máxima nominal está também relacionada na sua essência com o tipo de desempenho pretendido para as misturas SMA.

Assim, verifica-se atualmente uma tendência para a utilização de misturas SMA como camada de desgaste, com agregados de menor dimensão nominal entre 4 mm e 8 mm (estradas com menor volume de tráfego, como sejam estradas municipais e vias urbanas, rurais e pedonais) e entre 8 mm e 14 mm (recomendadas como camada de desgaste em pavimentos novos, ou na reabilitação de pavimentos em estradas de maior nível hierárquico com elevado volume de tráfego, como sejam autoestradas e itinerários principais). Tal permite obter camadas com uma melhor regularidade, reduzir o ruído de circulação, assim como a resistência ao rolamento responsável por um aumento do consumo de combustível e de pneus, em suma camadas que asseguram uma melhor comodidade, segurança e economia de circulação [11].

3.3 Espessura das camadas

A espessura utilizada nas camadas betuminosas influencia, nomeadamente, a obtenção de um adequado arranjo estrutural entre os agregados grossos, necessário para este tipo de mistura betuminosa e consequente durabilidade da mistura SMA. De acordo com [12] a utilização de uma camada de SMA com espessura demasiadamente reduzida comparativamente à dimensão máxima nominal do agregado poderá apresentar os seguintes problemas:

- Segregação do material durante o espalhamento e fendilhamento aquando da compactação.
- Dificuldade na compactação da camada betuminosa.
- Esmagamento das partículas menos resistentes da mistura de agregados.
- Uma inadequada distribuição e orientação das partículas de agregado, diminuindo a resistência da camada betuminosa.

Assim, no Quadro 2 apresentam-se os intervalos de espessuras habitualmente recomendados internacionalmente para as camadas de SMA em função da dimensão máxima do agregado. Neste Quadro observa-se a necessidade de uma espessura mínima de cerca de 2,0 cm até uma dimensão máxima do agregado igual a 10 mm, de 2,5 cm para uma mistura SMA 11 e 3,5 cm para uma dimensão máxima do agregado igual ou superior a 12 mm.

Quadro 2 – Intervalo de espessuras das camadas em mistura SMA

Mistura SMA	SMA 8	SMA 10	SMA 11	SMA 12	SMA 14
Espessura (cm)	2,0 - 5,0	2,0 - 4,0	2,5 - 5,0	3,5 - 5,0	3,5 - 6,0

4 MATERIAIS CONSTITUINTES E PROPRIEDADES DAS MISTURAS SMA

Dos materiais que constituem uma mistura SMA, uma das particularidades comparativamente a outros tipos de misturas betuminosas consiste na necessidade de se utilizar aditivos estabilizantes, cujo objetivo é mitigar o efeito do escorrimento de material betuminoso durante o transporte e aplicação. Outra particularidade das misturas SMA consiste na composição ponderal dos seus constituintes e respetivo aspeto do arranjo estrutural dos agregados, a qual se pode observar na Figura 1.

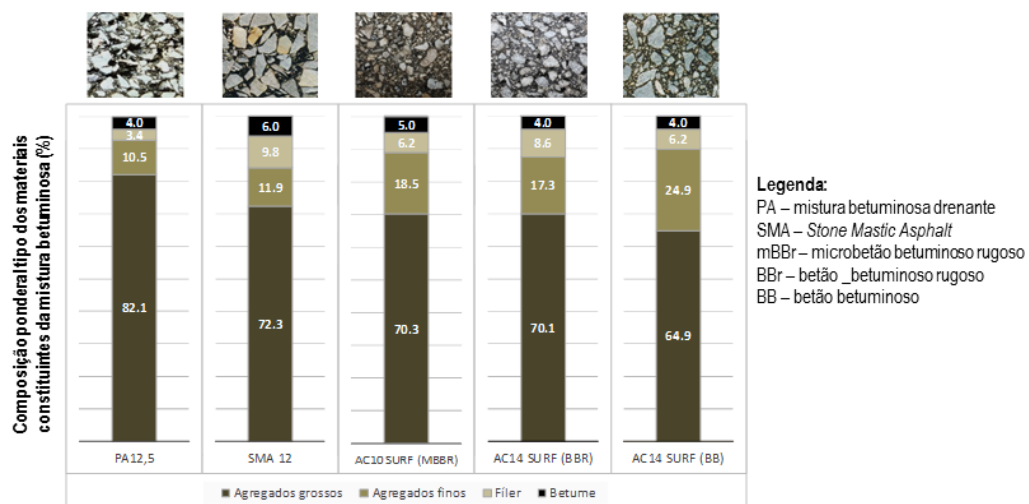


Fig. 1. Arranjo estrutural pétreo de diferentes tipos de misturas betuminosas

A Figura 1 permite verificar que a estrutura pétreo de uma mistura betuminosa do tipo SMA é fortemente baseada na utilização de uma curva granulométrica descontínua com elevada percentagem de agregados grossos, apenas superior no caso das misturas betuminosas drenantes. Contudo, ainda assim, as misturas SMA apresentam uma porosidade reduzida, semelhante à utilizada numa mistura betuminosa do tipo AC 14 surf (BB), habitualmente entre 3 % e 4 %. A reduzida porosidade resulta da utilização de uma elevada percentagem de filer e de betume (cerca de 10 % e 6 %, respetivamente) comparativamente aos restantes tipos de misturas betuminosas que se observam na Figura 1. Outro aspeto a ter em consideração consiste na diminuta percentagem de agregados finos utilizados, semelhante ao que se utiliza numa mistura betuminosa drenante.

Ainda na Figura 1 é possível observar que, no caso da mistura SMA, os agregados grossos se encontram preponderantemente em contacto entre si, à semelhança das misturas drenantes, criando uma estrutura pétreo denominada de *stone-on-stone*, ao contrário do que sucede num betão betuminoso, onde os agregados estão a “flutuar” no mástique betuminoso, sendo quase inexistente o contacto direto entre os agregados grossos.

4.1 Fusos granulométricos

A definição de fusos granulométricos para as misturas SMA deve ter presente, nomeadamente, os materiais disponíveis no País, assim como uma adequada configuração do fuso que promova a obtenção de um efeito de *stone-on-stone* entre os agregados grossos. Para tal, na Figura 2 apresenta-se a representação esquemática de uma divisão entre os agregados grossos “partículas ativas” responsáveis por assegurar o efeito de *stone-on-stone* e os agregados finos e filer “partículas passivas” responsáveis por preencher o esqueleto pétreo formado pelas “partículas ativas”. Nesta Figura é possível observar que uma mistura SMA tem tipicamente uma elevada percentagem de material retida em cada peneiro até um determinado peneiro de referência a partir do qual a percentagem de material retida é reduzida. Tal estrutura pétreo conduz a que o comportamento das misturas SMA seja definido em função de duas componentes distintas (agregados grossos e mástique betuminoso).

No Quadro 3 é apresentada uma sùmula das composições ponderais utilizadas internacionalmente nas misturas SMA 8, SMA 10, SMA 11, SMA 12 e SMA 14 (para os países em estudo).

Quadro 3 – Composição ponderal das misturas SMA 8, SMA 10, SMA 11, SMA 12 e SMA 14

Tipo de mistura SMA	Percentagem acumulada de material passado no peneiro (%)					
	$D \geq 2 \text{ mm}$		$0,063 \text{ mm} \leq D < 2 \text{ mm}$		$D < 0,063 \text{ mm}$	
	Limite superior do fuso	Limite inferior do fuso	Limite superior do fuso	Limite inferior do fuso	Limite superior do fuso	Limite inferior do fuso
SMA 8	85	64	23	10	14	5
SMA 10	85	65	21	7	15	8
SMA 11	82	68	19	10	13	6
SMA 12	84	70	18	8	13	8
SMA 14	85	70 ⁽¹⁾	18	7	13	8

(1) não considerando o fuso definido em Singapura, o qual tem um limite mínimo de 66 %.

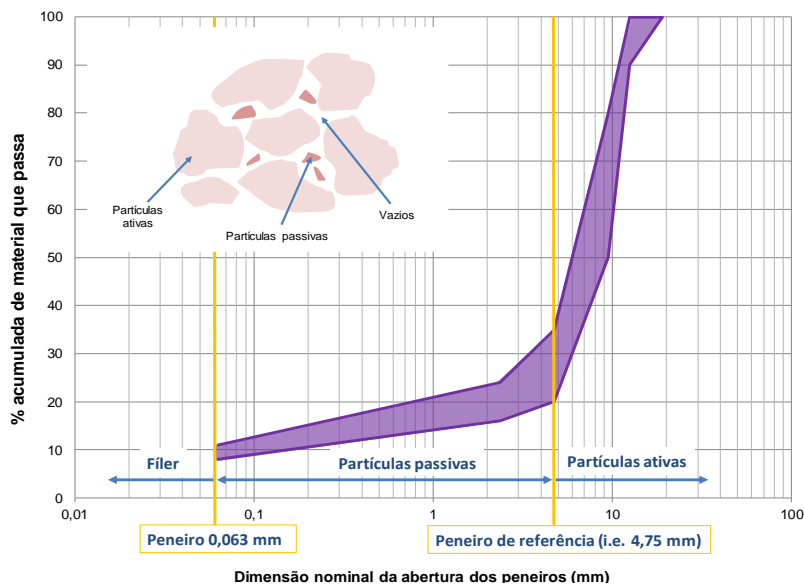


Fig. 2. Divisão entre “partículas ativas”, “partículas passivas” e filer

Assim, considerando o peneiro de dimensão igual a 2 mm como sendo o peneiro que define o limite inferior da dimensão dos agregados grossos é possível constatar no Quadro 3, para as misturas SMA 8, SMA 10, SMA 11, SMA 12 e SMA 14, que a percentagem de agregados grossos utilizada tende a variar entre 64 % e 85 % relativamente à massa total de agregados. O limite superior para a percentagem de agregados grossos a utilizar numa mistura SMA tende a ser relativamente constante, de cerca de 85 %. No caso do limite inferior verifica-se para as misturas SMA cujo agregado apresenta uma dimensão máxima nominal igual a 11 mm, um valor aproximado de 65 % da massa total de agregados, passando a 70 % no caso de misturas SMA cujo agregado apresenta uma dimensão máxima nominal igual ou superior a 12 mm.

Tendo em consideração a necessidade de se maximizar o efeito de *stone-on-stone* é espectável que um utilizador tente maximizar a percentagem de “partículas ativas” para maximizar, nomeadamente, a resistência à deformação permanente. Contudo, o utilizador deve ter presente que um aumento da percentagem de “partículas ativas” contribui para um aumento da permeabilidade na mistura betuminosa, resultando num aumento da sensibilidade à água e ao envelhecimento. Assim, a definição apenas de uma curva granulométrica baseada num fuso granulométrico a utilizar para determinada mistura SMA, não garante por si só a obtenção do efeito de *stone-on-stone*, ou uma mistura SMA que apresente desempenho adequado, como evidenciado em Miranda [2].

4.2 Agregados

Tal como anteriormente mencionado, a elaboração de recomendações a nível nacional, em relação às características a exigir aos agregados (grossos e finos) para misturas SMA, foi efetuada tendo em atenção os requisitos estabelecidos internacionalmente (25 países em estudo), bem como a sua adequabilidade aos agregados disponíveis em Portugal, tendo por base o CETO [6] e os estudos de Miranda [2] e Castelo-Branco & Ferreira [7].

No Quadro 4 são apresentadas as propriedades dos agregados grossos habitualmente definidas internacionalmente e respetivas recomendações a utilizar no fabrico de misturas SMA em Portugal. Neste Quadro é possível observar comparativamente às misturas betuminosas especificadas no CETO [6] para camada de desgaste, uma igual exigência no que concerne à resistência à fragmentação (fundamental para obtenção de um adequado efeito de *stone-on-stone*) e ao polimento acelerado. Contudo, verifica-se para os materiais disponíveis em Portugal, uma particular dificuldade no que concerne à obtenção de materiais que respeitem em simultâneo as categorias mais exigentes das duas propriedades, tal como observado por Castelo-Branco & Ferreira [7]. Contudo, internacionalmente no caso de estradas com um volume de tráfego reduzido é possível utilizar agregados com uma resistência à fragmentação entre 15 e 35 e ao polimento acelerado entre 40 % e 48 % recomendando-se para Portugal, nesse caso, a utilização de um valor igual ou superior a 25 (LA_{25}) e 48 % (PSV_{48}), respetivamente.

Quadro 4 – Propriedades dos agregados grossos e recomendações a utilizar no fabrico de misturas SMA

Propriedades dos agregados grossos	Especificações internacionais	Recomendações para Portugal (Categoria de acordo com a EN 13043)
Massa volúmica das partículas secas, ρ_{rd}	Valor a declarar	Valor a declarar (ρ_{rd} Declarado)
Baridade das “partículas ativas” ⁽¹⁾ , $\rho_{b,pa}$	Valor a declarar	Valor a declarar ($\rho_{b,pa}$ Declarado)
Absorção de água, WA	(-)	$\leq 1\%$ ⁽²⁾ ou $\leq 2\%$ ⁽³⁾
Percentagem de partículas esmagadas e partidas, C	95-100% PTBPE e 0-1% PTR a 100% PTBPE	100% PTBPE ($C_{100/0}$)
Índice de achatamento, FI	≤ 10 a ≤ 30	≤ 15 (FI_{15}) ⁽²⁾ ou ≤ 20 (FI_{20}) ⁽³⁾
Índice de forma, SI	≤ 20	≤ 20 (SI_{20})
Coefficiente Los Angeles, LA	≤ 15 a ≤ 35 ⁽⁴⁾	≤ 20 LA_{20}
Resistência ao polimento acelerado – Coeficiente de polimento acelerado, PSV	$\geq 40\%$ a $\geq 56\%$	$\geq 50\%$ (PSV_{50})
Resistência ao desgaste por atrito- Coeficiente micro-Deval, M_{DE}	≤ 10 a ≤ 15	≤ 15 (M_{DE15})
Absorção de água (às 24h) ⁽⁵⁾ , WA_{24}	≤ 1 a ≤ 2	≤ 1 (WA_{241}) ⁽²⁾ ou ≤ 2 (WA_{242}) ⁽³⁾
Resistência ao sulfato de magnésio - Valor do sulfato de magnésio ⁽⁶⁾ , MS	≤ 18	≤ 18
Afinidade dos agregados grossos aos ligantes betuminosos	$\geq 80\%$	$\geq 80\%$

(1) Consultar [2]; (2) em Portugal Continental; (3) nas Regiões autónomas; (4) para camadas não sujeitas diretamente ao tráfego; (5) Valor determinado como ensaio de triagem para a resistência ao gelo-degelo; (6) Valor determinado no ensaio de avaliação da resistência ao gelo e ao degelo.

Legenda: PTBPE - partículas totalmente britadas ou parcialmente esmagadas (percentagem ponderal); PTR - partículas totalmente roladas (percentagem ponderal).

Dada a especificidade do comportamento das misturas SMA e de acordo com o que foi observado no estudo de Miranda [2], o Quadro 4 apresenta ainda a proposta de avaliação da baridade das “partículas ativas”, com o intuito de se contribuir para o estudo do efeito de *stone-on-stone*.

Relativamente aos agregados finos, apresenta-se no Quadro 5 as propriedades e respetivas recomendações habitualmente definidas para o fabrico de misturas SMA em Portugal. Da leitura do Quadro, verifica-se que a utilização de agregados finos não britados tem sido limitada a estradas com volume de tráfego reduzido ou simplesmente eliminada com o objetivo de não reduzir o imbricamento obtido pelas “partículas ativas”. Como recomendação, no Quadro é indicado o valor do coeficiente de escoamento (valor declarado), como forma de se aferir a sua eventual utilidade para a melhor compreensão do comportamento das misturas SMA, nomeadamente no que concerne à sua resistência à deformação permanente e à sua trabalhabilidade. Uma diminuição do valor do coeficiente de escoamento corresponde a um aumento do atrito entre os agregados, função de uma maior angulosidade que resultará por um lado num aumento da resistência à deformação permanente e por outro num decréscimo de trabalhabilidade da mistura SMA. Assim é fundamental a definição de um ponto de equilíbrio que permita assegurar a resistência à deformação permanente sem comprometer a trabalhabilidade da mistura SMA.

Quadro 5 – Propriedades dos agregados finos e recomendações a utilizar no fabrico de misturas SMA

Propriedades dos agregados finos	Especificações internacionais	Recomendações para Portugal (Categoria de acordo com a EN 13043)
Massa volúmica das partículas secas, ρ_f	Valor a declarar	Valor a declarar (ρ_f Declarado)
Baridade das “partículas passivas”, $\rho_{b,pp}$ ⁽¹⁾	Valor a declarar	Valor a declarar ($\rho_{b,pp}$ Declarado)
Absorção de água, WA	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$
Percentagem de partículas esmagadas e partidas, C	50 % ⁽⁵⁾ a 100 % de partículas totalmente britadas e 0 % de partículas totalmente roladas	100 % de partículas totalmente britadas ($C_{100/0}$)
Granulometria do agregado fino (percentagem de passados no peneiro de 2 mm), G_F	$\geq 85\%$ a $\geq 92\%$ e $\leq 99\%$	Valor não requerido (G_F NR)
Teor de finos (percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm ⁽²⁾), f	$\leq 3\%$ a $\leq 50\%$	Valor não requerido (f NR)
Angulosidade do agregado fino - Coeficiente de escoamento, E_{CS}	Valor a declarar ou valor ≥ 35	< 30 (E_{CS} Declarada)
Valor do azul de metileno, MB_F	(-)	≤ 10 g/kg ($MB_F=10$)
Absorção de água (às 24h) ⁽³⁾ , WA_{24}	≤ 1 a ≤ 2	≤ 1 (WA_{241})
Resistência ao sulfato de magnésio - Valor do sulfato de magnésio ⁽⁴⁾ , MS	≤ 18 a ≤ 30	≤ 18 (MS_{18}) ⁽⁶⁾

(1) Consultar [2]; (2) Nalguns países, como p. ex. nos EUA, as partículas finas no agregado fino correspondem às partículas que passam no peneiro de 0,075 mm; (3) Valor determinado como ensaio de triagem para a resistência ao gelo-degelo; (4) Valor determinado no ensaio de avaliação da resistência ao gelo e ao degelo; (5) para camadas não sujeitas diretamente ao tráfego; (6) Se $WA_{24} > 2$, o valor do sulfato de magnésio deve ter uma categoria no máximo igual a MS_{18} .

De igual modo é recomendada a avaliação da “limpeza” dos agregados finos segundo o ensaio azul metileno (quando o conteúdo de finos for superior a 10 % deve a avaliação dos finos ser complementada com a verificação da conformidade dos restantes requisitos aplicáveis aos fileres). Internacionalmente essa avaliação tende ainda a ser recomendada através do ensaio de equivalente de areia (EA_{35} para camadas não sujeitas diretamente ao tráfego até EA_{70} para condições mais exigentes). À semelhança dos agregados grossos (“partículas ativas”), é também para os agregados finos (“partículas passivas”) recomendada a avaliação da sua baridade, como estudado em Miranda [2].

4.3 Fíler

A avaliação do fíler seguiu a mesma metodologia inicialmente definida através da compilação das propriedades do fíler e respetivos valores preconizados internacionalmente para misturas SMA. Para a definição das recomendações, foi considerado, em especial, o CETO [6], sendo no Quadro 6 apresentada uma síntese.

Quadro 6 – Propriedades do fíler e recomendações a utilizar no fabrico de misturas SMA

Propriedades do fíler	Especificações internacionais	Recomendações para Portugal (Categoria de acordo com a EN 13043)
Tipo de fíler	Pó de pedra, cimento Portland, cal hidráulica, cal hidratada	Pó de calcário, cimento Portland, cal hidráulica, cal hidratada
Percentagem de fíler (em massa)	Cal hidratada: $\leq 1\%$ a $\leq 3\%$ Cimento Portland: $\leq 1\%$ a $\leq 2\%$	Cal hidratada ou cimento: $\leq 1,5\%$
Vazios do fíler seco compactado (Rigden) - Limite inferior e superior para a percentagem em volume, v	28 % a 50 %	28 % a 38 % ($v_{28/38}$)
Granulometria para o fíler comercial	percentagem de passados no peneiro de 2 mm	100 % ⁽¹⁾
	percentagem de passados no peneiro de 0,125 mm	90 % – 100 % ⁽²⁾
	percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm	65 % – 100 % ⁽³⁾
Valor do azul de metileno, MB_F	≤ 10 g/kg	≤ 10 g/kg ($MB_F=10$)
Plasticidade, IP (índice de plasticidade)	Não plástico a $IP \leq 4\%$	Não requerido

(1) Material passado no peneiro 0,425 mm; (2) Material passado no peneiro 0,150 mm; (3) Material passado no peneiro 0,075 mm.

De acordo com o Quadro 6, dos fileres utilizados internacionalmente é recomendada a utilização em Portugal de fileres comerciais (pó de calcário, cimento Portland, cal hidráulica e cal hidratada). No caso da cal hidratada e do cimento a sua utilização deve ser limitada a um máximo de 1,5 % relativamente à massa total de agregados de acordo com Austroads [13]. Apesar das cinzas volantes e dos fileres recuperados serem passíveis de utilizar em Portugal para o fabrico de misturas betuminosas, no caso das misturas SMA não se recomenda a sua utilização pela possibilidade de se obterem misturas betuminosas com uma reduzida trabalhabilidade e elevada heterogeneidade como demonstrado por [14] e [15].

No que concerne às propriedades dos fileres indicadas no CETO [6], são em tudo semelhantes às recomendadas internacionalmente para o fíler a utilizar em misturas SMA. A exceção sucede relativamente à avaliação do equivalente de areia e índice de plasticidade, as quais tendem a não ser especificadas em Portugal para as misturas betuminosas. No caso do ensaio de equivalente de areia este tem sido substituído pelo ensaio de azul metileno.

4.4 Betume

Da análise das propriedades recomendadas para o betume a nível internacional, verifica-se que apenas é comumente recomendado o tipo e percentagem de betume, conforme sintetizado no Quadro 7. Neste Quadro apresentam-se também as recomendações (a **negrito**) a utilizar no fabrico de misturas SMA em Portugal.

No Quadro 7 é possível observar a recomendação de utilização de betumes convencionais preferencialmente em estradas com um volume de tráfego reduzido.

No caso da percentagem mínima de betume, é recomendado para as misturas SMA a fabricar em Portugal, o limite inferior dos intervalos internacionalmente especificados. A especificação de percentagens de betume mais elevadas deverá decorrer de uma validação laboratorial e em obra.

Dos betumes contemplados no CETO [6] não se indica no Quadro 7 para o fabrico de misturas SMA a utilização do betume modificado PmB 10/40, assim como de betumes duros, de modo a minimizar eventuais problemas na aplicação deste tipo de misturas betuminosas.

Quadro 7 – Propriedades do betume e recomendações a utilizar no fabrico de misturas SMA

Requisitos do betume	Propriedades do betume	Especificações internacionais / Recomendações para Portugal (a <i>negrito</i>)			
Percentagem mínima de betume		(5,8-8,0) 5,8			
Tipo de betume		35/50 ⁽¹⁾ , 50/70 ⁽¹⁾	PmB 25/55	PmB 45/80	PmB 65/105
Consistência a temperatura de serviço intermédia	Penetração a 25 °C (0,1 mm)	35 - 50, 50 - 70	Classe 3 (25 - 55)	Classe 4 (45 - 80)	Classe 6 (65 - 105)
Consistência à temperatura de serviço elevada	Temperatura de Amolecimento (°C)	50 - 58, 46 - 54	Classe 5 (≥ 65)	Classe 7 (≥ 55)	Classe 2 (≥ 80)
Coesão	Força de ductilidade (tração baixa velocidade) (J/cm ²)	(-)	Classe 3 (≥ 2) (5 °C)	Classe 2 (≥ 3) (5 °C) Classe 6 (≥ 2) (10 °C)	(-)
Durabilidade, Resistência ao envelhecimento, (RTFOT) a 163 °C	Variação de massa, máxima (%)	≤ 0,5	Classe 2 (≤ 0,3)		
	Penetração retida, a 25 °C (%)	≥ 53	(-)		
	Aumento da Temp. de Amolecimento (°C) ⁽²⁾	≤ 8, ≤ 9	Classe 2 (≤ 8)		
	Penetração a 25°C (0,1 mm)	(-)	Classe 7 (≥ 60)		
Outros requisitos	Ponto de inflamação (°C)	≥ 240, ≥ 230	Classe 3 (≥ 235)		
	Ponto de fragilidade de Fraass (°C)	≤ -5, ≤ -8	Classe 5 (≤ -10)		
	Viscosidade Cinemática (135 °C) (mm ² /s)	≥ 370, ≥ 295	(-)		
	Teor em parafinas % (m/m)	≤ 2,2	(-)		
	Solubilidade (%)	≥ 99,0	(-)		
	Recuperação elástica a 25 °C (%)	(-)	Classe 3 (≥ 70)		
	Estabilidade ao armazenamento (diferença de temperatura de amolecimento) (°C)	(-)	Classe 2 (≤ 5)		
	Estabilidade ao armazenamento (diferença na penetração) (0,1 mm)	(-)	Classe 2 (≤ 9)		

(1) aplicável preferencialmente a estradas com volume de tráfego reduzido; (2) obrigatória a sua avaliação no caso dos betumes modificados.

4.5 Aditivos estabilizantes

A combinação de uma elevada percentagem de betume com uma curva granulométrica descontínua com elevada percentagem de agregados grossos conduz a um aumento da suscetibilidade das misturas SMA à ocorrência de escorrimento de material betuminoso, podendo promover a segregação do mástique betuminoso durante o fabrico, armazenamento, transporte e aplicação, comparativamente às misturas betuminosas convencionais. Na fase de serviço, o excesso de betume livre na mistura betuminosa contribui para um aumento da probabilidade de ocorrência de exsudação na superfície da camada betuminosa, como observado por [16] e [17].

Para mitigar a quantidade de betume livre é requerida a utilização de aditivos estabilizantes, que tornam possível uma elevada percentagem de betume na mistura betuminosa, consequência do aumento da superfície específica da mistura betuminosa, sem com isso conduzir à sua instabilidade e em alguns casos melhorando inclusive o seu desempenho. Entre os diferentes tipos de aditivos estabilizantes passíveis de utilizar nas misturas SMA é possível referir: fibras (i.e. celulósicas, minerais); materiais provenientes da reciclagem (i.e. proveniente de pneus em fim de vida, plástico); sílica artificial e em menor extensão polímeros; ou ainda a combinação destes.

No Quadro 8 são apresentadas as recomendações no que se refere aos materiais e à percentagem mínima de aditivo estabilizante a utilizar em Portugal para o fabrico de misturas SMA.

Quadro 8 – Propriedades dos aditivos estabilizantes e recomendações a utilizar no fabrico de misturas SMA

Propriedades dos aditivos estabilizantes	Especificações internacionais	Recomendações para Portugal
Tipo de aditivo	Fibras celulósicas ⁽¹⁾ , fibras minerais, outros tipos de aditivo	Fibras celulósicas, fibras minerais, outros tipos de aditivo
Percentagem mínima de aditivo (%) ⁽²⁾	0,3 ⁽³⁾ - 0,4 ⁽⁴⁾	0,3 ⁽³⁾ - 0,4 ⁽⁴⁾

(1) aditivo habitualmente utilizado internacionalmente; (2) relativamente à massa total da mistura betuminosa; (3) fibras celulósicas; (4) fibras minerais

Constata-se no Quadro 8 que, internacionalmente, raramente se exigem requisitos a respeitar pelos aditivos, sendo apenas comum a exigência do tipo e percentagem mínima a utilizar, tendo em vista a mitigação do escorrimento de material betuminoso, como é igualmente proposto para Portugal.

Contudo, importa que presentemente exista um contributo significativo, relativo à avaliação das propriedades dos presentes aditivos estabilizantes e outros, não apenas com o intuito de se mitigar o escorrimento, mas também de aferir a sua influência na melhoria do desempenho das misturas SMA. Tal visa maximizar a relação custo/benefício das misturas SMA, o que possibilita: aos donos de obra informação útil de referência para os valores limite a requerer para as diferentes propriedades e; aos projetistas e empresas construtoras disponibilizando informação útil para a adequada seleção das propriedades e/ou materiais a especificar e a utilizar em obra. No que concerne à percentagem de fibras celulósicas a utilizar deve ser calculada relativamente à massa total da mistura betuminosa e determinada através do ensaio de *Schellenberg* para avaliação do escorrimento segundo a EN 12697-18, como recomendado no estudo Miranda [18].

5 MISTURAS BETUMINOSAS DO TIPO SMA

No Quadro 9 são apresentadas as propriedades das misturas betuminosas do tipo SMA habitualmente definidas internacionalmente e respetivas recomendações a utilizar na avaliação das misturas SMA em Portugal.

Quadro 9 – Propriedades e recomendações a utilizar na avaliação de misturas SMA

Propriedades das misturas betuminosas		Especificações internacionais	Recomendações para Portugal (Categoria de acordo com a EN 13108-5)
Propriedades volumétricas	Método de compactação de provetes	Por impacto (Marshall) ⁽¹⁾	Por impacto (Marshall) ⁽¹⁾
	VCA _{MIX} (%)	≤ VCA _{PC} ⁽²⁾	(-)
	Porosidade, V _v (%)	V _{v min1,5} - V _{v máx6,0}	V _{v min2,5} - V _{v máx4,0}
	Vazios na mistura de agregados, VMA (%)	VMA _{min15,0} - VMA _{min20,0}	VMA _{min17,0}
	Volume de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume, VFB (%)	VFB _{min70} - VFB _{máx92}	VFB _{min70} - VFB _{máx92}
Propriedades relacionadas com o desempenho	Deformação permanente	(mm)	≤ 4,0 (RD _{AIR 4,0})
		(mm/10 ³ ciclos)	≤ 0,15 (WTS _{AIR 0,15})
		(%)	≤ 8,0 (PRD _{AIR 8,0})
	ITSR (%)	ITSR _{Declarado} - ITS _{R90}	≥ 80 (ITS _{R80})
Escorrimento (%)	D _{Declarado} - D _{0,3}	< 0,3 (D _{0,3})	

(1) compactação com 50 pancadas por topo; (2) volume de vazios na mistura de "partículas ativas" compactadas com o compactador Proctor (consultar [6]).

Legenda: VCA_{MIX} - volume de vazios preenchidos na mistura de "partículas ativas" existentes numa mistura betuminosa SMA compactada; RD - deformação máxima (profundidade de rodeira a 10000 ciclos); WTS - taxa de deformação; PRD - percentagem de profundidade de rodeira a 10000 ciclos; ITS_R - resistência conservada em tração indireta.

De acordo com o Quadro 9, ao contrário da porosidade que é especificada por todos os países, no caso das propriedades volumétricas como o VMA e o VFB, apenas são especificadas num reduzido número de países. Para o VMA é comum especificar um valor igual ou superior a 17 %, preferencialmente superior a 18 %, podendo o intervalo de valores especificados variar entre 15 % e 20 %. A utilização de um VMA elevado tem como objetivo assegurar um volume de vazios adequado para acomodar a elevada percentagem de betume requerida neste tipo de misturas betuminosas, assim como uma eventual quebra excessiva de agregados a qual irá diminuir o volume de vazios disponível para acomodar o betume em obra.

Adicionalmente às propriedades apresentadas no Quadro 9, as misturas SMA segundo a norma EN 13108-5 podem ainda ter de respeitar outras propriedades referentes à avaliação da resistência à abrasão por pneus pitonados, módulo de deformabilidade, resistência à fadiga, propriedades para temperaturas reduzidas, atrito após polimento; envolvimento dos agregados por betume e homogeneidade, resistência ao fogo, resistência aos carburantes que podem ser derramados no pavimento, assim como a resistência aos fluídos descongelantes, ambos para quando as misturas SMA são aplicadas em aeroportos.

6 CONCLUSÕES

Em suma, a compilação de informação realizada neste estudo, como contributo para a adequada aplicação de misturas SMA em Portugal, permitiu obter as seguintes conclusões principais:

- (i) A falta de especificações nacionais sobre misturas SMA e/ou a sua incorporação nos cadernos de encargos rodoviários nacionais, limita uma uniforme e padronizada conduta dos donos de obra, projetistas e empresas construtoras, na utilização de misturas SMA, podendo conduzir a soluções diferentes quanto à durabilidade e desempenho estrutural e/ou funcional dos pavimentos onde estas misturas são aplicadas.
- (ii) As misturas SMA tendem a ser aplicadas preferencialmente como camada de desgaste, dado o seu custo superior comparativamente às misturas betuminosas convencionais.
- (iii) Na definição de fusos granulométricos, observa-se para as misturas SMA cujo agregado apresenta uma dimensão máxima nominal igual ou inferior a 11 mm, que a percentagem de agregados grossos utilizada tende a variar entre 64 % e 85 % relativamente à massa total de agregados. No caso de misturas SMA com agregados cuja dimensão máxima nominal é superior a 11 mm o intervalo tende a estar entre 70 % e 85 % relativamente à massa total de agregados.
- (iv) Os valores limite habitualmente definidos em Portugal para as propriedades dos materiais a utilizar nas misturas do tipo microbetão betuminoso e mistura betuminosa rugosa com betume modificado com média percentagem de borracha (misturas que mais se assemelham a uma mistura SMA), tendem a estar compreendidos nos intervalos de propriedades requeridas a nível internacional para os materiais a utilizar nas misturas SMA.
- (v) A exigência das misturas SMA no que concerne à resistência à fragmentação (fundamental para obtenção de um adequado efeito de *stone-on-stone*) e ao polimento acelerado, poderá condicionar o potencial desempenho e durabilidade das misturas SMA, nomeadamente, no que concerne ao desempenho funcional, dado verificar-se para os materiais disponíveis em Portugal, uma particular dificuldade no que concerne à obtenção de materiais que respeitem em simultâneo as categorias mais exigentes das duas propriedades, como recomendado internacionalmente.
- (vi) Utilização de agregados finos não britados tem sido limitada a estradas com um volume de tráfego reduzido ou simplesmente eliminada.
- (vii) A utilização de fíleres recuperados não deve ser recomendada para misturas SMA pela possibilidade de se obter misturas betuminosas com reduzida trabalhabilidade e elevada heterogeneidade.
- (viii) Os betumes convencionais deverão ser tendencialmente utilizados apenas em estradas com um volume de tráfego reduzido. Do mesmo modo a utilização de betumes especialmente modificados, assim como de betumes duros, deve ser evitada, de modo a minimizar eventuais problemas na aplicação em obra deste tipo de misturas betuminosas.
- (ix) É fundamental que exista um contributo significativo, relativo à avaliação da influência das propriedades dos diversos aditivos estabilizantes, não apenas com o intuito de se mitigar o escorrimento, mas também de aferir a sua influência na melhoria do desempenho das misturas SMA, maximizando-se a relação custo/benefício.
- (x) A formulação de misturas SMA segundo o método Marshall tende a ser realizada através da compactação de provetes com 50 pancadas em cada topo do provete. No caso da República Checa é ainda efetuada a comparação entre provetes compactados com 50 e 100 pancadas em cada topo do provete, com o intuito de aferir o efeito de *stone-on-stone*.
- (xi) As misturas SMA devem assegurar um VMA igual ou superior a 17 %, preferencialmente 18 %, como forma de assegurar um volume de vazios adequado para acomodar a elevada percentagem de betume requerida neste tipo de misturas betuminosas, assim como uma eventual quebra excessiva de agregados a qual irá diminuir o volume de vazios disponível para acomodar o betume na obra.

7 REFERÊNCIAS

1. EAPA, *Long-life asphalt pavements – Technical version*, European Asphalt Pavement Association, Breukelen, 2007.
2. H.M.B. Miranda, *Misturas betuminosas de alto desempenho do tipo Stone Mastic Asphalt – Formulação, fabrico, aplicação e desempenho*, Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2016. 349 p. Tese de Doutoramento.
3. AASHTO, *AASHTO M325-08, Standard Specification for Stone Matrix Asphalt (SMA)*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2012.
4. TL Asphalt-StB, *TL Asphalt-StB 07, Technical Delivery Specification for bituminous mixtures for the construction of traffic area pavements*, Research Society for Highway and Traffic Affairs, Alemanha, 2007.
5. TDOK, *TDOK 2013:0529, Bitumenbundna lager*, Trafikverket, Suécia, 2014.
6. EP, *Caderno de Encargos Tipo Obra, 14.03 – Pavimentação, características dos materiais*, Estradas de Portugal, S.A., Portugal, 2014.
7. F.C. Branco & M.Q. Ferreira, *Levantamento das características dos agregados produzidos em Portugal*, Instituto de Infra-estruturas Rodoviárias, Portugal, 2009.
8. CAPA, *Stone Mastic Asphalt Task Force: Transferring the technology to Colorado and update report*, Stone Mastic Asphalt Workshop, Maryland, 25-27 Março 2002.
9. NAPA, *Designing and constructing Stone Matrix Asphalt (SMA) mixtures: State-of-the-practice*, National Asphalt Pavement Association, Virgínia, 1999. (Relatório n.º QIP-122).
10. EAPA, *Heavy Duty Surfaces: The arguments for SMA*, European Asphalt Pavement Association, Breukelen, 1998.
11. VTI & Chalmers, *Appendix 3: Possibilities to reduce noise emission from the tyre/road interaction with emphasis on the Swedish situation*, Swedish Road and Transport Research Institute (VTI) e Chalmers University of Technology, Suécia, 2007.
12. K. Blazejowski, *Stone Matrix Asphalt: Theory and Practice*, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2011. 307 p. ISBN 9781439819715.
13. Austroads, *Mastic performance assessment in Stone Mastic Asphalt*, Austroads Incorporated, Sidney, 2013. (Relatório n.º AP-T219-13).
14. C. Pashula, Implementation of SMA (stone mastic asphalt) in Australia, *Asphalt Review*, Austrália. ISSN 0727-0003. 24:3, 2005, pp. 13-18.
15. B.D. Prowell, D.E. Watson, G.C. Hurley & E.R. Brown (2009), *Evaluation of Stone Matrix Asphalt (SMA) for airfield pavements*, National Center for Asphalt Technology (NCAT), Alabama, 2009. (Relatório n.º AAPTP 04-04).
16. E.R. Brown, *Evaluation of SMA used in Michigan (1991)*, National Center for Asphalt Technology (NCAT), Alabama, 1992. (Relatório n.º 93-03).
17. E.R. Brown, R.B. Mallick, J.E. Haddock & J. Bukowski, *Performance of Stone Matrix Asphalt paving mixtures (SMA) mixtures in the United States*, National Center for Asphalt Technology, Alabama, 1997. (Relatório n.º 97-01).
18. H.M.B. Miranda, F. Batista, M.L. Antunes & J. Neves, Análise comparativa de métodos de ensaio para avaliação do escorrimento em misturas betuminosas do tipo Stone Mastic Asphalt segundo a norma EN 12697-18, *Proc. VII Congresso Rodoviário Português, Estrada 2013*, Lisboa, 10-12 Abril 2013.