

UNIVERSIDADE DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

**Misturas Betuminosas de Alto Desempenho do
Tipo *Stone Mastic Asphalt* – Formulação,
Fabrico, Aplicação e Desempenho**

Henrique Manuel Borges Miranda

Orientador: Doutora Maria de Lurdes Baptista da Costa Antunes

Co-orientador: Doutora Fátima Alexandra Barata Antunes Batista

Co-orientador: Doutor José Manuel Coelho das Neves

**Tese aprovada em provas públicas para obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Civil**

Qualificação atribuída pelo Júri: Aprovado com Distinção

Júri

Presidente: Presidente do Conselho Científico do IST

Vogais:

Doutor Luís Guilherme de Picado Santos

Doutora Maria de Lurdes Baptista da Costa Antunes

Doutor António José Boavida Correia Diogo

Doutora Arminda Maria Marques Almeida

Doutor Joel Ricardo Martins Oliveira

Doutora Patrícia Alexandra Afonso Dinis Ferreira

UNIVERSIDADE DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

**Misturas Betuminosas de Alto Desempenho do
Tipo *Stone Mastic Asphalt* – Formulação,
Fabrico, Aplicação e Desempenho**

Henrique Manuel Borges Miranda

Orientador: Doutora Maria de Lurdes Baptista da Costa Antunes

Co-orientador: Doutora Fátima Alexandra Barata Antunes Batista

Co-orientador: Doutor José Manuel Coelho das Neves

**Tese aprovada em provas públicas para obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Civil**

Qualificação atribuída pelo Júri: Aprovado com Distinção

Júri

Presidente: Presidente do Conselho Científico do IST

Vogais:

Doutor Luís Guilherme de Picado Santos, Professor Catedrático do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa

Doutora Maria de Lurdes Baptista da Costa Antunes, Investigadora Coordenadora do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Doutor António José Boavida Correia Diogo, Professor Associado do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa

Doutora Arminda Maria Marques Almeida, Professora Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Doutor Joel Ricardo Martins Oliveira, Professor Auxiliar da Escola de Engenharia da Universidade do Minho

Doutora Patrícia Alexandra Afonso Dinis Ferreira, Professora Auxiliar Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa

Ex me ipsa renata sum

Título Misturas betuminosas de alto desempenho do tipo *Stone Mastic Asphalt* – formulação, fabrico, aplicação e desempenho

Nome Henrique Manuel Borges Miranda

Doutoramento em Engenharia Civil

Orientador Doutora Maria de Lurdes Baptista da Costa Antunes

Co-orientador Doutora Fátima Alexandra Barata Antunes Batista

Co-orientador Doutor José Manuel Coelho das Neves

Resumo

As misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA) apresentam um alto desempenho, sendo particularmente interessantes para aplicação em camadas de desgaste, pela sua resistência ao fendilhamento e à deformação permanente. A melhoria do desempenho à deformação permanente resulta da estrutura pétreia que uma SMA oferece, a qual é fortemente baseada na utilização de uma curva granulométrica descontínua, contribuindo para um efeito de *stone-on-stone* entre as “partículas ativas” (agregados grossos de dimensão superior a um peneiro de referência).

Contudo, a obtenção do efeito de *stone-on-stone* requer uma adequada formulação deste tipo de misturas betuminosas de modo a que, a quantidade de mastic betuminoso (partículas passivas, fíler, aditivos estabilizantes e betume) seja inferior ao volume de vazios disponível entre as partículas ativas. Todavia, esta premissa não assegura que o efeito de *stone-on-stone* obtido esteja otimizado, ou que a mistura SMA apresente um desempenho global adequado.

Assim, o presente trabalho teve como principal objetivo desenvolver um novo sistema integrado de formulação e controlo de qualidade durante e/ou após aplicação de uma SMA em obra, que assente na definição da composição volumétrica ótima de uma mistura SMA baseada no desempenho.

O sistema integrado proposto tem como pressuposto que a composição de uma mistura SMA deve assegurar a obtenção e otimização do efeito de *stone-on-stone* (através da otimização da percentagem de partículas ativas), assim como a otimização do mastic betuminoso, através do conceito proposto de *mastic-within-stone* o qual pretende contribuir para a obtenção de uma adequada trabalhabilidade, de um desempenho mecânico adequado (*mix-skeleton*) e de um desempenho funcional adequado (*tire-on-stone*).

Para alcançar este objetivo foi efetuada uma análise das propriedades dos materiais constituintes das SMA, assim como dos diferentes métodos de formulação utilizados internacionalmente, bem como dos aspetos relevantes para a formulação das SMA.

No que concerne à obtenção e otimização do efeito de *stone-on-stone* na fase de formulação, foi proposta uma nova metodologia de compactação baseada no compactador Proctor, a qual decorreu da avaliação realizada através do estudo de diferentes métodos de compactação de partículas ativas em laboratório, aferindo a sua adequabilidade ao método de formulação proposto e a sua representatividade face às condições obtidas em obra, no que concerne à quebra de agregado.

Relativamente à otimização do *mastic-within-stone* foi proposta uma nova metodologia de previsão do desempenho das SMA, a partir de resultados de ensaios sobre um conjunto de SMA formuladas, nomeadamente, no que concerne à deformação permanente, ao fendilhamento por fadiga, à resistência ao envelhecimento e à água, ao escorrimento de material betuminoso, à profundidade média da textura e coeficiente de atrito. A avaliação do desempenho contemplou misturas do tipo SMA 11, SMA 12 e SMA 14 (todas aplicadas em obra como camada de desgaste) recomendando-se que se complemente o trabalho com a caracterização de outros tipos de SMA.

A metodologia proposta permite a um utilizador, para uma determinada composição volumétrica da mistura SMA, estimar as respetivas características volumétricas, trabalhabilidade e desempenho (resistência à deformação permanente, ao fendilhamento por fadiga, módulo de deformabilidade e profundidade média da textura). Tal contribui para uma alteração do paradigma atual através da definição de uma abordagem baseada no desempenho para a determinação da composição ótima de uma mistura SMA.

O método proposto contribui, nomeadamente para a redução dos custos, tempo e conhecimento necessários para a formulação e controlo de qualidade de misturas do tipo SMA, assim como para um incremento do grau de confiança relativo ao seu desempenho e trabalhabilidade e consequentemente à sua durabilidade.

Palavras-chave: Pavimentos, *Stone Mastic Asphalt*; Formulação; *Stone-on-stone*; Desempenho

Título Stone Mastic Asphalt – mix design, production, application and performance

Nome Henrique Manuel Borges Miranda

Doutoramento em Engenharia Civil

Orientador Doutora Maria de Lurdes Baptista da Costa Antunes

Co-orientador Doutora Fátima Alexandra Barata Antunes Batista

Co-orientador Doutor José Manuel Coelho das Neves

Abstract

Stone Mastic Asphalt (SMA) mixes have good performance, especially for application in wearing courses due to their high resistance to cracking and rutting. The key factor contributing to their improved performance is attributed to the aggregate structure created by the SMA gap-gradation, which promotes stone-on-stone contact in the “active particles” (large size aggregates), which doesn't occur in conventional dense mixes with more continuous gradations.

However to reach an appropriate stone-on-stone effect an adequate mix design is required such that the volume of mastic (passive particles, fillers, stabilizers and bitumen) is lower than the air void volume created by the active particles. However, this condition alone does not guaranty that the adequate stone-on-stone effect is created or that the SMA mix will have the adequate performance.

This thesis had as its major objective the development of a new integrated system to design an SMA mix that also provides added information for the quality control during and after the application of the SMA, which is based on the definition of an optimized volumetric composition that guaranties an adequate mechanical and functional performance, *i-performance*.

The integrated system proposed is based on the key concept that the SMA mix must insure the development and optimization of the stone-on-stone contact (though the optimization of the percentage of active particles). However, this concept must be associated to the new proposed concept of *mastic-within-stone* that leads to the optimization of the binder mastic. Both the stone-on-stone and *mastic-within-stone* properly designed and selected contribute to the workability of the SMA and the several new proposed performance indicators *mix-skeleton* and *tire-on-stone*.

To reach the objectives a complete analysis of the properties of the SMA components was studied together with design concepts used in key institutions internationally as well as other aspects relevant to SMA mix design.

For the optimization of the stone-on stone effect, a new compaction method was developed using the Proctor compactor, based on the evaluation undertaken through the laboratory studies of different compaction methods of active particles, concerning the applicability for mix design and in the simulation of particle breakage during compaction.

Furthermore, for the optimization of the mastic-within-stone effect, a new performance prediction method was developed, based on tests performed on SMAs applied on actual construction (specially in what regards permanent deformation, flexural fatigue cracking, resistance to ageing, water sensitivity, draindown, texture depth and skid resistance). The mixes studied where, SMA11, SMA12

and SMA14 (all applied in wearing course) and it is recommended that this study is complemented through the characterization of other types of SMA.

The proposed method allows a user for a given volumetric composition of the SMA mixture to estimate its volumetric characteristics, workability and performance (resistance to permanent deformation, fatigue cracking, stiffness modulus and macrotexture). This contributes to a change in the current paradigm by defining a performance based approach for determining the optimized volumetric composition of an SMA mixture (i-SMA).

The new integrated system contributes in particular to the reduction of costs, time and knowledge required for the design and quality control of SMA mixtures, as well as for an increase the reliability of their performance and workability and consequently their durability.

Key-words: Road and Airport pavements, Stone Mastic Asphalt; Mix Design; Stone-on-stone; Performance

AGRADECIMENTOS

A elaboração de uma Tese de Doutoramento é o resultado de um caminho longo e repleto de desafios. Contudo, este caminho não foi realizado na solidão, mas sim aliado a uma orientação sabedora e mobilizadora de vontades, bem como acompanhado e apoiado por entidades e pessoas singulares, que foram fundamentais para a execução deste trabalho, às quais expresso a minha profunda gratidão e agradeço profundamente pelo seu apoio. Assim, não sendo possível enumerar todos os que de alguma forma contribuíram para a realização desta tese, agradeço particularmente:

À minha orientadora, Investigadora Coordenadora e Vogal do Conselho Diretivo do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Doutora Maria de Lurdes Antunes, o meu profundo agradecimento pelas suas ideias e críticas tão pertinentes e pela sua pronta disponibilidade. O seu contributo neste trabalho é de enaltecer, não só pelos ensinamentos e reflexões ímpares, mas também pelo apoio demonstrado nos momentos mais difíceis, próprios de um trabalho com esta dimensão.

À minha co-orientadora, Investigadora Auxiliar no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Doutora Fátima Batista, um especial bem-haja, pela amizade e pronta disponibilidade demonstrada ao longo deste trabalho. O lado humano expresso num incentivo único e os seus saberes traduzidos em reflexões profícuas foram fundamentais ao longo do presente trabalho.

Ao meu co-orientador, Professor Auxiliar no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Doutor José Neves, pelo apoio e orientação que disponibilizou ao longo da realização deste trabalho. Agradeço especialmente por me ter inculido o gosto e o interesse pela área da pavimentação.

Também dirijo a minha gratidão ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, por me permitirem formar enquanto profissional na área da Engenharia Civil, e aos docentes que pelo seu trabalho diário dignificam a instituição. Um especial agradecimento desejo endereçar à Professora Coordenadora Principal, Doutora Maria da Graça Lopes, ao Professor Coordenador Armando Teles Fortes, à Professora Adjunta Luísa Teles Fortes e ao Professor Adjunto Armando Martins, por toda a amizade e companheirismo que sempre me disponibilizaram.

Agradeço à chefia do Núcleo de Infraestruturas de Transportes, na pessoa do Investigador Principal com Habilitação, Doutor Eduardo Fortunato, pela disponibilização de meios humanos e materiais necessários do Núcleo de Infraestruturas Rodoviárias e Aeroportuárias do Departamento de Transportes do LNEC à devida concretização da componente experimental deste trabalho.

Ao Instituto Superior Técnico, na pessoa do Professor Catedrático, Doutor Picado Santos, pelas palavras de incentivo e pela disponibilização de meios humanos e materiais do Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico, imprescindíveis ao amplo estudo relativo à avaliação da fadiga das misturas betuminosas e na avaliação do IRI.

À Câmara Municipal de Lisboa, na pessoa do Engenheiro Arlindo Bento, pela mobilização de meios humanos e equipamentos essenciais para manter a segurança durante a realização dos trabalhos de campo na Avenida do Brasil.

À JRS Rettenmair Ibérica, na pessoa do seu Diretor Geral, Engenheiro Santiago Lanchas, pelo fornecimento de fibras celulósicas e restantes materiais necessários à realização deste trabalho, os quais foram prontamente disponibilizados pela JAOP – Sociedade de Empreitadas S.A..

Ao Doutor Fernando Martinho, pela disponibilidade e por todo o apoio, nomeadamente no fornecimento de informação imprescindível para a realização deste trabalho.

Ao Engenheiro Gilberto Alves, Director de Fabrica da TEXSA, por prontamente disponibilizar o acesso ao Parque Industrial da TEXSA e a recolha de amostras do pavimento.

À MPS – Manuel Pedro de Sousa e Filhos, Lda, que se prontificaram e gentilmente cederam os meios técnico e materiais necessários à recolha de amostras no trecho experimental no LNEC e no Parque Industrial da TEXSA, em Alpiarça.

Às empresas que acederam ao meu pedido de fornecimento de materiais, a título individual e totalmente voluntarioso: REPSOL, CEPESA, Probigalp, Pedreira Calbrita, Omya e Pedreira Moita da Ladra, propriedade da Alves Ribeiro S.A., em especial ao Engenheiro Pedro Silva, que para além de permitir o acesso ao material, se prontificou a apoiar-me na recolha do material.

À empresa Jaime Miguel Machado dos Santos, Lda, na pessoa do Engenheiro Jaime dos Santos, pela pronta disponibilização do equipamento utilizado para a decapagem das lajetas.

Ao Doutor Jorge Sousa, pela amizade e por ter abdicado dos meus serviços em prol da realização deste trabalho. Agradeço ainda aos meus colegas da Consulpav, pelo apoio e compreensão demonstrados, aquando da sobrecarga de trabalho.

Aos Senhores José Reimão, Nuno Nunes, Eduardo Coimbra, Daniel Fernandes, Experimentadores do Núcleo de Infraestruturas Rodoviárias e Aeroportuárias do Departamento de Transportes do LNEC e aos Senhores Paulo dos Santos e Joaquim Pereira, Experimentadores da Unidade de Produtos Metálicos do Departamento de Estruturas do LNEC, pelo profissionalismo, dedicação e disponibilidade demonstrada na realização dos ensaios.

Uma palavra de apreço aos técnicos, João Crucho e Rui Garcia do Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, pelo profissionalismo e disponibilidade para a realização dos ensaios, em especial ao João Crucho, pela sua energia, ao qual desejo as melhores felicidades para a conclusão do seu Doutoramento, que estou certo que será um sucesso pela humildade e dedicação no trabalho que desenvolve.

Por último, mas não menos importantes, gostaria de manifestar os meus profundos e sinceros agradecimentos, em particular:

À minha família, em especial à minha esposa, Liliana Dias por ter aceite embarcar numa viagem da qual nem sempre se conheceu o destino, mas acima de tudo por sempre me ter apoiado e de uma forma construtiva me ter ajudado a ver as coisas para além dos muros que fui encontrando. Aos meus pais, responsáveis pela pessoa que hoje sou e pela experiência de vida que sempre me transmitiram. Aos restantes elementos da família por compreenderem todos os meus momentos de ausência e força que me transmitiram.

Aos meus amigos, que não convivendo diretamente comigo na realização deste trabalho, sempre me apoiaram e motivaram na sua concretização, em especial ao Paulo Leitão e à Cristina Gonçalves, pelos momentos de descontração e diversão.

A todos um grande bem-haja!

MISTURAS BETUMINOSAS DE ALTO DESEMPENHO DO TIPO *STONE MASTIC ASPHALT* – FORMULAÇÃO, FABRICO, APLICAÇÃO E DESEMPENHO

ÍNDICE

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento do tema.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Metodologia.....	3
1.4	Estrutura do trabalho.....	4
2	Fabrico e Aplicação de misturas betuminosas do tipo Stone Mastic Asphalt (SMA)	7
2.1	Considerações gerais.....	7
2.2	Fabrico de SMA.....	7
2.2.1	Processo de fabrico.....	7
2.2.2	Fabrico em central descontínua de misturas betuminosas.....	10
2.2.3	Fabrico em central contínua de misturas betuminosas.....	13
2.3	Aplicação de SMA.....	14
2.3.1	Tipos de aplicação.....	14
2.3.2	Dimensões nominais dos agregados utilizados no fabrico das misturas SMA.....	15
2.3.3	Espessura das camadas de SMA.....	17
3	Constituição das misturas SMA	21
3.1	Considerações gerais.....	21
3.2	Os agregados grossos.....	22
3.2.1	Influência dos agregados grossos no comportamento das misturas SMA.....	22
3.2.2	Análise comparativa das propriedades exigidas para os agregados grossos.....	27
3.2.3	Recomendações para as propriedades dos agregados grossos a utilizar em Portugal nas misturas SMA.....	31
3.2.4	Efeito de stone-on-stone no comportamento das misturas SMA.....	33
3.3	O mastique betuminoso – Agregados finos.....	47
3.3.1	Influência dos agregados finos no comportamento das misturas SMA.....	48
3.3.2	Análise comparativa das propriedades exigidas para os agregados finos.....	53
3.3.3	Recomendações para as propriedades dos agregados finos a utilizar em Portugal nas misturas SMA.....	54
3.4	O mastique betuminoso – Filer.....	55
3.4.1	Influência do filer no comportamento das misturas SMA.....	55
3.4.2	Análise comparativa das propriedades exigidas para o filer.....	62
3.4.3	Recomendações para as propriedades do filer a utilizar em Portugal nas misturas SMA.....	63
3.5	O mastique betuminoso – Betume.....	64
3.5.1	Influência do betume no comportamento das misturas SMA.....	64
3.5.2	Análise comparativa das propriedades exigidas para o betume.....	68
3.5.3	Recomendações para as propriedades do betume a utilizar em Portugal nas misturas SMA.....	69
3.6	O mastique betuminoso – Aditivos estabilizantes.....	71

3.6.1	Influência das fibras celulósicas no comportamento do betume	78
3.6.2	Influência das fibras celulósicas no comportamento das misturas SMA	80
3.6.3	Análise comparativa das propriedades exigidas para os aditivos estabilizantes	82
3.6.4	Recomendações para as propriedades exigidas aos aditivos estabilizantes a utilizar em Portugal nas misturas SMA	85
4	Formulação de misturas betuminosas do tipo SMA	87
4.1	Considerações gerais	87
4.2	Método de formulação desenvolvido na Alemanha.....	89
4.3	Método de formulação desenvolvido nos EUA.....	92
4.4	Método de formulação desenvolvido na Holanda	97
4.5	Outros métodos de formulação	100
4.5.1	Método do ponto de dilatação	101
4.5.2	Método do ponto de imbricamento	103
4.5.3	Método de Bailey	105
4.6	Análise comparativa das propriedades exigidas para as misturas SMA	107
4.7	Recomendações para as propriedades exigidas às misturas SMA a utilizar em Portugal ..	110
5	Estudo de procedimentos laboratoriais a adotar para caracterização das misturas SMA (Fase 1).....	111
5.1	Considerações gerais	111
5.2	Materiais estudados	111
5.3	Avaliação do procedimento de fabrico em laboratório	113
5.4	Avaliação da influência da energia de compactação Marshall	117
5.5	Avaliação do escorrimento de material betuminoso	122
5.6	Avaliação da percentagem de betume/ligante betuminoso e granulometria	132
5.7	Avaliação da afinidade entre os agregados e o betume	137
5.8	Conclusões	139
6	Avaliação inicial das misturas SMA (Fase 2).....	143
6.1	Considerações gerais	143
6.2	Materiais e Procedimentos de ensaio	143
6.3	Mistura SMA 11.....	146
6.3.1	Considerações gerais	146
6.3.2	Caracterização dos materiais utilizados.....	146
6.3.3	Estudo de formulação da SMA 11	152
6.4	Mistura SMA 12.O.....	154
6.4.1	Considerações gerais	154
6.4.2	Caracterização dos materiais utilizados.....	160
6.4.3	Estudo de formulação da SMA 12.O.....	167
6.5	Mistura SMA 14-1.O.....	169
6.5.1	Considerações gerais	169
6.5.2	Caracterização dos materiais utilizados.....	170
6.5.3	Estudo de formulação da SMA 14-1.O.....	177
6.6	Mistura SMA 14-2	179
6.6.1	Considerações gerais	179
6.6.2	Caracterização dos materiais utilizados.....	180
6.6.3	Estudo de formulação da SMA 14-2	185
6.7	Avaliação do desempenho	187
6.7.1	Avaliação do escorrimento de material betuminoso.....	187
6.7.2	Avaliação da sensibilidade à água.....	189
6.7.3	Avaliação da resistência à deformação permanente.....	191
6.7.4	Avaliação do módulo de deformabilidade e resistência ao fendilhamento por fadiga ..	193
6.8	Conclusões	196

7	Avaliação do efeito de stone-on-stone (Fase 3)	199
7.1	Materiais e Procedimentos de ensaio	199
7.2	Avaliação do método de compactação das partículas ativas (“agregados grossos”).....	199
7.2.1	Apreciação sucinta dos resultados obtidos	217
7.2.2	Conclusões	224
7.3	Proposta de metodologia para formulação das misturas SMA de forma analítica	225
7.3.1	Avaliação do método de compactação de partículas ativas a incorporar no método proposto para a formulação das misturas SMA de forma analítica	231
7.3.2	Apreciação sucinta dos resultados obtidos	239
7.3.3	Conclusões	243
8	Otimização das misturas SMA (Fase 4)	245
8.1	Materiais e Procedimentos de ensaio	245
8.2	Estudo de formulação das misturas SMA a otimizar	247
8.2.1	Misturas a otimizar do tipo SMA 12	248
8.2.2	Misturas a otimizar do tipo SMA 14	259
8.2.3	Apreciação sucinta dos resultados obtidos	269
8.2.4	Conclusões	273
8.3	Avaliação do desempenho mecânico para desenvolvimento do conceito de mastic-within-stone (mix-skeleton).....	274
8.3.1	Avaliação do escorrimento de material betuminoso.....	274
8.3.2	Avaliação da sensibilidade à água	275
8.3.3	Avaliação da resistência à deformação permanente	277
8.3.4	Avaliação do módulo de deformabilidade e resistência ao fendilhamento por fadiga ..	280
8.3.5	Avaliação da resistência ao envelhecimento	284
8.3.6	Apreciação sucinta dos resultados obtidos	288
8.3.7	Conclusões	298
8.4	Avaliação do desempenho funcional para desenvolvimento do conceito de mastic-within-stone (tire-on-stone).....	300
8.4.1	Avaliação em laboratório	302
8.4.2	Avaliação em obra	310
8.4.3	Apreciação sucinta dos resultados obtidos	315
8.4.4	Conclusões	320
9	Proposta de método de formulação e controlo de qualidade de misturas SMA baseado no conceito de i-performance	321
10	Conclusões Finais	327
10.1	Recomendações	328
10.2	Trabalhos futuros	330
	Referências Bibliográficas	331
	Anexos	349

MISTURAS BETUMINOSAS DE ALTO DESEMPENHO DO TIPO *STONE MASTIC ASPHALT* – FORMULAÇÃO, FABRICO, APLICAÇÃO E DESEMPENHO

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tempo de mistura de uma SMA com fibras celulósicas numa central de misturas betuminosas (adaptado de Drueschner & Schaefer, 2005)	8
Figura 2.2 – Tempo de mistura para fibras celulósicas individuais e aglomeradas sem adição de aglutinantes numa central de misturas betuminosas (adaptado de JRS, Rettenmaier, 2007 e Shünemann, 2007).....	8
Figura 2.3 – Tempo de mistura para fibras celulósicas aglomeradas com adição de aglutinantes numa central de misturas betuminosas (adaptado de JRS, Rettenmaier, 2007 e Schünemann, 2007).....	9
Figura 2.4 – Tempo de mistura para fibras celulósicas aglomeradas com adição de aglutinantes fornecidas em sacos termo fundíveis numa central de misturas betuminosas (adaptado de JRS, Rettenmaier, 2009).....	9
Figura 2.5 – Operador a introduzir um saco termo fundível de fibras celulósicas diretamente no misturador	10
Figura 2.6 – Alimentador automático volumétrico (à esquerda, JRS, Rettenmaier, 2009) ou gravimétrico (à direita, Benninghoven, 2014b).....	11
Figura 2.7 – Esquema de alimentação de fibras com alimentador automático (adaptado de JRS, Rettenmaier, 2009).....	12
Figura 2.8 – Alimentador automático para adição de fibras celulósicas individuais (Benninghoven, 2014c).....	12
Figura 2.9 – Esquema de alimentação de fibras no tambor de uma central contínua de fluxo paralelo (adaptado de JRS, Rettenmaier, 2009).....	13
Figura 2.10 – Esquema de alimentação de fibras no tambor de uma central contínua de fluxo contracorrente (adaptado de JRS, Rettenmaier, 2009).....	13
Figura 2.11 – Esquema de alimentação de fibras com alimentador automático na entrada para adição de mistura betuminosa reciclada (adaptado de JRS, Rettenmaier, 2005).....	14
Figura 2.12 – Quantidade de misturas SMA aplicadas como camada de desgaste a nível mundial... 15	15
Figura 2.13 – Dimensão máxima nominal dos agregados comumente utilizados por continente no fabrico de SMA.....	16
Figura 2.14 – Intervalo de espessuras mínimas definidas para as camadas de desgaste em mistura SMA em função do tipo de mistura SMA.....	18
Figura 2.15 – Número de vezes que a espessura é superior à dimensão máxima do agregado utilizado na mistura SMA em função do tipo de mistura SMA.....	18
Figura 3.1 – Composição de uma mistura betuminosa do tipo SMA.....	21
Figura 3.2 – Composição ponderal tipo e respetivo aspeto do arranjo estrutural dos agregados numa SMA 12 comparativamente a outros tipos de misturas betuminosas habitualmente aplicadas em Portugal.....	21
Figura 3.3 – Divisão entre partículas ativas, partículas passivas e filer	40
Figura 3.4 – Permeabilidade para misturas SMA 4,75 e SMA 9,5 segundo diferentes peneiros de referência (adaptado de Cooley & Brown, 2003)	41

Figura 3.5 – Permeabilidade para misturas SMA 12,5 e SMA 19 segundo diferentes peneiros de referência (adaptado de Cooley & Brown, 2003).....	41
Figura 3.6 – Variação da percentagem de VCA relativamente ao acréscimo na percentagem de material passado no peneiro 4,75 mm função do tipo de compactador utilizado (adaptado de Brown & Haddock, 1997)	44
Figura 3.7 – Análise comparativa da percentagem de agregados partidos em laboratório e em obra (adaptado de West & James, 2005).....	45
Figura 3.8 – Representação esquemática das grandezas VCA_{DRC} , VCA_{MIX} , VMA na composição de uma mistura SMA.....	46
Figura 3.9 – Análise comparativa entre a composição do mastique betuminoso de uma mistura SMA e de diferentes tipos de misturas betuminosas utilizadas em Portugal	48
Figura 3.10 – Variação da porosidade relativamente à variação da percentagem de partículas passivas (< 4,75 mm) na mistura SMA (adaptado de Brown, 1992)	49
Figura 3.11 – Variação do volume de vazios na mistura de agregados relativamente à variação da percentagem de partículas passivas na mistura SMA (adaptado de Brown, 1992)	50
Figura 3.12 – Aspeto dos conjuntos betume-fíler avaliados (adaptado de Bryant, 2005).....	56
Figura 3.13 – Variação da viscosidade do conjunto betume-fíler relativamente ao rácio fíler/betume (adaptado de Austroads, 2013)	57
Figura 3.14 – Representação esquemática do conceito de betume livre no fíler	60
Figura 3.15 – Variação da viscosidade do conjunto betume-fíler relativamente à fração de betume fixo (adaptado de Austroads, 2013)	61
Figura 3.16 – Equipamento e espalhamento de agregados de pequena dimensão (Drueschner & Schaefer, 2005).....	65
Figura 3.17 – Aspeto antes (à esquerda) e após espalhamento de agregados de pequena dimensão (à direita, Drueschner, 2006)	66
Figura 3.18 – Resultados dos ensaios para avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga de uma SMA 8 com 6,6 % de betume (adaptado de Mollenhauer, 2007)	67
Figura 3.19 – Escorrimento de material betuminoso (à esquerda, JRS, Rettenmaier, 2007) e exsudação (à direita, JRS, Rettenmaier, 2005a).....	71
Figura 3.20 – Morfologia das fibras celulósicas e minerais (adaptado de Ye & Wu, 2009)	73
Figura 3.21 – Aspeto das fibras celulósicas individuais (Fiberand, 2014)	75
Figura 3.22 – Aspeto das fibras celulósicas aglomeradas sem adição de aglutinantes (Racanel & Burlacu, 2013)	76
Figura 3.23 – Aspeto de fibras celulósicas aglomeradas com adição de betume e/ou de aditivos	76
Figura 3.24 – Materiais utilizados no fabrico de aglomerados de fibras celulósicas com adição de óleo ou polímeros (adaptado de JRS, Rettenmaier, 2014)	77
Figura 3.25 – Materiais utilizados no fabrico de aglomerados de fibras celulósicas com adição de cera (adaptado de JRS, Rettenmaier, 2014a).....	77
Figura 3.26 – Variação da viscosidade e rigidez do betume em função da percentagem de fibras (adaptado de Akbulut, 1999)	79
Figura 4.1 – Relação entre a percentagem de agregados grossos e a porosidade calculada e avaliada em misturas SMA (adaptado de van de Ven et al., 2003).....	89
Figura 4.2 – Avaliação do ponto de dilatação baseado na variação da altura do provete em função da percentagem de partículas passivas utilizada (adaptado de Austroads, 2009).....	102
Figura 4.3 – Avaliação do ponto de dilatação baseado na variação do módulo de deformabilidade do provete em função da percentagem de partículas passivas utilizada (adaptado de Austroads, 2009)	102
Figura 4.4 – Variação da altura de um provete para cada giro quando compactado com um compactador giratório (adaptado de Austroads, 2009)	104
Figura 4.5 – Representação esquemática do conceito 3-2-2 para avaliação do ponto de imbricamento (adaptado de Austroads, 2009).....	104

Figura 4.6 – Seleção do nível de compactidade pretendida função do tipo de mistura betuminosa a fabricar (adaptado de Vavrik et al., 2002)	106
Figura 5.1 – Curvas granulométricas definidas para cada mistura do tipo SMA 12	113
Figura 5.2 – Curvas granulométricas definidas para cada mistura do tipo SMA 14	113
Figura 5.3 – Disposição dos materiais a utilizar no fabrico das misturas SMA considerando o aquecimento das fibras de acordo com o fabricante	114
Figura 5.4 – Mistura do conjunto aquecido de agregados/fíler e fibras no recipiente da misturadora (à esquerda) e adição de betume (à direita).....	115
Figura 5.5 – Adição das fibras à temperatura ambiente à mistura betuminosa após “amassadura” durante um minuto	115
Figura 5.6 – Provetes com aglomerados de fibras não dispersos na mistura SMA	116
Figura 5.7 – Representação gráfica dos resultados do estudo Marshall para os provetes da SMA 12.O compactados com 50 e 75 pancadas	119
Figura 5.8 – Representação gráfica dos resultados do estudo Marshall para os provetes da SMA 12.O compactados com 50 e 75 pancadas considerando a mesma baridade máxima teórica	121
Figura 5.9 – Percentagem de material escorrido em função da percentagem de fibras celulósicas utilizada (SMA 12.O)	128
Figura 5.10 – Percentagem de material escorrido em função da percentagem de fibras celulósicas utilizada (SMA 14-2)	128
Figura 5.11 – Percentagem de material escorrido em função da percentagem de fibras celulósicas utilizada segundo o método do copo	129
Figura 5.12 – Inibição do escorrimento nas misturas SMA com fibras celulósicas segundo o método do copo	130
Figura 5.13 – Percentagem mínima de fibras celulósicas a utilizar para se assegurar um $D \leq 0,2\%$ e $D \leq 0,3\%$	131
Figura 5.14 – Exemplos do aspeto das fibras celulósicas após extração do betume por centrifugação	134
Figura 5.15 – Curvas granulométricas das amostras de mistura SMA 12.O recolhida na pavimentadora e no trecho experimental e respetivo fuso granulométrico especificado	135
Figura 5.16 – Curvas granulométricas da amostra de mistura SMA 14-1.O recolhida na TEXSA e respetivo fuso granulométrico especificado	137
Figura 5.17 – Aspeto dos agregados revestidos com betume com e sem fibras celulósicas (0% e 1% de fibras celulósicas).....	138
Figura 5.18 – Resultados da afinidade entre os agregados e o betume (com 0% e 1% de fibras celulósicas)	138
Figura 6.1 – Pormenor dos aglomerados de fibras celulósicas com adição de betume (Viatop® Premium) utilizadas no fabrico das SMA.....	143
Figura 6.2 – Equipamento de ensaio de simulação para avaliação da deformação permanente e aspeto das lajetas durante o ensaio.....	144
Figura 6.3 – Curvas granulométricas das frações de agregados e do fíler utilizados no fabrico da mistura SMA 11.....	147
Figura 6.4 – Fusos granulométricos analisados para a mistura SMA 11, e limites gerais do fuso granulométrico de misturas SMA com $D = 11\text{ mm}$ (EN 13108-5).....	149
Figura 6.5 – Fuso e curva granulométrica da mistura de agregados utilizados no fabrico da SMA 11	150
Figura 6.6 – Representação gráfica dos resultados do estudo Marshall para os provetes da SMA 11 compactados com 50 pancadas.....	153
Figura 6.7 – Fases de intervenção na Avenida do Brasil	155
Figura 6.8 – Vista geral da central descontínua utilizada no fabrico da mistura SMA 12 com fibras celulósicas.....	156

Figura 6.9 – Localização e vista geral do trecho experimental realizado no LNEC com a mistura SMA 12 com fibras celulósicas.....	157
Figura 6.10 – Zona do trecho experimental sem aplicação de rega de colagem	157
Figura 6.11 – Aplicação e compactação da mistura SMA 12 com fibras celulósicas na Avenida do Brasil	158
Figura 6.12 – Amostras de mistura SMA 12 com fibras celulósicas recolhidas na Avenida do Brasil	159
Figura 6.13 – Amostras recolhidas no trecho experimental.....	160
Figura 6.14 – Curvas granulométricas das frações de agregados e do fíler utilizados no fabrico da mistura SMA 12.O	161
Figura 6.15 – Fusos granulométricos analisados para a mistura SMA 12, e limites gerais do fuso granulométrico de misturas SMA com D = 10 mm e D = 12 mm (EN 13108-5)	163
Figura 6.16 – Fuso e curva granulométrica da mistura de agregados utilizados no fabrico da SMA 12.O.....	164
Figura 6.17 – Representação gráfica dos resultados do estudo Marshall para os provetes da SMA 12.O compactados com 50 pancadas	168
Figura 6.18 – Arruamentos e parque de estacionamento da fábrica da TEXSA e respetivos trabalhos de pavimentação (Martinho et al., 2013)	169
Figura 6.19 – Curvas granulométricas das frações de agregados e do fíler utilizados no fabrico da mistura SMA 14-1.O.....	171
Figura 6.20 – Fusos granulométricos analisados para a mistura SMA 14-1, e limites gerais do fuso granulométrico de misturas SMA com D = 14 mm (EN 13108-5).....	173
Figura 6.21 – Fuso e curva granulométrica da mistura de agregados utilizados no fabrico da SMA 14-1.O.....	174
Figura 6.22 – Representação gráfica dos resultados do estudo Marshall para os provetes da SMA 14-1.O compactados com 50 pancadas	178
Figura 6.23 – Curvas granulométricas das frações de agregados e do fíler utilizados no fabrico da mistura SMA 14-2.....	181
Figura 6.24 – Fusos granulométricos analisados para a mistura SMA 14-2, e limites gerais do fuso granulométrico de misturas SMA com D = 14 mm (EN 13108-5).....	181
Figura 6.25 – Fuso e curva granulométrica da mistura de agregados utilizados no fabrico da SMA 14-2	182
Figura 6.26 – Representação gráfica dos resultados do estudo Marshall para os provetes da SMA 14-2 compactados com 50 pancadas.....	186
Figura 6.27 – Compilação dos resultados da sensibilidade à água segundo a norma EN 12697-12.....	190
Figura 6.28 – Compilação dos resultados da sensibilidade à água segundo a norma MIL-STD-620A	190
Figura 6.29 – Compilação das curvas obtidas para a resistência à deformação permanente segundo a norma EN 12697-22	192
Figura 6.30 – Evolução do módulo de deformabilidade para diferentes frequências (misturas SMA 11, SMA 12.O e SMA 14-1.O e mistura de controlo AC14).....	194
Figura 6.31 – Leis de fadiga das misturas SMA 11, SMA 12.O e SMA 14-1.O, mistura de controlo (AC 14) e MBR-BBA.....	195
Figura 6.32 – Variação da extensão de tração para um milhão de aplicações de carga em função da porosidade.....	196
Figura 7.1 – Nivelamento dos agregados no recipiente	204
Figura 7.2 – Volume de vazios dos agregados sem compactação (SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2)	206
Figura 7.3 – Preenchimento do recipiente no método de compactação com varão	208

Figura 7.4 – Volume de vazios dos agregados compactados com varão (SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2).....	209
Figura 7.5 – Aspeto do pilão desenvolvido e fabricado para simular o varão utilizado no método de compactação com varão	211
Figura 7.6 – Volume de vazios dos agregados com compactação com o compactador Proctor para o peneiro de referência 4 mm (SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2).....	212
Figura 7.7 – Sequência de preenchimento do recipiente no método de compactação com o roller compactador	215
Figura 7.8 – Volume de vazios dos agregados com compactação com o roller compactador para o peneiro de referência 4 mm (SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2).....	216
Figura 7.9 – Compilação dos resultados dos ensaios de avaliação do volume de vazios para os granodioritos (SMA 12.O) por fração/peneiro de referência utilizado para cada método de compactação.....	217
Figura 7.10 – Compilação dos resultados dos ensaios de avaliação do volume de vazios para os agregados utilizados nas SMA por método de compactação (≥ 4 mm)	218
Figura 7.11 – Compilação dos resultados dos ensaios de avaliação da quebra dos agregados utilizados nas misturas SMA por método de compactação	220
Figura 7.12 – Relação entre o volume de vazios e a relação entre a baridade após compactação relativamente à baridade sem compactação.....	223
Figura 7.13 – Composição volumétrica de uma mistura SMA compactada	226
Figura 7.14 – Exemplo da estrutura e composição de uma mistura SMA após compactada num recipiente/molde.....	227
Figura 7.15 – Análise comparativa entre a porosidade obtida no estudo de formulação e nos diferentes métodos de compactação de partículas ativas (SMA 11).....	233
Figura 7.16 – Análise comparativa entre a porosidade obtida no estudo de formulação e nos diferentes métodos de compactação de partículas ativas (SMA 12.O).....	235
Figura 7.17 – Análise comparativa entre a porosidade obtida no estudo de formulação e nos diferentes métodos de compactação de partículas ativas (SMA 14-1.O).....	237
Figura 7.18 – Análise comparativa entre a porosidade obtida no estudo de formulação e nos diferentes métodos de compactação de partículas ativas (SMA 14-2)	239
Figura 7.19 – Diferença entre a porosidade obtida no estudo de formulação e nos métodos de compactação de partículas ativas (0 % e 100 % de absorção de betume).....	240
Figura 7.20 – Percentagem de partículas ativas relativamente à baridade requerida para obter a porosidade dos provetes compactados em laboratório com a percentagem ótima de betume ..	240
Figura 7.21 – Diferença entre a porosidade obtida no estudo de formulação e nos métodos de compactação de partículas ativas mais representativos (0% de absorção de betume)	241
Figura 7.22 – Diferença entre a porosidade obtida no estudo de formulação e nos métodos de compactação de partículas ativas mais representativos (100% de absorção de betume)	241
Figura 7.23 – Análise comparativa entre a porosidade (0 % de absorção de betume) obtida no estudo de formulação e nos métodos de compactação de partículas ativas mais representativos (SMA 11, SMA 14-1.O e SMA 14-2)	242
Figura 8.1 – Curvas granulométricas definidas para cada mistura do tipo SMA 12	249
Figura 8.2 – Comparação entre os resultados da metodologia analítica e do estudo Marshall para os provetes da SMA 12.A compactados com 50 pancadas (0% de absorção de betume)	252
Figura 8.3 – Comparação entre os resultados da metodologia analítica e do estudo Marshall para os provetes da SMA 12.B compactados com 50 pancadas (0% de absorção de betume)	254
Figura 8.4 – Comparação entre os resultados da metodologia analítica e do estudo Marshall para os provetes da SMA 12.C compactados com 50 pancadas (0% de absorção de betume).....	256
Figura 8.5 – Curvas granulométricas definidas para cada mistura do tipo SMA 14 (SMA 14-1).....	260
Figura 8.6 – Comparação entre os resultados da metodologia analítica e do estudo Marshall para os provetes da SMA 14-1.D compactados com 50 pancadas (0% de absorção de betume).....	263

Figura 8.7 – Comparação entre os resultados da metodologia analítica e do estudo Marshall para os provetes da SMA 14-1.E compactados com 50 pancadas (0% de absorção de betume)	266
Figura 8.8 – Análise comparativa entre a porosidade obtida no estudo de formulação das misturas SMA “otimizadas” e nos métodos de compactação de partículas ativas.....	269
Figura 8.9 – Diferença entre o volume de vazios obtido no estudo de formulação das SMA “otimizadas” e nos métodos de compactação de partículas ativas (0% de absorção de betume)	270
Figura 8.10 – Diferença entre o volume de vazios obtido no estudo de formulação das SMA “otimizadas” e nos métodos de compactação de partículas ativas (100% de absorção de betume)	271
Figura 8.11 – Resultados da sensibilidade à água da SMA 12.O, SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.O e SMA 14-1.E e mistura de controlo segundo o método EN 12697-12	277
Figura 8.12 – Evolução da deformação permanente das misturas SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 12.O e da mistura de controlo	279
Figura 8.13 – Evolução da deformação permanente das misturas SMA 14-1.D, SMA 14-1.E, SMA 14-1.O, SMA14-1.PR, SMA 14-2 e da mistura de controlo (AC 14)	279
Figura 8.14 – Evolução do módulo de deformabilidade para diferentes frequências (misturas SMA 12.O, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.O, SMA 14-1.E e mistura de controlo AC 14)	282
Figura 8.15 – Leis de fadiga das misturas SMA 12.O, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.O, SMA 14-1.E, mistura de controlo AC14 e MBR-BBA	283
Figura 8.16 – Evolução do módulo de deformabilidade para diferentes frequências (misturas SMA 12.O, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.O, SMA 14-1.E e mistura de controlo AC14)	286
Figura 8.17 – Leis de fadiga das misturas SMA 12.O, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.O e SMA 14-1.E, mistura de controlo (AC 14)	287
Figura 8.18 – Compilação global dos resultados da sensibilidade à água segundo a norma EN 12697-12	288
Figura 8.19 – Relação entre a sensibilidade à água e a percentagem de partículas ativas	289
Figura 8.20 – Relação entre a sensibilidade à água e a percentagem de partículas passivas de dimensão entre 0,063 mm e 4 mm.....	289
Figura 8.21 – Relação entre a sensibilidade à água e a percentagem de fíler	290
Figura 8.22 – Relação entre a sensibilidade à água e a percentagem de betume	290
Figura 8.23 – Compilação global das curvas obtidas para a resistência à deformação permanente segundo a norma EN 12697-22	292
Figura 8.24 – Relação entre a profundidade de rodeira a 10000 ciclos (RD_{AIR}) e o rácio entre a espessura da película de betume e a porosidade	293
Figura 8.25 – Relação entre a taxa de deformação (WTS_{AIR}) e o rácio entre a espessura da película de betume e a porosidade	293
Figura 8.26 – Relação entre a percentagem de profundidade de rodeira a 10000 ciclos (PRD_{AIR}) e o rácio entre a espessura da película de betume e a porosidade	294
Figura 8.27 – Relação entre a extensão de tração (ϵ_6) e o rácio entre a espessura da película de betume e a porosidade.....	296
Figura 8.28 – Relação entre a extensão de tração (ϵ_6) e a porosidade	296
Figura 8.29 – Relação entre a extensão de tração (ϵ_6) e o módulo de deformabilidade médio	297
Figura 8.30 – Localização da seção teste da Avenida do Brasil	301
Figura 8.31 – Equipamento de jato de areia utilizado para remover a película de betume que envolve os agregados na superfície das lajetas.....	303
Figura 8.32 – Aspeto final das lajetas após remoção da película de betume que envolve os agregados na superfície das lajetas.....	303
Figura 8.33 – Relação entre a profundidade média da textura e o coeficiente de atrito inicial (sem remoção da película de betume)	308

Figura 8.34 – Relação entre a profundidade média da textura e o coeficiente de atrito intermédio (após remoção da película de betume)	309
Figura 8.35 – Relação entre o coeficiente de atrito inicial e intermédio	309
Figura 8.36 – Coeficiente de atrito na seção teste da Avenida do Brasil (ano de 2011, 2012)	311
Figura 8.37 – Valores médios para o coeficiente de atrito na seção teste da Avenida do Brasil (ano de 2011, 2012)	311
Figura 8.38 – Profundidade média da textura na seção teste da Avenida do Brasil (ano de 2012 e 2013)	312
Figura 8.39 – Relação entre a profundidade média da textura e o coeficiente de atrito (ano de 2012)	313
Figura 8.40 – Localização esquemática dos pontos para avaliação do coeficiente de atrito e profundidade média da textura no trecho experimental no LNEC	314
Figura 8.41 – Relação entre a profundidade média da textura e o coeficiente de atrito	315
Figura 8.42 – Relação entre a profundidade média da textura e a percentagem de partículas ativas	316
Figura 8.43 – Relação entre a profundidade média da textura e a percentagem de partículas passivas de dimensão entre 0,063 mm e 4 mm	316
Figura 8.44 – Relação entre a profundidade média da textura e a percentagem de fíler	316
Figura 8.45 – Relação entre a profundidade média da textura e a percentagem de betume	317
Figura 8.46 – Relação entre o coeficiente de atrito e a percentagem de partículas ativas	317
Figura 8.47 – Relação entre o coeficiente de atrito e a percentagem de partículas passivas de dimensão entre 0,063 mm e 4 mm	318
Figura 8.48 – Relação entre o coeficiente de atrito e a percentagem de fíler	318
Figura 8.49 – Relação entre o coeficiente de atrito e a percentagem de betume	318
Figura 8.50 – Evolução teórica do coeficiente de atrito (fase inicial, intermédia e “final” coeficiente de polimento acelerado)	319
Figura 9.1 – Método de formulação e de controlo de qualidade de uma i-SMA	325

MISTURAS BETUMINOSAS DE ALTO DESEMPENHO DO TIPO *STONE MASTIC ASPHALT* – FORMULAÇÃO, FABRICO, APLICAÇÃO E DESEMPENHO

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Recomendação para as espessuras mínimas a utilizar em Portugal para as misturas SMA.....	19
Quadro 3.1 – Resumo das propriedades dos agregados grossos recomendadas internacionalmente com influência no comportamento das misturas SMA	29
Quadro 3.2 – Propriedades dos agregados grossos existentes em Portugal Continental e Regiões Autónomas (adaptado de Castelo-Branco & Ferreira, 2009)	30
Quadro 3.3 – Recomendações para as propriedades dos agregados grossos a utilizar no fabrico de misturas SMA em Portugal.....	32
Quadro 3.4 – Peneiro de controlo primário (Vavrik et al., 2002)	34
Quadro 3.5 – Peneiro de referência para definição das partículas ativas (NAPA, 1999)	36
Quadro 3.6 – Composição ponderal das misturas SMA 8, SMA 10, SMA 11, SMA 12 e SMA 14.....	38
Quadro 3.7 – Fusos granulométricos recomendados nos EUA para as misturas SMA (AASHTO M325, 2012)	39
Quadro 3.8 – Análise comparativa da percentagem de agregados partidos em laboratório e em obra (adaptado de Brown & Cooley, 1999)	46
Quadro 3.9 – Influência da percentagem de partículas passivas na resistência à deformação permanente das misturas SMA (adaptado de Austroads, 2013).....	51
Quadro 3.10 – Resumo das propriedades dos agregados finos recomendadas internacionalmente com influência no comportamento das misturas SMA	53
Quadro 3.11 – Recomendações para as propriedades dos agregados finos a utilizar no fabrico de misturas SMA em Portugal.....	54
Quadro 3.12 – Resumo das propriedades do fíler recomendadas internacionalmente com influência no comportamento das misturas SMA	62
Quadro 3.13 – Recomendações para as propriedades do fíler a utilizar no fabrico de misturas SMA em Portugal	63
Quadro 3.14 – Resumo das propriedades do betume recomendadas internacionalmente com influência no comportamento das misturas SMA	68
Quadro 3.15 – Recomendações para as propriedades dos betumes a utilizar no fabrico de misturas SMA em Portugal de acordo com o CETO (2009).....	70
Quadro 3.16 – Fatores com influência no escorrimento de material betuminoso (Blazejowski, 2011).....	81
Quadro 3.17 – Requisitos recomendados internacionalmente para os aditivos estabilizantes a utilizar no fabrico de misturas SMA	82
Quadro 3.18 – Granulometria das fibras celulósicas a utilizar no fabrico de misturas SMA recomendada nos EUA	84
Quadro 3.19 – Granulometria das fibras minerais a utilizar no fabrico de misturas SMA recomendada nos EUA	84
Quadro 3.20 – Recomendações para as fibras celulósicas a utilizar no fabrico de misturas SMA em Portugal.....	85

Quadro 4.1 – Análise comparativa dos dois métodos para avaliação do ponto de dilatação (adaptado de Austroads, 2009)	103
Quadro 4.2 – Intervalo dos valores recomendados para o rácio de agregados grossos (CA), da fração intermédia (FA _c), dos agregados finos (FA _f) (Vavrik et al., 2002)	106
Quadro 4.3 – Propriedades recomendadas para as misturas SMA formuladas em laboratório	107
Quadro 4.4 – Recomendações para as propriedades das misturas SMA a utilizar em Portugal	110
Quadro 5.1 – Fórmulas de trabalho definidas para as misturas SMA estudadas na primeira fase do estudo experimental	112
Quadro 5.2 – Resultados do ensaio Marshall e características volumétricas dos provetes (SMA 12.O) para os métodos de adição de fibras celulósicas a quente e a frio	116
Quadro 5.3 – Resultados do estudo Marshall para os provetes da SMA 12.O compactados com 50 e 75 pancadas	118
Quadro 5.4 – Resultados do estudo Marshall para os provetes da SMA 12.O compactados com 50 e 75 pancadas considerando a mesma baridade máxima teórica	120
Quadro 5.5 – Análise comparativa dos métodos de ensaio preconizados na norma EN 12697-18 para avaliação do escorrimento de material betuminoso	123
Quadro 5.6 – Misturas SMA utilizadas no presente estudo experimental e tipo de avaliação realizada	125
Quadro 5.7 – Resultados do escorrimento de material betuminoso (misturas do tipo SMA 12 e SMA 14)	127
Quadro 5.8 – Resultados da percentagem de betume/ligante betuminoso das amostras (SMA 12.O e SMA 14-1.O)	133
Quadro 5.9 – Composição granulométrica das amostras de mistura SMA 12.O e respetivo fuso e curva granulométrica especificados no estudo de formulação	135
Quadro 5.10 – Composição granulométrica da amostra de mistura SMA 14-1.O e respetivo fuso e curva granulométrica especificados no estudo de formulação	136
Quadro 6.1 – Misturas SMA utilizadas na segunda fase do estudo experimental e respetivo tipo de avaliação realizada	144
Quadro 6.2 – Granulometria das frações de agregados e filer utilizados no fabrico da mistura SMA 11	147
Quadro 6.3– Requisitos para os limites gerais do fuso granulométrico de misturas SMA com D = 11 mm (EN 13108-5)	148
Quadro 6.4– Requisitos para a gama de variação do fuso granulométrico de misturas SMA com D = 11 mm (EN 13108-5)	148
Quadro 6.5 – Fuso e curva granulométrica da mistura de agregados definidos no fabrico da SMA 11	149
Quadro 6.6 – Categorias admissíveis recomendadas para as propriedades dos agregados a utilizar nas misturas SMA D ≥ 8 mm e respetivas características dos agregados utilizados na SMA 11	150
Quadro 6.7 – Propriedades declaradas da amostra de betume utilizado na SMA 11	151
Quadro 6.8 – Resultados do estudo Marshall para os provetes da SMA 11 compactados com 50 pancadas	152
Quadro 6.9 – Granulometria das frações de agregados e filer utilizados no fabrico da mistura SMA 12.O	161
Quadro 6.10 – Requisitos para os limites gerais do fuso granulométrico de misturas SMA com D = 10 mm e D = 12 mm (EN 13108-5)	162
Quadro 6.11 – Requisitos para a gama de variação do fuso granulométrico de misturas SMA com D = 10 mm e D = 12 mm (EN 13108-5)	162
Quadro 6.12 – Fuso e curva granulométrica da mistura de agregados definidos no fabrico da SMA 12.O	164

Quadro 6.13 – Categorias admissíveis recomendadas para as propriedades dos agregados a utilizar nas misturas SMA com $D \geq 8$ mm e respetivas características dos agregados utilizados na SMA 12.O.....	165
Quadro 6.14 – Propriedades da amostra de betume utilizado na SMA 12.O.....	166
Quadro 6.15 – Resultados do estudo Marshall para os provetes da SMA 12.O compactados com 50 pancadas.....	167
Quadro 6.16 – Granulometria das frações de agregados e fíler utilizados no fabrico da mistura SMA 14-1.O	171
Quadro 6.17– Requisitos para os limites gerais do fuso granulométrico de misturas SMA com $D = 14$ mm (EN 13108-5).....	172
Quadro 6.18– Requisitos para a gama de variação do fuso granulométrico de misturas SMA com $D = 14$ mm (EN 13108-5)	173
Quadro 6.19 – Fuso e curva granulométrica da mistura de agregados utilizados no fabrico da SMA 14-1.O	174
Quadro 6.20 – Categorias admissíveis recomendadas para as propriedades dos agregados a utilizar nas misturas SMA com $D \geq 8$ mm SMA 14-1.O.....	175
Quadro 6.21 – Propriedades da amostra de betume utilizado na SMA 14-1.O.....	176
Quadro 6.22 – Resultados do estudo Marshall para os provetes da SMA 14-1.O compactados com 50 pancadas.....	177
Quadro 6.23 – Granulometria das frações de agregados e fíler utilizados no fabrico da mistura SMA 14-2	180
Quadro 6.24– Fuso e curva granulométrica da mistura de agregados utilizados no fabrico da SMA 14-2	182
Quadro 6.25 – Categorias admissíveis recomendadas para as propriedades dos agregados a utilizar nas misturas SMA com $D \geq 8$ mm e respetivas características dos agregados utilizados na SMA 14-2	183
Quadro 6.26 – Propriedades da amostra de betume utilizado na SMA 14-2	184
Quadro 6.27 – Resultados do estudo Marshall para os provetes da SMA 14-2 compactados com 50 pancadas.....	185
Quadro 6.28 – Temperatura de ensaio na avaliação do escorrimento de material betuminoso (SMA 11, SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2).....	188
Quadro 6.29 – Compilação dos resultados dos ensaios de avaliação do escorrimento de material betuminoso e percentagem mínima de fibras celulósicas a adotar.....	188
Quadro 6.30 – Misturas SMA utilizadas para avaliação da sensibilidade à água (Fase 2 do estudo experimental)	189
Quadro 6.31 – Compilação dos resultados dos ensaios da resistência à deformação permanente segundo a norma EN 12697-22	192
Quadro 6.32 – Compilação dos resultados dos ensaios da resistência ao fendilhamento por fadiga e do módulo de deformabilidade segundo a norma EN 12697-24 e EN 12697-26	194
Quadro 7.1 – Agregados das SMA utilizados na terceira fase do estudo experimental e tipo de avaliação realizada	199
Quadro 7.2 – Peneiros série “base+1” ou série “base+2” segundo a norma EN 13108-5.....	200
Quadro 7.3 – Peneiros de referência adotados internacionalmente comparativamente a peneiros série “base+1” ou série “base+2” segundo a norma EN 13108-5	201
Quadro 7.4 – Proposta de peneiros de referência para definição das partículas ativas.....	201
Quadro 7.5 – Métodos de compactação e materiais utilizados para avaliar a baridade e o volume de vazios nos agregados/partículas ativas.....	202
Quadro 7.6 – Resultados da avaliação da baridade e volume de vazios sem compactação segundo o método indicado na NP EN 1097-3	205
Quadro 7.7 – Capacidade dos recipientes consoante a norma utilizada (NP EN 1097-3, AASHTO T19 e ASTM C29).....	207

Quadro 7.8 – Resultados da avaliação da baridade e volume de vazios (compactação com o varão segundo o método adaptado à NP EN 1097-3).....	209
Quadro 7.9 – Resultados da avaliação da baridade e volume de vazios (compactação com o compactador Proctor segundo o método adaptado à NP EN 1097-3)	212
Quadro 7.10 – Resultados da avaliação da baridade e volume de vazios (compactação com o compactador roller compactor).....	216
Quadro 7.11 – Compilação dos resultados obtidos para o volume de vazios e acréscimo na percentagem de partículas passadas no peneiro 4 mm.....	219
Quadro 7.12 – Análise comparativa entre os agregados avaliados (misturas SMA de laboratório e recolhidas na obra) e o acréscimo de partículas no peneiro de referência	221
Quadro 7.13 – Compilação dos resultados obtidos para as baridades com e sem compactação e seu rácio.....	222
Quadro 7.14 – Análise comparativa das características volumétricas dos provetes compactados em laboratório e da metodologia analítica proposta (SMA 11) [0 %;100 % - absorção de betume]	232
Quadro 7.15 – Análise comparativa das características volumétricas dos provetes compactados em laboratório e da metodologia analítica proposta (SMA 12.O) [0 %;100 % - absorção de betume]	234
Quadro 7.16 – Análise comparativa das características volumétricas dos provetes compactados em laboratório e da metodologia analítica proposta (SMA 14-1.O) [0 %;100 % - absorção de betume]	236
Quadro 7.17 – Análise comparativa das características volumétricas dos provetes compactados em laboratório e da metodologia analítica proposta (SMA 14-2) [0 %;100 % - absorção de betume]	238
Quadro 8.1 – Misturas SMA utilizadas na quarta fase do estudo experimental e tipo de avaliação realizada.....	247
Quadro 8.2 – Baridades das partículas ativas utilizadas na otimização das misturas do tipo SMA 12	248
Quadro 8.3 – Requisitos para os limites gerais do fuso granulométrico (EN 13108-5)	248
Quadro 8.4 – Fórmulas de trabalho definidas para as misturas do tipo SMA 12.....	249
Quadro 8.5 – Características volumétricas estimadas para os provetes compactados em laboratório segundo a metodologia analítica proposta (SMA 12) [0 %;100 % - absorção de betume]	250
Quadro 8.6 – Resultados do estudo Marshall para os provetes da SMA 12.A compactados com 50 pancadas	251
Quadro 8.7 – Resultados do estudo Marshall para os provetes da SMA 12.B compactados com 50 pancadas	253
Quadro 8.8 – Resultados do estudo Marshall para os provetes da SMA 12.C compactados com 50 pancadas	255
Quadro 8.9 – Aspeto geral da superfície dos provetes compactados em laboratório com o compactador Marshall (SMA 12.O, SMA 12.A, SMA 12.B SMA 12.C).....	258
Quadro 8.10 – Baridades das partículas ativas utilizadas na otimização das misturas do tipo SMA 14	259
Quadro 8.11 – Requisitos para os limites gerais do fuso granulométrico (EN 13108-5)	259
Quadro 8.12 – Fórmulas de trabalho definidas para as misturas SMA 14-1	260
Quadro 8.13 – Características volumétricas estimadas para os provetes compactados em laboratório segundo a metodologia analítica proposta (SMA 14-1) [0 %;100 % - absorção de betume]	261
Quadro 8.14 – Resultados do estudo Marshall para os provetes da SMA 14-1.D compactados com 50 pancadas	262

Quadro 8.15 – Resultados do estudo Marshall para os provetes da SMA 14-1.E compactados com 50 pancadas.....	265
Quadro 8.16 – Aspeto geral da superfície dos provetes compactados em laboratório com o compactador Marshall (SMA 14-1.O, SMA 14-1.D, SMA 14-1.E)	268
Quadro 8.17 – Resultados da avaliação do efeito de stone-on-stone e do conceito de free binder para as misturas SMA estudadas [0 %;100 % - absorção de betume]	272
Quadro 8.18 – Resultados da avaliação do escoamento da SMA 12.B, SMA 12.C e SMA 14-1.E segundo o método do copo indicado na EN 12697-18	275
Quadro 8.19 – Resumo dos resultados da avaliação da sensibilidade à água obtidos para as misturas SMA (SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.E) comparativamente à SMA 12.O e SMA 14-1.O segundo a EN 12697-12	276
Quadro 8.20 – Resultados da avaliação da resistência à deformação permanente obtidos para as misturas SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.D e SMA 14-1.E.....	278
Quadro 8.21 – Resultados do módulo de deformabilidade e vida à fadiga para as vigas ensaiadas à flexão (SMA 12.B, SMA 12.C e SMA 14-1.E)	281
Quadro 8.22 – Resultados do módulo de deformabilidade e vida à fadiga para as vigas envelhecidas ensaiadas à flexão (SMA 12.O, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.O e SMA 14-1.E).....	285
Quadro 8.23 – Compilação global dos resultados da avaliação da resistência à deformação permanente segundo a norma EN 12697-22	291
Quadro 8.24 – Compilação global dos resultados da avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga e do módulo de deformabilidade segundo a norma EN 12697-24 e EN 12697-26 ...	295
Quadro 8.25 – Misturas SMA utilizadas para avaliação do desempenho funcional	302
Quadro 8.26 – Resultados do coeficiente de atrito inicial e da profundidade média da textura avaliada em laboratório (SMA 11 e SMA 12.O)	304
Quadro 8.27 – Resultados do coeficiente de atrito inicial e da profundidade média da textura avaliada em laboratório (SMA 12.A e SMA 12.B)	305
Quadro 8.28 – Resultados do coeficiente de atrito inicial e da profundidade média da textura avaliada em laboratório (SMA 12.C e SMA 14-1.O).....	306
Quadro 8.29 – Resultados do coeficiente de atrito inicial e da profundidade média da textura avaliada em laboratório (SMA 14-1.D e SMA 14-1.E).....	307
Quadro 8.30 – Ensaio realizados em obra na quarta fase do estudo experimental e respetiva data de ensaio.....	310
Quadro 8.31 – Análise comparativa da profundidade média da textura com o coeficiente de atrito obtidos na seção teste da Avenida do Brasil (ano de 2012)	312
Quadro 8.32 – Resultados do IRI e da ETD na seção teste da Avenida do Brasil (ano de 2013) para a rodeira direita	313
Quadro 8.33 – Resultados do coeficiente de atrito e da profundidade média da textura avaliados no trecho experimental.....	314

MISTURAS BETUMINOSAS DE ALTO DESEMPENHO DO TIPO *STONE MASTIC ASPHALT* – FORMULAÇÃO, FABRICO, APLICAÇÃO E DESEMPENHO

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Alfabeto Latino

Símbolo/Sigla Significado

A	Absorção de betume
a	Constante, determinada experimentalmente
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AC	Asphalt Concrete
ADT	Average daily traffic
AIPCR	Association Internationale Permanente des Congrès de la route
ARRB	Australian Road Research Board
ASTM	American Society For Testing and Materials
AustRoads	Association of Australian and New Zealand road transport and traffic authorities
b	Constante, determinada experimentalmente
BB	Betão betuminoso
BBA	Betume modificado com alta percentagem de borracha reciclada de pneus
BBr	Betão betuminoso rugoso
C	Percentagem de material britado
c	Comprimento das fibras celulósicas
CA	Rácio da fração das partículas ativas
CA _i	Coeficiente de atrito inicial
CAPA	Colorado Asphalt Pavement Association
CETO	Caderno de Encargos Tipo Obra
CO ₂	Dióxido de carbono
D	Dimensão máxima nominal do agregado ou escorrimento, em percentagem
D ₁₀	Dimensão da malha do peneiro em que passa 10 % do filer
D ₆₀	Dimensão da malha do peneiro em que passa 60 % do filer
D _i	Material escorrido no copo sem utilização de aditivos estabilizantes na SMA
D _n	Material escorrido no copo para determinada percentagem de aditivo estabilizante na SMA
E	Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa
EA	Equivalente de areia
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EAST	European Asphalt Study Tour

E _{CS}	Coeficiente de escoamento
EN	Norma Europeia
EPB	Espessura da película de betume
ETD	Profundidade média de textura estimada
EUA	Estados Unidos da América
f	Conteúdo de finos
F	Deformação <i>Marshall</i>
F _{Ac}	Rácio da fração intermédia de partículas
F _{Af}	Rácio das partículas “finas” a qual inclui o fíler
f _{binder}	Fração de betume fixo no fíler
FFF	Filler Fixing Fator
FI	Índice de achatamento
FR _s	Percentagem de preenchimento do esqueleto de agregados grossos com mastique betuminoso
FSGV	German Road and Transportation Research Association
GF	Tolerâncias da granulometria típica
IARC	International Agency for Research on Cancer
I _e	Inibição do escorrimento de material betuminoso
IP	Índice de plasticidade
IRC	Índice de resistência conservada
IRI	Índice de irregularidade longitudinal
IST	Instituto Superior Técnico
ITS	Resistência à tração indireta
ITSR	Resistência conservada em tração indireta
LA	Los Angeles
LL	Limite de liquidez
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LUW	Loose unit weight
m ₁	Massa do recipiente
m ₂	Massa do recipiente e respetiva amostra de agregados secos
m _a	Massa de agregados
m _{ad}	Massa de aditivos estabilizantes
máx.	Máximo
m _b	Massa de betume
mBBr	Microbetão betuminoso rugoso
MB _F	Azul metileno
MBR	Mistura betuminosa rugosa
MBR-BBA	Mistura betuminosa rugosa com betume modificado com alta percentagem de borracha reciclada de pneus
MBR-BBM	Mistura betuminosa rugosa com betume modificado com média percentagem de borracha reciclada de pneus
M _{DE}	Micro-Deval
m _f	Massa de fíler

mín.	Mínimo
m_{pa}	Massa de partículas ativas
$m_{pa,SS}$	Massa de partículas ativas para se obter e otimizar o efeito de <i>stone-on-stone</i>
m_{pp}	Massa de partículas passivas
MS	Ensaio do sulfato de magnésio
m_s	Massa dos agregados finos
m_t	Massa total da mistura SMA compactada
$m_{t,SS}$	Massa total da mistura SMA para se obter e otimizar o efeito de <i>stone-on-stone</i>
N	Normal
NAPA	National Asphalt Pavement Association
nC	Número de camadas
NCAT	National Center for Asphalt Technology
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NMAS	Nominal Maximum Aggregate Size
nP	Número de aplicações de carga
NP EN	Norma Portuguesa baseada na Norma Europeia
OPSS	Ontario Provincial Standard Specification
p	Inclinação da lei de fadiga
P	Carga aplicada
$P_{0,063}$	Percentagem de material passado no peneiro com malha de dimensão igual a 0,063 mm
PA	Mistura betuminosa drenante
PA_{BP}	Percentagem de partículas ativas retidas no peneiro de referência relativamente à massa total de agregados
P_b	Percentagem de betume
$P_{b,ótima}$	Percentagem ótima de betume
P_{CA}	Percentagem de partículas ativas retidas no peneiro de referência relativamente à massa total da mistura betuminosa
PCS	Peneiro de controlo primário
P_f	Percentagem de fíler relativamente à massa total de agregados
P_{fibras}	Percentagem de fibras celulósicas
$P_{fíler}$	Percentagem de fíler por fração
PmB	Betume modificado com polímeros
P_{pa}	Percentagem de partículas ativas por fração
P_{pp}	Percentagem de partículas passivas por fração
PRD_{AIR}	Percentagem de profundidade de rodeira a 10000 ciclos
P_{ref}	Percentagem de material passado no peneiro de referência
P_s	Percentagem de agregados na mistura betuminosa
PSV	Resistência ao polimento do agregado grosso para camadas de desgaste
PT	Profundidade média de textura
Q	Quociente <i>Marshall</i>
QDMR	Queen Department of Main Roads
RD_{AIR}	Deformação máxima (profundidade de rodeira a 10000 ciclos)

RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
RUW	Rodded unit weight
S	Estabilidade <i>Marshall</i> ou Special
SCG	Compactador giratório Superpave
SCS	Peneiro secundário de controlo
SI	Índice de forma
SMA	Stone Mastic Asphalt; Stone Matrix Asphalt
SMA 11	Stone Mastic Asphalt com dimensão máxima nominal do agregado igual a 11 mm
SMA 12	Stone Mastic Asphalt com dimensão máxima nominal do agregado igual a 12 mm
SMA 14	Stone Mastic Asphalt com dimensão máxima nominal do agregado igual a 14 mm
SSD	Saturated surface dry
Surf	Camada de desgaste
SZ	Ensaio de impacto
TCS	Peneiro terciário de controlo
TMDA	Tráfego médio diário anual de veículos
USACE	U.S. Army Corps of Engineers
V	Volume do recipiente
V_a	Volume de agregados
V_{ad}	Volume de aditivos estabilizantes
V_b	Volume de betume
$V_{b.ef}$	Volume de betume efetivo
VCA	Volume de vazios na mistura de partículas ativas ou agregados grossos
VCA_{DRC}	Volume de vazios na mistura de partículas ativas compactadas com o varão
VCA_{MIX}	Volume de vazios na mistura de partículas ativas na mistura SMA compactada
VCA_{PC}	Volume de vazios na mistura de partículas ativas compactadas com o Proctor
VCA_{RC}	Volume de vazios na mistura de partículas ativas compactadas com o <i>roller compactor</i>
V_f	Volume de fíler
VFB	Volume de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume
V_m	Volume de mastique betuminoso
VMA	Volume de vazios na mistura de agregados
V_{pa}	Volume de partículas ativas
$V_{pa,SS}$	Volume de partículas ativas para se obter e otimizar o efeito de <i>stone-on-stone</i>
V_{pp}	Volume de partículas passivas
V_s	Volume de vazios na mistura de agregados grossos compactados
V_{SC}	Volume de vazios nos agregados sem compactação
V_t	Volume total da mistura SMA compactada
V_v	Volume de vazios na mistura betuminosa (porosidade)
$V_{v.f}$	Volume de vazios no fíler compactado com o equipamento Rigden
$V_{v.pa}$	Volume de vazios na mistura de partículas ativas
$V_{v,SS}$	Volume de vazios na mistura SMA compactada com efeito de <i>stone-on-stone</i> otimizado (porosidade)
WS ₂₄	Absorção de água

WSDOT	Washington State Department of Transportation
WTS _{AIR}	Taxa de deformação

Alfabeto Grego

Símbolo	Significado
ϵ_6	Extensão de tração imposta para se obter um milhão de ciclos de carregamento
$\epsilon_{6\text{env}}$	Extensão de tração imposta para se obter um milhão de ciclos de carregamento para misturas betuminosas envelhecidas
α	Coefficiente de correção da percentagem de betume
ρ_a	Massa volúmica da mistura de agregados
ρ_{ad}	Massa volúmica do aditivo estabilizante
ρ_b	Massa volúmica do betume
$\rho_{b,pa}$	Baridade das partículas ativas
$\rho_{b,pp}$	Baridade das partículas passivas
$\rho_{b,s}$	Baridade da mistura de partículas ativas após compactação com o varão
ρ_{ba}	Baridade da mistura betuminosa compactada
ρ_{bg}^b	Baridade dos agregados grossos compactados com o compactador giratório
ρ_{bi}	Baridade da amostra ensaiada
ρ_{bmi}	Baridade média das amostras ensaiadas
ρ_f	Massa volúmica do fíler
ρ_{mt}	Baridade máxima teórica da mistura betuminosa
ρ_p	Massa volúmica das partículas de agregado secas
ρ_{pa}	Massa volúmica das partículas ativas
ρ_{pp}	Massa volúmica das partículas passivas
ρ_{rd}	Massa volúmica das partículas secas
ρ_s	Massa volúmica dos agregados finos
ρ_{sb}	Massa volúmica dos agregados utilizados na mistura betuminosa
ρ_w	Massa volúmica da água

Funções matemáticas

Símbolo	Significado
e^x	Exponencial de x
$\ln(x)$	Logaritmo natural de x

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA

As exigências atuais conduzem à necessidade de se promover a sustentabilidade estrutural dos pavimentos, caminhando para “pavimentos de longa duração” ou “pavimentos perpétuos”, apenas com manutenção superficial, ao mesmo tempo que é preciso assumir que um pavimento deve ser uma estrutura em ciclo fechado: os materiais entram na fase de construção devendo ser minimizada (tendencialmente eliminada) a rejeição de materiais ao longo da sua vida (Pereira *et al.*, 2007).

No que concerne à manutenção superficial, a prática comum de construção de camadas de desgaste com recurso a misturas betuminosas convencionais conduz à necessidade de realizar intervenções de conservação com uma maior frequência. A realização destas intervenções de conservação é responsável por elevados custos diretos para a administração rodoviária, para os utentes e para o ambiente. Estes custos são tanto mais relevantes quanto maior o volume de tráfego da estrada onde é necessária a intervenção, em particular quando não existem alternativas à mesma.

Neste contexto, o estudo de novos materiais, que permitam produzir pavimentos com camadas betuminosas (em particular na camada de desgaste) mais flexíveis, mais resistentes às solicitações do tráfego, menos suscetíveis às variações climáticas e ao envelhecimento, em suma com maior durabilidade, reveste-se de grande importância para a concretização de uma diminuição dos custos de conservação servindo de contributo para uma melhor gestão dos montantes monetários disponíveis.

Entre os diversos tipos de misturas betuminosas de alto desempenho para a camada de desgaste, habitualmente utilizadas a nível mundial, tem merecido particular interesse a utilização de misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA), desenvolvidas na Alemanha há cerca de cinco décadas. Desde então, o crescente interesse evidenciado, provém do 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 (EAPA, 2007), tornando-se numa alternativa económica e ambientalmente interessante.

Embora os resultados sejam promissores, interessa compreender que apesar de se verificar, a nível internacional, inúmeras aplicações de misturas SMA com sucesso, constata-se que ainda persistem problemas em algumas das aplicações efetuadas, com a conseqüente diminuição do seu desempenho. Tal resulta da sensibilidade das misturas SMA 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 resultará numa mistura betuminosa com um comportamento desadequado (Clark & McGhee, 2006).

No âmbito da formulação de misturas SMA como camada de desgaste nos pavimentos, continua a existir uma ampla discussão relativa à forma como a mesma deverá ser efetuada de modo a permitir obter misturas betuminosas com um desempenho maximizado, sendo disso exemplo o recente estudo realizado por Gardete (2016). Como indicado pela própria norma europeia harmonizada relativa a este tipo de misturas, a EN 13108-5:2013, *“The ultimate aim is to specify the required fundamental properties of the bituminous mixtures. However, as specifications for Stone Mastic Asphalt have traditionally been based empirically on compositional recipes combined with specifications for the constituent materials with additional requirements based on performance related tests and as insufficient experience is available with fundamental testing of Stone Mastic Asphalt this European Standard, for the moment, specifies empirical requirements only.”*

Assim a formulação das misturas SMA tem de uma forma geral sido baseada na utilização de especificações (formulação por receita), tendo mais recentemente sido introduzido o conceito de

imbricamento entre as partículas ativas (“agregados grossos”) do tipo *stone-on-stone* o qual tem como intuito assegurar que as misturas SMA que são formuladas apresentam um desempenho adequado à deformação permanente. Este conceito, procura para um determinado volume de vazios das partículas ativas previamente determinado, que o volume de mastique betuminoso na mistura betuminosa compactada não seja superior ao volume de vazios disponível. Para isso a formulação laboratorial consiste num processo iterativo (de variação da composição granulométrica) para obtenção de uma determinada percentagem mínima de betume, porosidade e de VMA, ao contrário do que sucede com outros tipos de misturas betuminosas, onde habitualmente se procura encontrar a percentagem ótima de betume que se adapte à composição granulométrica previamente definida (Bastow *et al.* 2005).

Todavia, no caso de uma SMA a definição de uma composição granulométrica baseada num fuso pré-definido, como atualmente se realiza, limita a fácil compreensão e obtenção de um efeito de *stone-on-stone* passível de otimizar a resistência à deformação permanente e que assegure, simultaneamente, a obtenção de uma SMA com um desempenho mecânico e funcional adequado.

Neste âmbito, diversas questões carecem ainda de resposta para uma melhor compreensão do comportamento das misturas SMA e que garantam um desempenho otimizado, nomeadamente em Portugal, onde o número de aplicações é ainda incipiente, tais como:

- Quais as propriedades a exigir para os materiais utilizados no fabrico de misturas SMA?
- Quais as propriedades a definir para caracterizar as misturas SMA?
- Qual o método de formulação a utilizar para se respeitar as propriedades especificadas anteriormente?

1.2 OBJETIVOS

Com o presente trabalho pretende-se contribuir para a definição de uma nova metodologia prática para a formulação e controlo de qualidade das misturas SMA, recorrendo à otimização volumétrica da mistura betuminosa, baseada na obtenção de um desempenho otimizado que incorpore o efeito de *stone-on-stone* entre as partículas ativas. O desenvolvimento do presente trabalho pretende assim contribuir para a adoção de uma metodologia de formulação baseada na otimização do desempenho das misturas SMA, em substituição da utilização de “receitas” pré-estabelecidas.

Assim os principais objetivos deste trabalho são:

1. desenvolver um método de formulação e controlo de qualidade de misturas SMA que permita um processo contínuo de otimização do próprio método de formulação, assegurando a otimização do desempenho das misturas betuminosas, o qual incorpora simultaneamente o efeito de *stone-on-stone*, através da obtenção dos seguintes objetivos específicos:
 - a. proposta de conceito de *inibição de escorrimento* de material betuminoso e desenvolvimento de uma metodologia para a sua avaliação nas misturas SMA, função do tipo de aditivo estabilizante utilizado;
 - b. desenvolvimento de uma metodologia para compactação das partículas ativas em laboratório que permita avaliar e otimizar o efeito de *stone-on-stone* e que seja passível de incorporar no método de formulação proposto;
 - c. desenvolvimento de uma metodologia de avaliação do desempenho de misturas SMA fabricadas em laboratório e em obra que permita a sua futura otimização;

- d. proposta de um método de formulação e controlo de qualidade, que permita ao utilizador aquando da formulação e/ou da fase de controlo de qualidade da obra, aferir de forma fácil e interativa, quais as consequências de determinada variação na composição volumétrica da SMA no desempenho estimado;
2. aprofundar e partilhar os conhecimentos relativos às misturas SMA.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia definida para realização do presente trabalho, baseou-se nas seguintes atividades principais:

- pesquisa bibliográfica, com o objetivo de sintetizar e analisar os conhecimentos atuais sobre as misturas betuminosas do tipo SMA, no que respeita, nomeadamente, à sua composição e propriedades dos materiais constituintes e respetiva influência no comportamento de uma SMA. Adicionalmente, são igualmente alvo de pesquisa os métodos de formulação das misturas SMA que servirão de base ao desenvolvimento subsequente da parte experimental do trabalho;
- desenvolvimento da parte experimental do trabalho em quatro fases distintas:
 - fase preliminar (Fase 1) correspondente à avaliação dos procedimentos de ensaio a adotar em laboratório para uma adequada caracterização das misturas SMA. Nesta fase avaliam-se, nomeadamente as condições de fabrico em laboratório, a energia de compactação a utilizar com o método *Marshall*, os métodos mais adequados para a avaliação do escorrimento de material betuminoso e da percentagem de betume, assim como a granulometria e a afinidade entre os agregados e o betume;
 - segunda fase (Fase 2) corresponde à caracterização das misturas do tipo SMA 11, SMA 12 e SMA 14 utilizadas neste trabalho, no que concerne aos seus materiais constituintes, formulação das misturas SMA (segundo o método *Marshall*) e respetiva avaliação do desempenho, no que concerne, nomeadamente, ao escorrimento de material betuminoso, à deformação permanente, à sensibilidade à água e ao fendilhamento por fadiga;
 - a terceira fase do estudo (Fase 3) contempla a avaliação experimental aprofundada dos materiais granulares constituintes das diversas misturas SMA avaliadas na Fase 2. A avaliação consiste na determinação da baridade e respetivo volume de vazios existente entre as partículas ativas através de diferentes métodos de compactação. O estudo considera ainda, para cada método de compactação, a avaliação da quebra de agregado que ocorre nas partículas ativas, através do acréscimo de material passado no peneiro de referência comparativamente ao que sucede em obra. Os métodos de compactação estudados são posteriormente avaliados quanto à sua adequabilidade para incorporar a proposta de metodologia de previsão para formulação da composição volumétrica de misturas SMA, tendo como pressuposto a obtenção de um efeito de *stone-on-stone*, independentemente do método de compactação de partículas ativas escolhido;
 - na quarta fase do estudo (Fase 4), com os materiais constituintes das misturas SMA 12 e SMA 14 (SMA 12.O e SMA 14-1.O) avaliadas na Fase 2, são definidas novas composições volumétricas para as misturas SMA, como processo de “otimização” da composição através do método de formulação proposto na Fase 3. A “otimização” será avaliada para diferentes métodos de compactação das partículas ativas avaliados na Fase 3.

Posteriormente, procede-se à avaliação do desempenho mecânico e funcional das misturas SMA “otimizadas” para desenvolvimento do conceito de *mastic-within-stone* e *tire-on-stone*. A avaliação do desempenho das misturas inclui, nomeadamente, a avaliação do escorrimento de material betuminoso, da sensibilidade à água, da resistência à deformação permanente, ao fendilhamento por fadiga e ao envelhecimento, assim como da resistência à derrapagem através do pêndulo britânico e da macrotextura através do método volumétrico da mancha.

- proposta de método de formulação de misturas *i-SMA* baseado nos conceitos de *stone-on-stone*, *mastic-within-stone* (que inclui o efeito de *mix-skeleton* e de *tire-on-stone*).

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado nos seguintes capítulos:

Capítulo 1: “Introdução”. Faz a abordagem e enquadramento do tema desenvolvido neste trabalho, referindo-se a importância do mesmo no panorama nacional e internacional. Neste capítulo são igualmente apresentados os objetivos do trabalho assim como a metodologia e estrutura adotadas.

Capítulo 2: “Fabrico e Aplicação de misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA)”. Apresenta e analisa de forma generalista as misturas betuminosas do tipo SMA, no que concerne à sua definição, modo de fabrico e aplicação e sua influência no comportamento de uma SMA.

Capítulo 3: “Constituição das misturas SMA”. É efetuada uma revisão em termos dos materiais habitualmente utilizados no fabrico de misturas SMA, suas propriedades e sua influência no comportamento das misturas.

Capítulo 4: “Formulação de misturas betuminosas do tipo SMA”. É realizada uma revisão dos métodos propostos a nível internacional para a formulação de misturas SMA, com o intuito de compreender quais os conceitos que os fundamentam e de que forma estes podem ser aplicados na elaboração de um novo método de formulação baseado na obtenção de um desempenho mecânico e funcional otimizados e trabalhabilidade adequada.

Capítulo 5: “Estudo de procedimentos laboratoriais a adotar para caracterização das misturas SMA (Fase 1)”. Dada a incipiente utilização de misturas SMA em Portugal e com o objetivo de permitir uma melhor compreensão dos aspetos particulares relativos ao fabrico e avaliação em laboratório de misturas SMA, é realizada uma avaliação prévia (Fase 1 do estudo experimental) das condições de fabrico em laboratório, da energia de compactação a utilizar, assim como o estudo dos métodos mais adequados para avaliar o escorrimento de material betuminoso, a percentagem de betume, assim como a influência das fibras celulósicas na adesividade entre o betume e os agregados.

Capítulo 6: “Avaliação inicial das misturas SMA (Fase 2)”. É realizada inicialmente uma descrição sucinta dos materiais e procedimentos laboratoriais utilizados. Segue-se uma caracterização dos materiais utilizados, estudo de formulação e avaliação do desempenho para cada uma das misturas SMA avaliadas do tipo SMA 11, SMA 12 e SMA 14.

Capítulo 7: “Avaliação do efeito de *stone-on-stone* (Fase 3)”. Procede-se à avaliação do efeito de *stone-on-stone* para diferentes tipos de agregados (granodioritos, basaltos e granitos) segundo a metodologia desenvolvida nos EUA comparativamente a diferentes métodos de compactação de partículas ativas propostos. Os diferentes métodos de compactação de partículas ativas constituem alternativas para incorporar no método de formulação proposto no presente estudo. É descrita a

sequência de cálculo base a adotar na metodologia analítica do método de formulação proposto no presente estudo, visando a obtenção do efeito de *stone-on-stone*, independentemente do método de compactação de partículas ativas escolhido.

Capítulo 8: “Otimização das misturas SMA (Fase 4)”. Segundo a metodologia proposta no capítulo 7 é realizada a “otimização” das misturas SMA através da sua formulação e posterior avaliação do desempenho. Posteriormente, para as conclusões obtidas nas diferentes fases do estudo experimental é proposto um método de formulação de misturas SMA baseado nas características dos materiais constituintes das SMA e sua composição volumétrica que permita assegurar um desempenho otimizado e trabalhabilidade adequada.

Capítulo 10: “Conclusões”. São apresentadas as conclusões finais resultantes das diferentes fases do estudo experimental realizado, nomeadamente na avaliação do volume de vazios das partículas ativas e do desempenho. Para finalizar apresentam-se possíveis linhas de investigação que se sugerem para futuros trabalhos.

“Anexos”. É apresentada uma compilação dos aspetos relevantes decorrentes da revisão bibliográfica realizada.

2 FABRICO E APLICAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS DO TIPO *STONE MASTIC ASPHALT* (SMA)

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Dada a importância que a aplicação de SMA apresenta a nível europeu, este tipo de mistura encontra-se contemplado numa norma europeia harmonizada específica, a EN 13108-5, com a denominação de *Stone Mastic Asphalt* (SMA). No presente trabalho optou-se por usar a mesma terminologia, ou seja designar as misturas por “mistura betuminosa do tipo SMA”, “mistura SMA”, “*Stone Mastic Asphalt*” ou simplesmente por “SMA”. Embora na bibliografia internacional seja, ainda por vezes, comum a utilização de designações como: *Splittmastixasphalt*; *Stone Matrix Asphalt* (denominação Americana); ou menos habitualmente *Stone Filled Mastic*; *Grit Mastic Asphalt*.

De acordo com o que será descrito no capítulo 3, os materiais que tipicamente se utilizam no fabrico de uma SMA são, para além dos tradicionais (agregados, fíler e betume), aditivos estabilizantes (habitualmente fibras celulósicas). A introdução de um novo material em relação às misturas tradicionais conduz a algumas adaptações no processo de fabrico, as quais se descrevem seguidamente.

2.2 FABRICO DE SMA

2.2.1 PROCESSO DE FABRICO

Como já referido anteriormente, o fabrico e a aplicação de misturas SMA utilizando fibras celulósicas constitui uma técnica ainda recente em Portugal, pelo que se considera importante explanar seguidamente sobre os diferentes procedimentos para a adição de fibras celulósicas na central de misturas betuminosas.

O fabrico de misturas SMA assim como a adição de fibras celulósicas individuais ou aglomeradas com ou sem adição de aglutinante pode ser efetuada em centrais de misturas betuminosas do tipo descontínua ou contínua como sucede para uma mistura betuminosa convencional fabricada a quente.

Tal decorre do facto do processo de fabrico de uma mistura SMA ser semelhante ao de uma mistura betuminosa convencional, onde o tempo de mistura é comumente dividido numa fase seca e numa fase húmida, diferindo o fabrico essencialmente na adição de um aditivo estabilizante. Assim importa compreender quais as suas implicações e cuidados a ter.

No caso de uma mistura SMA, a fase seca do tempo de mistura decorre desde o momento em que os agregados são inseridos no misturador, seguidos posteriormente da adição do fíler e do aditivo estabilizante, até ao momento em que o betume é adicionado.

A fase húmida do tempo de mistura por sua vez decorre desde que se inicia a adição do betume no misturador e posterior mistura com os agregados, fíler e aditivo estabilizante, até a mistura ser descarregada diretamente nos veículos ou transportada para silos onde poderá ficar armazenada.

De acordo com a experiência tem sido demonstrado que quando se adicionam fibras celulósicas a uma mistura SMA, o tempo de mistura (fase seca e fase húmida) deverá ser ligeiramente superior relativamente ao tempo de mistura necessário para fabricar uma mistura betuminosa convencional (Austroads, 2009). Este tempo adicional tem como objetivo permitir uma adequada dispersão das fibras

na mistura betuminosa. Numa central de misturas betuminosas, isto requer que tanto a fase seca como a fase húmida sejam aumentadas de 5 a 15 segundos cada (NAPA, 1999).

Segundo Drueschner & Schaefer (2005) o tempo de mistura é independente do tipo de fibras celulósicas utilizadas (fibras individuais, aglomeradas com ou sem a adição de aglutinante e/ou aditivos), devendo ser na sua totalidade igual ou superior a 53 segundos, como se apresenta na Figura 2.1.

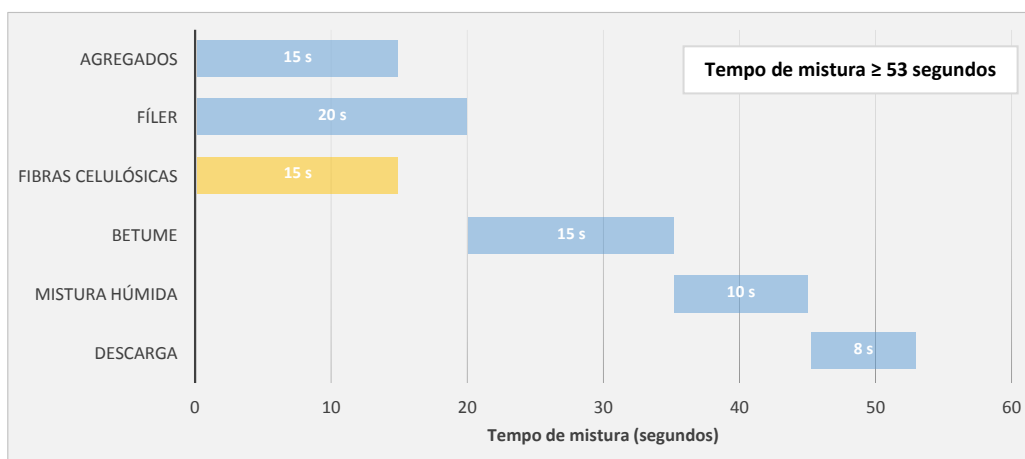


Figura 2.1 – Tempo de mistura de uma SMA com fibras celulósicas numa central de misturas betuminosas (adaptado de Drueschner & Schaefer, 2005)

Porém, o tempo requerido para dispersar de forma adequada as fibras na mistura betuminosa, depende do tipo de fibras celulósicas utilizado, assim como da forma como as fibras são fornecidas. Seguidamente na Figura 2.2 e Figura 2.3 apresentam-se os respetivos tempos recomendados por JRS, Rettenmaier (2007) e Shünemann (2007) para: a adição de fibras celulósicas individuais e aglomeradas sem adição de aglutinante e que deverá estar compreendido entre 63 e 68 segundos; e a adição de fibras celulósicas aglomeradas com adição de aglutinante que deverá ser igual ou superior a 53 segundos.

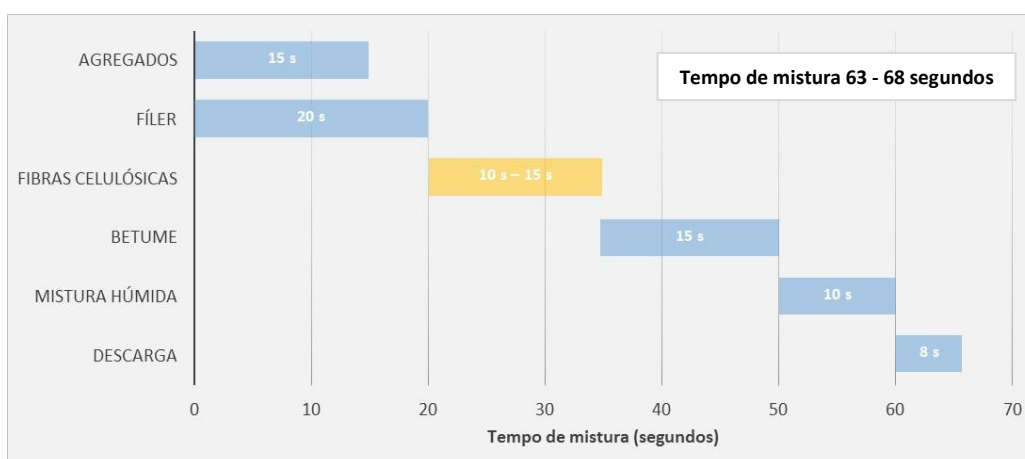


Figura 2.2 – Tempo de mistura para fibras celulósicas individuais e aglomeradas sem adição de aglutinantes numa central de misturas betuminosas (adaptado de JRS, Rettenmaier, 2007 e Shünemann, 2007)

De acordo com a Figura 2.2, apesar de ser indicado um tempo adicional de 10 a 15 segundos, importa referir que para as fibras celulósicas individuais um aumento excessivo da duração da fase seca pode

promover a destruição das fibras através da sua pulverização, pelo que a sua mistura durante a fase seca deve ser reduzida ao mínimo.

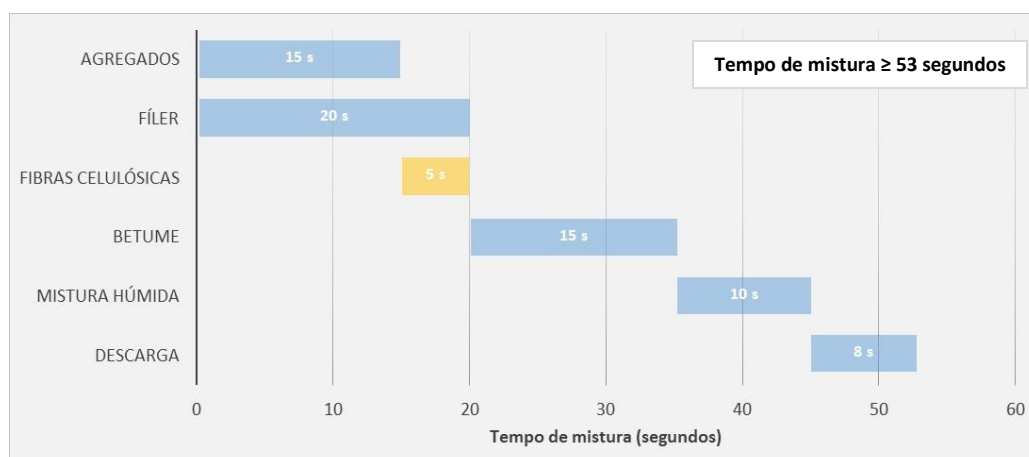


Figura 2.3 – Tempo de mistura para fibras celulósicas aglomeradas com adição de aglutinantes numa central de misturas betuminosas (adaptado de JRS, Rettenmaier, 2007 e Schünemann, 2007)

No caso das fibras celulósicas aglomeradas com adição de aglutinantes serem fornecidas em sacos termo fundíveis é recomendado que o tempo de mistura durante a fase seca seja aumentado em 5 segundos como se apresenta na Figura 2.4.

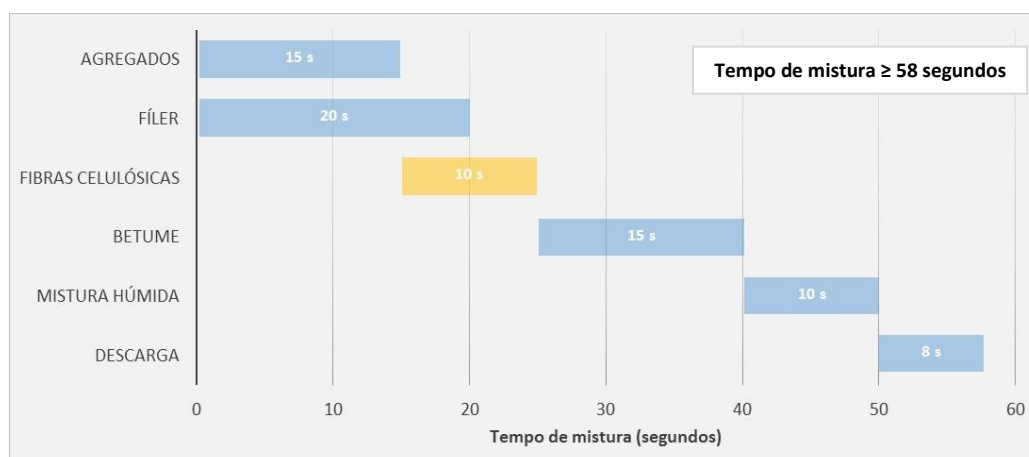


Figura 2.4 – Tempo de mistura para fibras celulósicas aglomeradas com adição de aglutinantes fornecidas em sacos termo fundíveis numa central de misturas betuminosas (adaptado de JRS, Rettenmaier, 2009)

Independentemente das recomendações anteriormente mencionadas para o tempo total de mistura (fase seca e fase húmida), segundo Blazejowski (2011) os seguintes cuidados devem ser tidos em consideração:

Fase seca:

- deverá ser limitada no tempo para minimizar o desgaste do misturador, assim como a quebra de agregados com menor resistência;
- um aumento excessivo da duração da fase seca diminui a produção da central;

- adicionalmente o aumento da duração da fase seca pode promover a destruição das fibras celulósicas através da sua pulverização quando estas se encontram sob a forma individual, ou destruir a forma das partículas de fíler.

Fase húmida:

- um aumento da duração da fase húmida provoca um aumento do envelhecimento do betume;
- apesar de se utilizar um tempo adequado para se efetuar a mistura, os aglomerados de fibras podem não dispersar por completo na mistura betuminosa. Isto pode ser provocado pela utilização de um aditivo estabilizante de baixa qualidade, pelo que se deve proceder à verificação da sua qualidade ocasionalmente.

Adicionalmente ao tempo de mistura, outro aspeto a ter em consideração é a forma como as fibras são adicionadas. De acordo com AAPA (2004) a adição de fibras celulósicas nas centrais de fabrico de misturas betuminosas, é habitualmente realizada através de um dos seguintes possíveis métodos:

Central descontínua:

- adição de fibras individuais ou aglomerados de fibras diretamente no misturador da central dentro de sacos termo fundíveis;
- pesagem e adição de fibras individuais ou aglomerados de fibras diretamente no misturador da central.

Central contínua:

- pesagem e adição de fibras aglomeradas através do sistema utilizado para adicionar material reciclado no tambor de uma central contínua;
- pesagem e adição de fibras individuais ou aglomerados de fibras diretamente no tambor de uma central contínua através de uma tubagem que permite misturar as fibras com o betume no local onde é adicionado aos agregados.

2.2.2 FABRICO EM CENTRAL DESCONTÍNUA DE MISTURAS BETUMINOSAS

No que concerne à adição de fibras celulósicas nas centrais descontínuas pode ser realizada de forma manual ou automática. A adição manual requer que um operador proceda à colocação de sacos termo fundíveis diretamente no misturador durante a fase seca do processo de fabrico da mistura SMA como se observa na Figura 2.5.



Figura 2.5 – Operador a introduzir um saco termo fundível de fibras celulósicas diretamente no misturador

O operador deverá introduzir tantos sacos quanto os necessários para cada massa total de “amassadura” de modo a ser assegurada a percentagem de fibras pré-definida. Por esse motivo torna-se fundamental, previamente, saber qual a central de misturas betuminosas que será utilizada, assim como qual a máxima massa passível de ser fabricada em cada “amassadura”.

Pela atividade envolvida aquando de cada “amassadura”, a adição manual de fibras celulósicas é adequada para aplicações que requeiram a produção de um reduzido número de toneladas de mistura betuminosa.

Para projetos de pavimentação de média e grande dimensão, torna-se necessária a adição automática das fibras para o fabrico das misturas SMA, permitindo aumentar a produtividade da central de misturas betuminosas. A adição automática de fibras pode ser realizada através de alimentadores automáticos de pequena dimensão (capacidade de 3 a 4 m³) para os quais se utilizam sacos de fibras de grande dimensão, ou através de alimentadores automáticos com silo, diferindo do caso anterior, a capacidade de armazenamento que varia entre 8 e 80 m³, sendo as fibras armazenadas no silo através de camiões cisterna. Os alimentadores utilizados podem adicionalmente ser volumétricos ou gravimétricos como os que se apresentam na Figura 2.6.

A grande diferença entre ambos consiste no facto de um alimentador volumétrico permitir a determinação da percentagem de material a utilizar função da massa volúmica das fibras as quais irão ocupar um determinado espaço correspondente à quantidade que se pretende adicionar numa “amassadura” e que se encontra debaixo do recipiente do alimentador, como se pode observar na Figura 2.6.

No caso dos alimentadores gravimétricos as fibras são removidas do recipiente do alimentador através de uma tremonha que encaminha as fibras para uma balança do alimentador, até que seja alcançada a massa pretendida de fibras para uma “amassadura”, como se pode observar na Figura 2.6.



Figura 2.6 – Alimentador automático volumétrico (à esquerda, JRS, Rettenmaier, 2009) ou gravimétrico (à direita, Benninghoven, 2014b)

Os aglomerados de fibras celulósicas com ou sem adição de aglutinante quando colocados no interior dos alimentadores automáticos volumétricos ou gravimétricos, vão sendo armazenados até um determinado volume ou massa, respetivamente, e no momento adequado são sopradas através de ar comprimido diretamente para o misturador pela tubagem do fíler ou através de uma tremonha independente utilizada para adição de aditivos, como se pode observa na Figura 2.7.



Figura 2.7 – Esquema de alimentação de fibras com alimentador automático (adaptado de JRS, Rettenmaier, 2009)

Apesar de menos comum podem ainda ser utilizados alimentadores automáticos específicos para a adição de fibras celulósicas individuais como o que se apresenta na Figura 2.8.



Figura 2.8 – Alimentador automático para adição de fibras celulósicas individuais (Benninghoven, 2014c)

As fibras celulósicas individuais quando colocadas no interior do alimentador para fibras individuais, são sujeitas à ação de pás que as arrumam e distribuem, sendo como sucede com os aglomerados de fibras com ou sem adição de aglutinante, posteriormente armazenadas até um determinado volume ou massa e sopradas através de ar comprimido diretamente para o misturador na altura adequada (NAPA, 1999).

2.2.3 FABRICO EM CENTRAL CONTÍNUA DE MISTURAS BETUMINOSAS

Nas centrais betuminosas contínuas a adição de fibras celulósicas requer a utilização de alimentadores automáticos. A adição automática de aditivos pode ser realizada através de alimentadores automáticos de pequena dimensão ou com silo como utilizado nas centrais descontínuas.

Apesar da utilização de centrais contínuas ser menos comum comparativamente às centrais descontínuas, quando utilizadas no fabrico de misturas SMA é imperativo que a adição das fibras seja realizada imediatamente antes da entrada para adição de betume, tanto para as centrais contínuas de fluxo paralelo (Figura 2.9) como para as centrais contínuas de fluxo contracorrente como ilustrado na Figura 2.10.

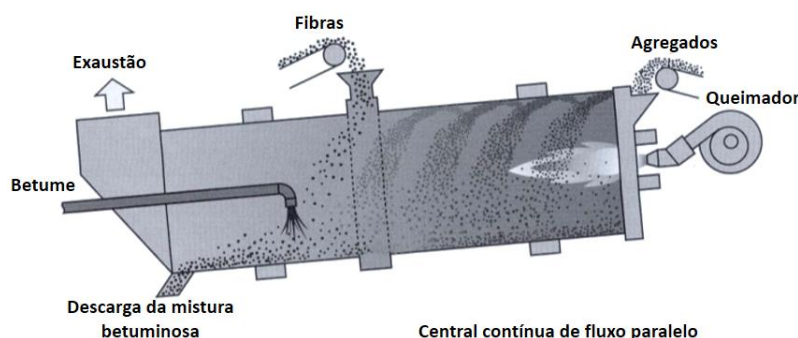


Figura 2.9 – Esquema de alimentação de fibras no tambor de uma central contínua de fluxo paralelo (adaptado de JRS, Rettenmaier, 2009)

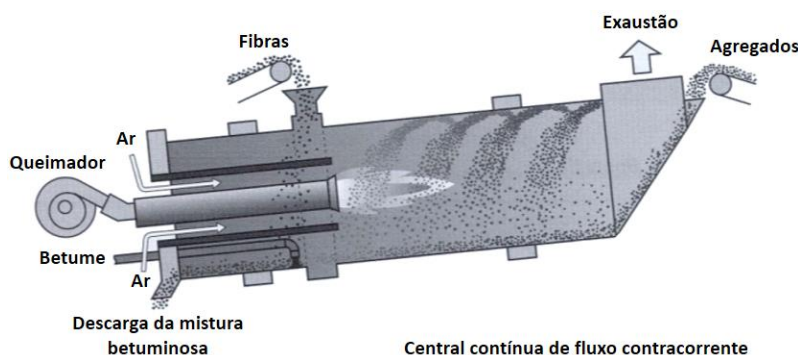


Figura 2.10 – Esquema de alimentação de fibras no tambor de uma central contínua de fluxo contracorrente (adaptado de JRS, Rettenmaier, 2009)

Tal permite, que as fibras sejam “capturadas” pelo betume antes de serem expostas aos gases a temperaturas elevadas que circulam a grande velocidade no interior do tambor (NAPA, 1999), assim como nunca estarem em contacto direto com a chama do queimador. Se a adição de fibras não tiver em consideração estes cuidados, as fibras poderão ser recolhidas pelo sistema de controlo de finos da central, assim como serem pulverizadas pela chama do queimador (Karnemaat *et al.*, 1993).

Para isso os aglomerados de fibras celulósicas com ou sem adição de aglutinante são colocados no interior dos alimentadores automáticos volumétricos ou gravimétricos, sendo armazenados até um determinado volume ou massa, respetivamente, e transportados para o interior do tambor pela entrada utilizada para adicionar material reciclado, como se pode observar na Figura 2.11.



Figura 2.11 – Esquema de alimentação de fibras com alimentador automático na entrada para adição de mistura betuminosa reciclada (adaptado de JRS, Rettenmaier, 2005)

2.3 APLICAÇÃO DE SMA

2.3.1 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 CAPA (2002), 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 propriedades, maiores percentagens de betume, aditivos e habitualmente betumes modificados (NAPA, 1999 e CAPA, 2002)]. Por esse motivo, segundo CAPA (2002) 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 (EAPA, 1998).

Na Figura 2.12 é apresentada uma representação gráfica da informação compilada no Anexo I-A sobre a utilização de SMA em camada de desgaste, desde os anos 90 até 2009 de acordo com elementos fornecidos pela EAPA e no caso dos EUA segundo CAPA (2002) e Lord (2004).

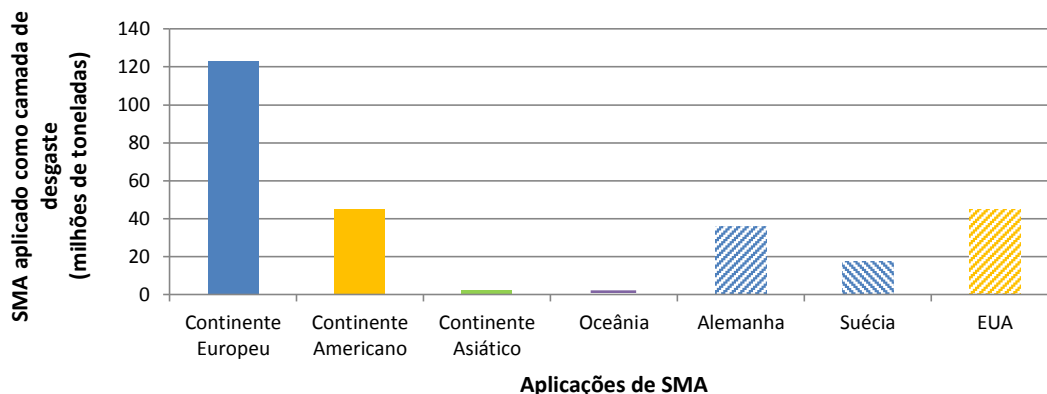


Figura 2.12 – Quantidade de misturas SMA aplicadas como camada de desgaste a nível mundial

Da análise da Figura 2.12 observa-se uma grande disseminação da utilização da SMA no continente europeu, cuja quantidade aplicada como camada de desgaste é francamente superior à realizada nos restantes continentes, representando cerca do triplo da quantidade aplicada no continente Americano (que corresponde na prática às aplicações nos EUA). No que concerne ao continente Asiático e Oceânia, a quantidade de SMA aplicada é ainda diminuta, representando cerca de 2 milhões de toneladas e 1 milhão de toneladas, respetivamente. Em relação ao continente Africano, não há dados disponíveis, estimando-se que apenas seja aplicado de forma mais regular na África do Sul.

O tratamento dos elementos fornecidos pela EAPA permitiu ainda constatar que, no continente Europeu, a Alemanha continua a distinguir-se com cerca de 40 milhões de toneladas de SMA aplicadas, seguida da Suécia com cerca de 20 milhões de toneladas. Segundo a Figura 2.12 verifica-se ainda que os EUA são atualmente um dos principais utilizadores de SMA, com aproximadamente 45 milhões de toneladas de misturas SMA aplicadas. Esta constatação é tanto mais impressionante se se tiver em consideração que as primeiras aplicações nos EUA apenas foram efetuadas no início da década de noventa (1991), no seguimento da experiência obtida no *European Asphalt Study Tour* (EAST).

Atualmente, segundo Lord (2004) e West *et al.* (2007), mais de 28 Estados dos EUA utilizam misturas SMA como camada de desgaste. Entre os vários utilizadores de SMA o Estado de Maryland e da Geórgia apresentam-se como dois dos principais impulsionadores da utilização de SMA nos EUA.

2.3.2 DIMENSÕES NOMINAIS DOS AGREGADOS UTILIZADOS NO FABRICO DAS MISTURAS SMA

Nas aplicações em camada de desgaste podem ser utilizados diferentes tipos de misturas SMA, consoante o tipo de aplicação e desempenho pretendido. Nesse sentido, apresenta-se seguidamente na Figura 2.13 uma súpula da gama de dimensões máximas nominais do agregado frequentemente

contemplada nos países onde as misturas betuminosas do tipo SMA são especificadas. A análise efetuada (que se apresenta no Anexo I-B) tem por base um total de 31 países: 20 países do continente europeu, 3 países do continente americano, 7 países do continente asiático e 1 país da Oceânia.

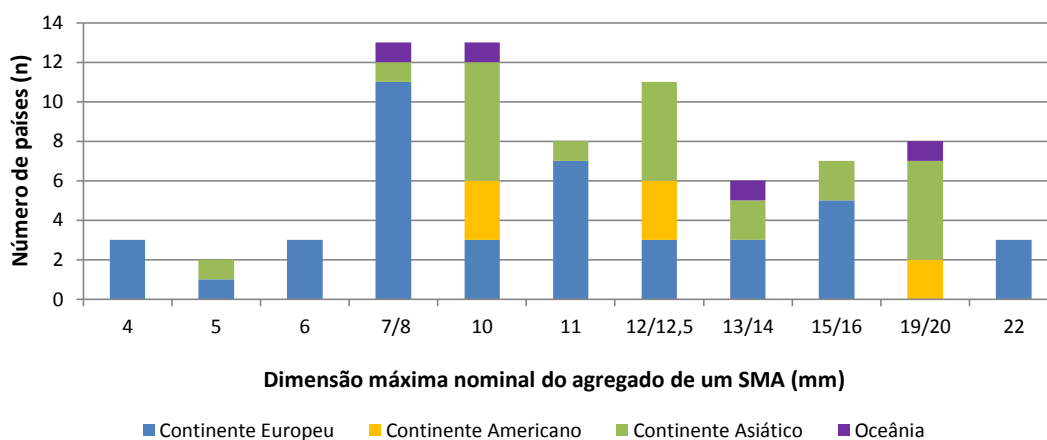


Figura 2.13 – Dimensão máxima nominal dos agregados comumente utilizados por continente no fabrico de SMA

De acordo com a Figura 2.13 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 norma EN 13108-5. Dentro dessa gama de dimensões a SMA 8, SMA 10, SMA 11, SMA 12, SMA 16 e a SMA 19 são as que maior número de utilizadores apresentam a nível internacional. Ainda assim verifica-se para a gama de dimensões supracitada, que entre os diversos países utilizadores de SMA existe uma grande diversidade de dimensões máximas nominais de agregado passíveis de serem utilizadas no fabrico de misturas SMA.

Porém, se efetuada uma análise por continente, como se apresenta na Figura 2.13, é possível constatar uma clara distinção das misturas SMA usualmente contempladas. Os países do continente europeu tendem a contemplar maioritariamente a SMA 8, SMA 11 e SMA 16. Quando analisados os restantes continentes, observa-se que o continente americano tende a contemplar maioritariamente SMA 9,5 e SMA 12,5, o continente asiático SMA 10, SMA 13 e SMA 20 e a Austrália e Nova Zelândia SMA 7, SMA 10 e SMA 14. Numa primeira análise a diversidade existente na dimensão máxima nominal definida nas misturas entre continentes, decorre dos diferentes tipos e séries de peneiros utilizados.

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.

A utilização de SMA com dimensão igual ou inferior a 8 mm é habitualmente aplicado, à semelhança da Alemanha (SMA 5), na manutenção e reparação de degradações localizadas, em reabilitações superficiais ou em vias de menor importância hierárquica na rede rodoviária, pois a estrutura mineral das misturas SMA pode acomodar a irregularidade da camada inferior melhorando o conforto na circulação dos utentes (Schneider, 2000).

Quando o principal objetivo reside na utilização de uma mistura SMA com uma elevada resistência à abrasão com pneus pitonados é comum a utilização de uma camada de desgaste com agregado com dimensão máxima nominal igual ou superior a 16 mm. De acordo com EAST (1990) misturas betuminosas com agregado de dimensão máxima nominal igual a 16 mm apresentam uma redução de

cerca de 40 % nos efeitos de abrasão resultante dos pneus pitonados comparativamente a misturas SMA com agregados de menor dimensão.

Nos EUA segundo VDOT (2011) as misturas SMA de 9,5 mm e 12,5 mm são recomendadas como camada de desgaste para estradas com um tráfego elevado, quer em termos de volume quer de cargas transportadas (itinerários principais e autoestradas). No que concerne às misturas SMA de 19,0 mm são recomendadas para o mesmo nível de tráfego, porém como camada de regularização.

No caso da Alemanha, segundo a ZTV Asphalt StB-09 (2009) as misturas SMA 8S e SMA 11 são recomendadas como camada de desgaste em pavimentos novos ou na reabilitação de pavimentos flexíveis, semirrígidos ou rígidos em estradas de maior nível hierárquico com elevado tráfego e velocidades de circulação, como sejam autoestradas e itinerários principais. As SMA 5S e SMA 8N poderão ser aplicadas em estradas com menor tráfego e velocidades reduzidas como sejam estradas municipais e vias urbanas, sendo as SMA 5N e SMA 8N recomendadas para vias rurais e pedonais.

A Suécia, à semelhança de outros países nórdicos e dos EUA, começou por utilizar essencialmente misturas SMA com agregados de maior dimensão máxima nominal como camada de desgaste, com o objetivo de mitigar a abrasão causada pelos pneus pitonados, ou menos comum, como camada de regularização (SMA 16 e SMA 22, respetivamente). Porém, em Outubro de 2007, a *Swedish National Road Administration* iniciou uma nova estratégia relativamente às misturas SMA a utilizar como camada de desgaste em pavimentos rodoviários. A alteração consistiu em substituir gradualmente as SMA 16, por misturas betuminosas do tipo SMA 8 e SMA 11, à semelhança do que é utilizado na Alemanha.

Assim, da análise efetuada 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 14 mm, função do tipo de estrada e de aplicação). 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 (VTI & Chalmers, 2007).

2.3.3 ESPESSURA DAS CAMADAS DE SMA

Outro aspeto a ter em consideração quando se pretende aplicar uma mistura SMA é a espessura da camada betuminosa. A espessura utilizada influencia nomeadamente, a obtenção de um adequado imbricamento do tipo *stone-on-stone* entre os agregados, necessário para este tipo de misturas betuminosas e conseqüente durabilidade da mistura SMA. Se a escolha de uma espessura inferior à adequada, pode promover problemas aquando da aplicação e fase de serviço da mistura betuminosa, a escolha de uma espessura superior à adequada poderá resultar numa mistura betuminosa com uma relação custo/benefício desadequada.

De acordo com Blazejowski (2011) a utilização de uma camada de SMA com uma espessura demasiadamente reduzida comparativamente à dimensão máxima nominal do agregado apresenta 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.

Para definir a espessura da camada betuminosa com SMA é comum a mesma basear-se na dimensão máxima nominal do agregado. Assim segundo Lanchas (2010) para garantia de um bom comportamento à deformação permanente, é recomendável que a espessura da camada em mistura SMA a aplicar seja pelo menos três vezes superior à dimensão máxima nominal do agregado. Esta recomendação está de acordo com o que é indicado pela EAPA (1998) que refere que as espessuras das camadas aplicadas em diversos países são no mínimo três a quatro vezes superiores à dimensão máxima nominal do agregado.

Na Figura 2.14 e na Figura 2.15 apresenta-se uma súmula da análise presente no Anexo I-C para diversos países, no que concerne às espessuras das camadas de desgaste em mistura SMA habitualmente utilizadas e respetivo número de vezes que a espessura é superior à dimensão máxima do agregado utilizado na mistura SMA. Dos dados compilados no Anexo I-C não existe informação relativamente à mistura SMA 22.

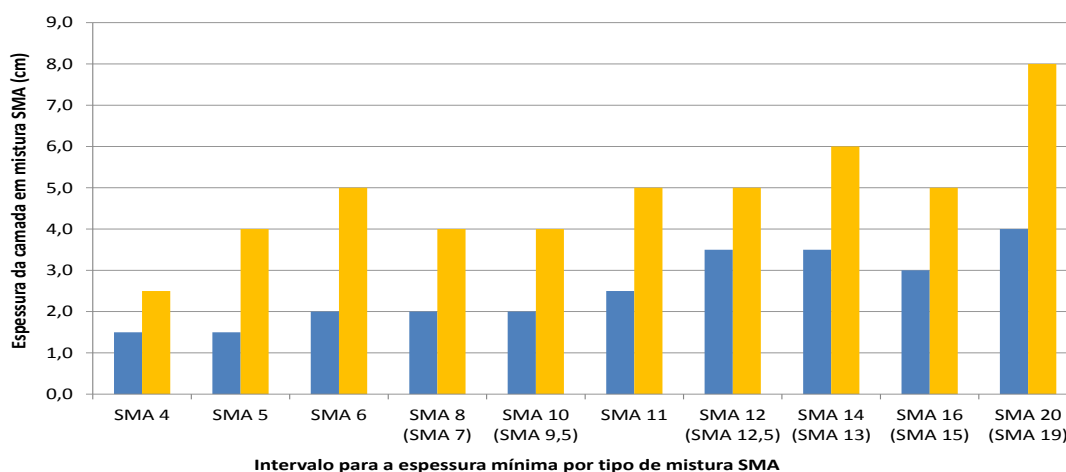


Figura 2.14 – Intervalo de espessuras mínimas definidas para as camadas de desgaste em mistura SMA em função do tipo de mistura SMA

De acordo com a Figura 2.14 observa-se um tendência para um aumento da espessura média a utilizar na camada betuminosa para um aumento da dimensão máxima nominal dos agregados. Em média uma mistura SMA 4 deverá ter uma espessura média de 2,0 cm comparativamente a 6,0 cm para uma mistura SMA 20.

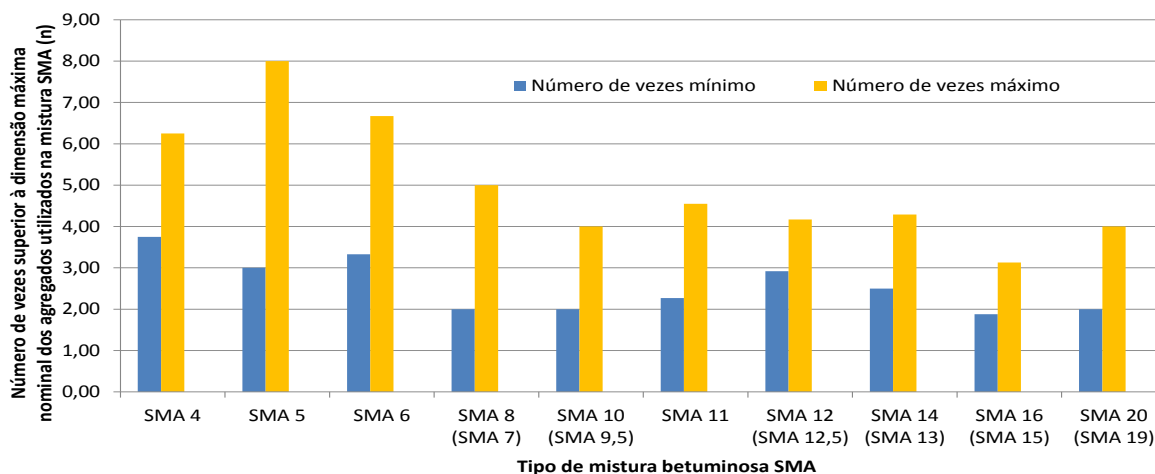


Figura 2.15 – Número de vezes que a espessura é superior à dimensão máxima do agregado utilizado na mistura SMA em função do tipo de mistura SMA

Porém, se analisado o número de vezes que a espessura é superior à dimensão máxima do agregado utilizado na mistura SMA, constata-se na Figura 2.15 que, para um aumento da dimensão máxima nominal dos agregados, corresponde uma diminuição do número de vezes que a espessura é superior relativamente à dimensão máxima nominal dos agregados. Como exemplo, no caso de uma mistura SMA 4 a espessura deverá estar compreendida entre 1,5 cm e 2,5 cm (equivalente a 3,75 e 6,25 vezes a dimensão máxima nominal do agregado, respetivamente como se observa na Figura 2.15). No caso da mistura SMA 20 a espessura deverá estar compreendida entre 4,0 cm e 8,0 cm (equivalente a 2,00 a 4,00 vezes a dimensão máxima nominal do agregado, respetivamente como se observa na Figura 2.15).

De acordo com a Figura 2.14 e Figura 2.15 verifica-se que a definição da espessura em função do número de vezes que deverá ser superior à dimensão máxima nominal não é constante para as diferentes misturas SMA, podendo-se indicar que esta é no mínimo cerca de quatro vezes a dimensão máxima nominal do agregado para uma mistura SMA 4 até um mínimo de cerca de duas vezes a dimensão máxima nominal para uma mistura SMA 20. Se considerada a média do intervalo de valores para cada tipo de mistura SMA, pode-se indicar que esse valor será cerca de três vezes a dimensão máxima nominal do agregado para misturas SMA com dimensão igual ou superior a 8 mm e cinco vezes para dimensões inferiores a 8 mm.

Com base na análise realizada apresenta-se no Quadro 2.1 uma recomendação relativa ao intervalo de espessuras mínimas a adotar para as misturas SMA que pelo número de utilizadores a nível internacional e pela dimensão máxima do agregado utilizado serão previsivelmente utilizadas em Portugal como camada de desgaste.

Quadro 2.1 – Recomendação para as espessuras mínimas a utilizar em Portugal para as misturas SMA

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

Adicionalmente na análise realizada no Anexo I-C, observa-se ainda que existem países, como é o caso da Dinamarca, Finlândia e Noruega, que ao invés de definirem espessuras mínimas para as camadas em mistura SMA, especificam a quantidade de material a aplicar por metro quadrado. Verifica-se, assim que para uma mistura SMA 6 deverá ser aplicado 60 kg/m², no caso de uma SMA 8 esse valor deverá situar-se entre 50 kg/m² e 80 kg/m², para uma SMA 11 entre 60 kg/m² e 80 kg/m² e para uma mistura SMA 16 entre 60 kg/m² e 100 kg/m².

3 CONSTITUIÇÃO DAS MISTURAS SMA

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A SMA consiste numa mistura betuminosa constituída por agregados grossos britados de elevada qualidade e por mastique betuminoso constituído por agregados finos, filler, aditivos estabilizantes e betume, como se apresenta na Figura 3.1.

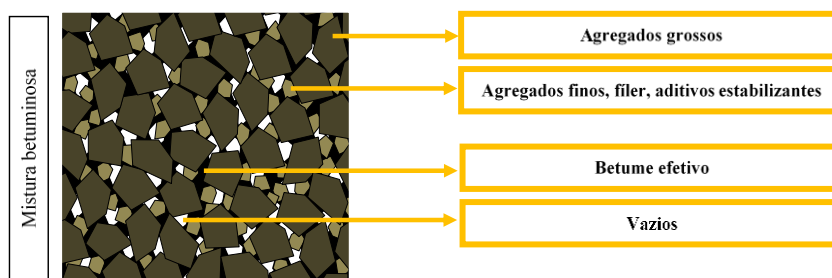
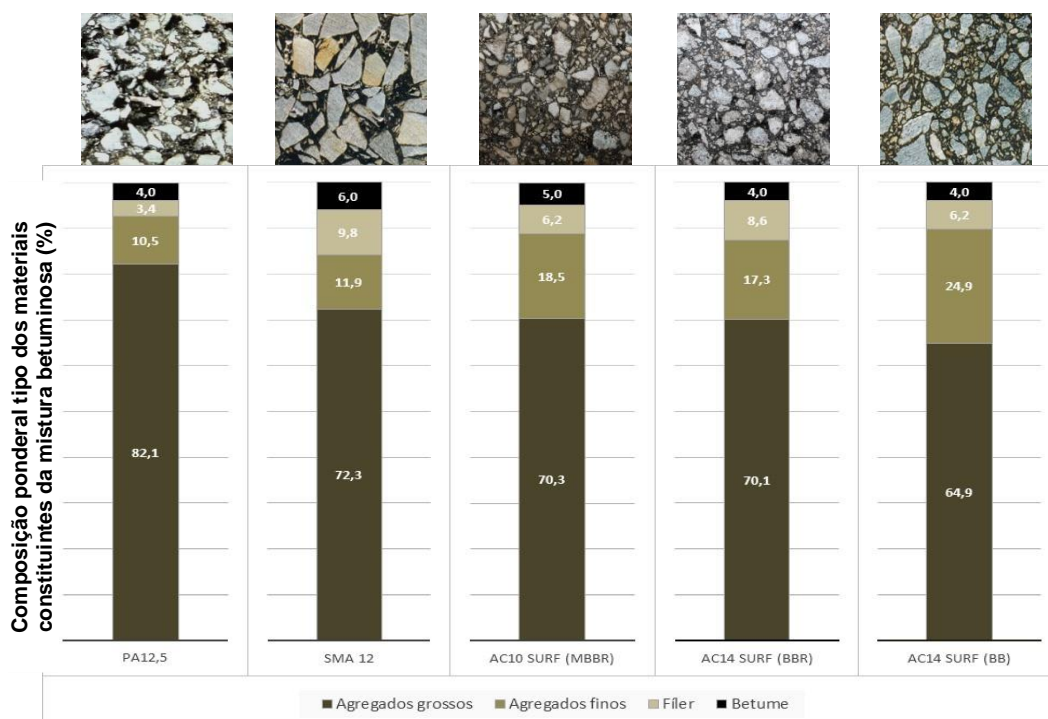


Figura 3.1 – Composição de uma mistura betuminosa do tipo SMA

Dos materiais que constituem uma 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 3.2 comparativamente a diferentes tipos de misturas betuminosas utilizadas em Portugal (PA12,5 – mistura betuminosa drenante; AC10 Surf (mBBR) – microbetão betuminoso rugoso; AC14 Surf (BBR) – betão betuminoso rugoso e AC14 Surf (BB) – betão betuminoso).



Legenda: PA – mistura betuminosa drenante; mBBR – microbetão betuminoso rugoso; BBR – betão betuminoso rugoso; BB – betão betuminoso

Figura 3.2 – Composição ponderal tipo e respetivo aspeto do arranjo estrutural dos agregados numa SMA 12 comparativamente a outros tipos de misturas betuminosas habitualmente aplicadas em Portugal

A Figura 3.2 permite verificar que a estrutura pétreia 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 fíler e de betume (cerca de 10 % e 6 %, respetivamente) comparativamente aos restantes tipos de misturas betuminosas que se observam na Figura 3.2. 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 3.2 é possível observar o arranjo estrutural dos agregados nas misturas betuminosas, verificando-se que no caso da mistura SMA, os agregados grossos se encontram preponderantemente em contacto entre si, à semelhança das misturas betuminosas drenantes, criando uma estrutura pétreia denominada de *stone-on-stone* (a qual se detalha com maior pormenor no ponto 3.2.4), ao contrário do que sucede num betão betuminoso, onde os agregados estão a “flutuar” no mastique betuminoso, sendo quase inexistente o contacto direto entre os agregados grossos. Tal estrutura pétreia conduz a que o comportamento das misturas SMA seja definido em função de duas componentes distintas:

- agregados grossos, pelas suas dimensões e elevada percentagem tendem a assegurar por si só um elevado imbricamento, habitualmente designado por *stone-on-stone*, que tem como função garantir um bom comportamento à deformação permanente, mesmo para elevadas pressões de enchimento dos rodados (Brown, 1992a, Brown *et al.*, 1996, CDOT, 2004, Lord, 2004 e Austroads, 2009);
- mastique betuminoso, constituído por agregados finos, fíler, aditivos estabilizantes e betume que assegura a coesão da mistura betuminosa. O mastique betuminoso apresenta uma percentagem relativamente elevada de betume, contribuindo para uma maior trabalhabilidade e durabilidade das misturas SMA (Brown & Mallick, 1995, Brown *et al.*, 1997, Brown & Haddock, 1997, CDOT, 2004, Lord, 2004 e Austroads, 2009).

3.2 OS AGREGADOS GROSSOS

3.2.1 INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS GROSSOS NO COMPORTAMENTO DAS MISTURAS SMA

— Influência da percentagem de agregados —

Os agregados (finos e grossos) representam em média cerca de 84 % da massa total de uma mistura betuminosa, formando cerca de 77 % do volume das misturas betuminosas, o que contribui para que assumam um papel de extrema importância no que concerne à promoção da resistência e absorção de grande parte dos esforços impostos pelos veículos como constatado por Epps & Monismith (1972), Huang & Grisham (1972), Karakouzian *et al.* (1996), Chen & Liao (2002), Mahmoud (2005) e Kwame (2006). Essa importância é tanto mais relevante, se considerado o caso específico das misturas SMA, onde somente os agregados grossos (sem considerar, portanto, os agregados finos) podem totalizar entre 60 % e 80 % da massa total da mistura betuminosa, preferencialmente entre 70 % e 75 % (Zichner, 1974), sendo comum adotar um intervalo entre cerca de 67 % e 76 % da massa total da mistura betuminosa, o que corresponde a cerca de 62 % a 70 % do volume da mistura betuminosa se considerada uma massa volúmica de 2,650 Mg/m³ para os agregados e de 1,030 Mg/m³ para o betume.

Assim, constata-se que a utilização de uma elevada percentagem de agregados grossos nas misturas SMA (em detrimento da utilização de frações intermédias de agregados) implica que sejam os agregados grossos a resistir e absorver maioritariamente os esforços de compressão impostos pelos veículos.

— Influência das propriedades geométricas —

Segundo Masad *et al.* (2001), Masad (2003), Al-Rousan (2004) e Masad *et al.* (2005), a geometria de uma partícula de agregado pode ser expressa através de três propriedades: forma, percentagem de superfícies esmagadas e partidas e textura da superfície. Estas propriedades distinguem-se pela diferente escala relativamente à dimensão do agregado (Sukhwani *et al.*, 2006), sendo segundo o SuperPave (1997), Bedi (2001) e Little *et al.* (2001) fundamentais para o adequado desempenho das misturas betuminosas, influenciando a resistência à deformação permanente e à fadiga, a resistência à derrapagem, a qual é fundamental nas misturas SMA uma vez que são aplicadas essencialmente como camada de desgaste, assim como a afinidade entre os agregados e o betume.

— Influência da forma —

No que concerne à forma, os agregados podem variar de cúbicos a não cúbicos e de achatados a não achatados. Misturas SMA que incorporam na sua estrutura, agregados com uma forma cúbica e não achatados exibem, por um lado, maior imbricamento e atrito interno, o que resulta numa maior estabilidade mecânica do que com agregados não cúbicos e/ou achatados.

Para assegurar um elevado imbricamento, sem colocar em causa a trabalhabilidade das misturas SMA, de acordo com as especificações aplicadas na Alemanha é recomendado a utilização de um valor máximo para o índice de forma (S_f) de 20 % (categoria S_{f20}), segundo o procedimento especificado pela norma EN 933-4.

Contudo, a avaliação da forma dos agregados através do índice de forma no caso das misturas SMA tende a não ser requerido (categoria S_{NR}). A avaliação da forma dos agregados para as misturas SMA tende antes a ser efetuada através do índice de achatamento o qual pode ser avaliado através do procedimento especificado na norma EN 933-3. De acordo com os estudos realizados por Vavrik (2000) e Austroads (2009), a percentagem de agregados achatados utilizados numa mistura betuminosa demonstra uma excelente correlação com a quebra de agregado que ocorre, aumentando a quebra com um aumento da percentagem de partículas achatadas.

A utilização de agregados com valores de achatamento elevado, conduz geralmente a uma diminuição da resistência à deformação permanente e à fadiga e consequentemente da durabilidade das misturas SMA, uma vez que a mistura de agregados apresenta uma maior tendência para fraturar durante a aplicação, assim como quando sujeita às solicitações impostas pelo tráfego (Sukhwani *et al.*, 2006).

Para assegurar um elevado imbricamento sem quebra de agregado, segundo os requisitos para as misturas SMA na Alemanha e nos EUA é comum a utilização de um valor máximo para o índice de achatamento (F_f) de 20 % (categoria F_{f20}).

— Influência da percentagem de superfícies esmagadas e partidas —

A função desempenhada pelos agregados grossos numa SMA conduz a que os mesmos tenham que apresentar uma elevada qualidade. Por esse motivo é comum ser recomendada a sua britagem, o que

permite segundo Fletcher *et al.* (2003) e Sukhwani *et al.* (2006) uma melhoria da forma das partículas, não afetando significativamente a textura dos agregados resultantes comparativamente à textura inicial. Por estes motivos é habitualmente recomendada a utilização de uma percentagem de partículas esmagadas e partidas igual a 100 % (categoria C_{100/0}), a qual se pode determinar de acordo com a norma EN 933-5. Nos EUA é recomendado que 100 % dos agregados grossos utilizados apresentem uma face britada e desses, 90 % devem ter duas faces britadas, o que permite melhorar o imbricamento e conseqüente resistência à deformação permanente das misturas SMA.

Apesar da melhoria do comportamento à deformação permanente decorrente da britagem dos agregados, segundo o estudo realizado por (Button *et al.*, 2006) foi constatado para misturas betuminosas convencionais do tipo betão betuminoso, que a utilização de agregados com maior número de faces britadas, porém com menor dimensão máxima nominal resultante da britagem (i.e. 9,5 mm), tendem a apresentar uma menor resistência à deformação permanente, independentemente da melhoria da forma dos agregados através da britagem, comparativamente à mesma mistura com agregados não britados e por conseguinte com maior dimensão máxima nominal. Tal estudo parece evidenciar que apesar da utilização de um maior número de faces britadas contribuir para o bom comportamento à deformação permanente de uma SMA, deve-se ter presente que a obtenção de um elevado desempenho à deformação permanente está mais dependente da dimensão máxima nominal dos agregados utilizada do que do seu número de faces.

Ainda no que concerne à recomendação da percentagem de agregados com faces britadas, segundo o estudo realizado por Little *et al.* (2001), foi constatado que o volume de vazios dos agregados grossos não compactados está relacionado com a resistência à deformação permanente e ao fendilhamento por fadiga de misturas betuminosas convencionais do tipo betão betuminoso. De acordo com o estudo, quanto maior o volume de vazios dos agregados grossos não compactados utilizados na mistura betuminosa maior é a sua resistência à deformação permanente. Segundo o mesmo estudo, é recomendada a especificação de um valor mínimo de percentagem de volume de vazios nos agregados grossos em vez de se impor uma percentagem mínima para uma ou duas faces britadas dos agregados.

— Influência da textura —

Relativamente à textura dos agregados, verifica-se um aumento da resistência das misturas betuminosas à deformação permanente e à fadiga quando se passa de um agregado de textura lisa para um de textura rugosa. Este aumento de resistência foi demonstrado por Kim *et al.* (1992), SHRP (1994) e Tutumluer *et al.* (2005), que constataram que misturas com agregados de textura mais rugosa apresentam melhor comportamento à deformação permanente e à fadiga. Este comportamento deve-se ao facto da percentagem de betume utilizada depender da rugosidade do agregado, ou seja, à medida que aumenta a rugosidade aumenta também a área de contacto existente para ligação entre o betume e os agregados, aumentando assim a absorção e adesão entre os agregados e o betume. Segundo Curtis *et al.* (1993), a adesão encontra-se ainda dependente da composição química do agregado utilizado.

— Influência das propriedades mecânicas —

As propriedades mecânicas visam avaliar, por um lado a resistência dos agregados quando sujeitos a ações impostas pelos processos de fabrico e/ou de aplicação e, por outro, o seu contributo para o desempenho das misturas onde são aplicadas. Entre as propriedades destacam-se três: a

resistência à fragmentação, a resistência ao desgaste por atrito, e a resistência ao polimento (Castelo-Branco & Ferreira, 2009).

Adicionalmente, em ambientes onde existe a probabilidade de ocorrência de ciclos de gelo-degelo é ainda comum a avaliação da resistência ao gelo-degelo.

— Influência da resistência à fragmentação —

A resistência dos agregados grossos à fragmentação sem que ocorra a quebra do agregado nos pontos de contacto tem particular importância no comportamento de uma mistura SMA uma vez que, como mencionado anteriormente, são os agregados grossos os principais responsáveis pela sua estrutura pétreo, estabilidade e resistência à deformação permanente.

Segundo a norma EN 1097-2 a avaliação da resistência à fragmentação pode ser realizada através do ensaio de Los Angeles, o qual apresenta uma boa correlação com a quebra dos agregados (Brown *et al.*, 1997), ou através do ensaio de resistência ao impacto (habitualmente utilizado apenas na Alemanha).

No caso da avaliação da resistência à fragmentação através do ensaio de Los Angeles, o aumento do valor do coeficiente de Los Angeles (*LA*) corresponde um aumento da quebra dos agregados quando as misturas betuminosas são compactadas. Desse ponto de vista seria ideal a utilização de agregados com uma elevada resistência à fragmentação para assegurar uma reduzida alterabilidade do imbricamento, responsável pela elevada resistência à deformação permanente.

A limitação do valor do coeficiente de Los Angeles evitará a reorganização da estrutura pétreo por quebra excessiva do agregado grosso, com inevitáveis efeitos negativos decorrentes da diminuição dos vazios disponíveis para preencher com mastique betuminoso, a qual torna difícil a garantia do volume de vazios pretendido para a mistura betuminosa SMA.

Inicialmente, Stuart (1992) começou por recomendar a utilização de um valor máximo de fragmentação de 40 % (categoria *LA*₄₀) para o fabrico de misturas SMA, devendo a quebra do agregado durante o processo de fabrico ser tida em consideração segundo Collins *et al.* (1997) aquando da definição da curva granulométrica da mistura SMA.

Posteriormente, segundo o estudo realizado pelo NCAT entre 1994 e 1998 (Brown *et al.*, 1998) foi concluído que os agregados grossos a utilizar nas misturas SMA devem apresentar um limite máximo de 30 % (categoria *LA*₃₀) (Brown *et al.*, 1997 e Austroads, 2009).

Na Europa é comum a utilização de valores para o coeficiente de Los Angeles mais conservativos, sendo comum a utilização de uma categoria de *LA*₂₀ ou de *LA*₂₅. Categorias de *LA*₃₀ ou *LA*₃₅, embora não sejam comuns, quando recomendadas apenas se aplicam a estradas com um tráfego muito reduzido ou não traficáveis por veículos. No caso da Alemanha é recomendada a utilização de agregados grossos que assegurem uma categoria para resistência à fragmentação segundo o ensaio de Los Angeles de *LA*₂₀ ou respeitem a categoria de *SZ*₁₈ segundo o ensaio de resistência ao impacto, que corresponde à categoria mais restritiva, de acordo com a norma EN 13043.

Apesar da categoria do coeficiente Los Angeles habitualmente recomendada a nível mundial ser limitada a um máximo de *LA*₃₀, exemplos existem de aplicações e recomendações com categorias superiores, as quais se cingem em grande parte a alguns Estados dos EUA e que decorrem fundamentalmente da dificuldade existente, localmente, para obtenção de materiais com características adequadas para o fabrico de misturas SMA. Por exemplo os Estados do Missouri

(McDaniel, 1992) e da Virginia (VDOT, 2002) recomendam a utilização de valores de máximos de coeficiente de Los Angeles de 35 % (categoria LA_{35}) e de 40 % (categoria LA_{40}), respetivamente. Também o Estado da Geórgia e do Wisconsin têm efetuado diversas aplicações de SMA onde utilizam agregados com um coeficiente de Los Angeles até 45 % (categoria LA_{50}) (Brown *et al.*, 1998).

Quando se pretenda recomendar um coeficiente de Los Angeles mais elevado para os agregados grossos a utilizar numa mistura SMA as seguintes conclusões podem ser tidas em consideração, segundo Little *et al.* (2001) a quebra dos agregados está mais relacionada com a magnitude da carga que é aplicada no pavimento do que com a repetição das cargas. Segundo esse estudo, a repetição de cargas afeta principalmente o desgaste dos agregados.

Segundo Schmiedlin & Bischoff (2002), da experiência da aplicação de SMA no Estado do Wisconsin constatou-se que a resistência à fragmentação dos agregados utilizados no fabrico das SMA para camada de desgaste apresentou uma elevada correlação com o fendilhamento por reflexão de fendas. De acordo com o estudo observou-se nos pavimentos em que foram aplicadas misturas SMA como camada de desgaste com agregados com valores de coeficiente de Los Angeles entre 30 % (categoria LA_{30}) e 60 % (categoria LA_{50}) após aplicadas durante cinco anos, apresentavam fendilhamento resultante da reflexão de fendas em cerca de 62 % da área pavimentada. No caso em que foram utilizadas misturas SMA como camada de desgaste com agregados com coeficiente de Los Angeles entre 15 % (categoria LA_{15}) e 30 % (categoria LA_{30}), após cinco anos, a área pavimentada totalizava 19 % de fendilhamento resultante da reflexão de fendas. Todavia, apesar da diferença entre os valores de LA utilizados, em ambos os casos a deformação permanente era reduzida.

— Influência da resistência ao desgaste por atrito —

O ensaio de micro-Deval tende a não ser comumente especificado para avaliar os agregados nas misturas SMA, porém há países como a Noruega que requerem a sua utilização, especificando agregados com uma categoria M_{DE10} (segundo o procedimento especificado na norma EN 1097-1), devendo o valor do coeficiente de micro-Deval ser menor ou igual a 7 (M_{DE10}) para um tráfego médio diário (ADT) superior a 15 000 veículos.

De acordo com o estudo realizado por Gatchalian *et al.* (2006) é recomendada a utilização do ensaio de micro-Deval em combinação com a análise da variação da granulometria e da forma decorrente do processo de compactação, como procedimento para avaliar a resistência dos agregados à degradação. Segundo o mesmo estudo, por um lado, agregados que não assegurem o valor de perda de massa segundo o ensaio de micro-Deval, podem ainda assim ser utilizados, caso a variação da granulometria seja minimizada a limites aceitáveis. Por outro lado, agregados que tenham uma reduzida perda de massa segundo o ensaio de micro-Deval devem ainda assim ser avaliados no que concerne à variação da granulometria, como forma de se assegurar que não vão apresentar degradação na mistura, não devendo ser utilizados caso se verifique serem suscetíveis de quebra, exibida através de uma variação da granulometria inadequada. Este estudo demonstrou que os agregados podem ser suscetíveis à quebra aquando da aplicação e serem resistentes ao desgaste por atrito.

— Influência da resistência ao polimento —

A resistência dos agregados grossos ao polimento é fundamental, uma vez que as misturas SMA são essencialmente aplicadas como camada de desgaste (Nicholls, 1998), sendo por esse motivo

recomendado que o agregado seja proveniente de uma origem que garanta agregados com elevada resistência ao polimento acelerado (PSV).

Uma maior exigência para com esta propriedade, está relacionada com o facto das misturas SMA apresentarem uma maior vida útil comparativamente às misturas betuminosas convencionais. Tal implica que as misturas SMA tenham de suportar um maior volume de tráfego e de cargas, mantendo um desempenho funcional adequado às exigências dos utentes da estrada, minimizando assim a necessidade de manutenção/conservação antecipada da camada em mistura SMA, a qual poderia inviabilizar uma adequada relação custo/benefício da aplicação por ausência de maximização do seu potencial de desempenho estrutural.

Recorrentemente quando se fala de desempenho é dada particular relevância ao desempenho estrutural das misturas betuminosas, nomeadamente no que concerne à deformação permanente e à fadiga. Porém quando se avaliam misturas de alto desempenho como é o caso das misturas SMA, é imprescindível considerar o desempenho funcional, aspeto que se pretende ter em consideração através do conceito de *tire-on-stone* proposto no presente trabalho (ver ponto 8.4.3).

Para otimizar o desempenho funcional, no que concerne à resistência à derrapagem, no caso das misturas SMA, é comum ser recomendado para os agregados grossos um coeficiente de polimento acelerado maior ou igual a 50 (categoria PSV_{50}) segundo o ensaio de polimento acelerado especificado na norma EN 1097-8. Porém a utilização de valores superiores a 55 (categoria PSV_{56}) é preferível para se garantir o atrito a longo prazo (Drueschner, 2005 e Austroads, 2009).

— Influência das propriedades térmicas e de meteorização —

— Influência da resistência ao gelo-degelo —

A resistência ao gelo-degelo pode ser avaliada numa primeira fase através da avaliação da absorção de água segundo a norma EN 1097-6 podendo ser classificada nas categorias WA_{241} ou WA_{242} , que correspondem aos limites máximos de absorção de água de 1 % e 2 %, respetivamente. Para materiais potencialmente sensíveis ao gelo-degelo com valores de absorção de água superiores aos indicados anteriormente, a avaliação da resistência ao gelo-degelo poderá ser realizada segundo a norma EN 1367-1 (resistência ao gelo-degelo) ou segundo a norma EN 1367-2 (ensaio do sulfato de magnésio).

Nos EUA, Bulgária e Índia a avaliação da resistência ao gelo-degelo, é recomendada para as misturas SMA, com a utilização de um valor máximo equivalente a MS_{18} (segundo a norma EN 1367-2).

3.2.2 ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES EXIGIDAS PARA OS AGREGADOS GROSSOS

No Anexo I-D é apresentada uma compilação das propriedades dos agregados grossos e respetivos valores recomendados internacionalmente para as misturas SMA, a qual serve de base à análise que se efetua no presente ponto.

Para além das propriedades referidas no ponto 3.2 também se incluiu a afinidade entre os agregados e o betume avaliada segundo a norma EN 12697-11, apesar da avaliação desta propriedade refletir a interligação entre dois componentes distintos. Como tal o resultado não depende exclusivamente das características dos agregados para os quais se avalia o desempenho.

Segundo a informação compilada é possível verificar que as propriedades para os agregados grossos habitualmente recomendadas se referem à sua geometria, avaliada através da percentagem de material britado a utilizar (*C*) ou percentagem de material com uma e/ou duas faces britadas, do índice de achatamento (*F_I*), às propriedades mecânicas avaliadas através do ensaio de Los Angeles (*LA*), do ensaio de polimento acelerado (*PSV*) e às propriedades térmicas e de meteorização avaliadas através da resistência à ação do gelo-degelo (*WA₂₄*; *MS*) aplicada em países onde tende a ocorrer queda de neve. Entre estas propriedades, apenas a avaliação da resistência à ação do gelo-degelo, tende a não ser avaliada em Portugal para as misturas betuminosas, recomendando-se a sua avaliação nas misturas SMA, apenas em ambientes sujeitos a ciclos de gelo-degelo e quando o valor da absorção de água determinada assim o requeira (absorção de água superior a 2 %).

Para além das propriedades comumente avaliadas para as misturas SMA, no Anexo I-D são apresentadas outras propriedades menos comuns e portanto requeridas por menos países. Entre estas propriedades pode-se indicar:

- geométricas, com a avaliação do índice de forma (Alemanha);
- mecânicas, com a avaliação através do ensaio de impacto (Alemanha e Índia) e o ensaio de micro-Deval (Noruega e Escócia);
- outras, com a avaliação da afinidade entre os agregados e o betume (Reino Unido, Holanda, Bulgária e Argentina).

O ensaio de impacto não tende a ser um ensaio recomendado a nível nacional pelo que não será considerada a sua recomendação no presente trabalho. No caso do índice de forma este tende a ser utilizado em complemento do índice de achatamento para avaliação da forma dos agregados, pelo que se considera pertinente a sua recomendação a nível nacional para o estudo de misturas SMA.

Relativamente ao ensaio de micro-Deval é habitualmente recomendado em Portugal, pelo que se considera adequada a sua incorporação nos ensaios a recomendar para avaliação dos agregados grossos para misturas SMA fabricadas em Portugal.

A afinidade entre os agregados e o betume é dos ensaios menos comuns, o que se observa ter uma maior preponderância de países a proceder à sua recomendação. A nível nacional a avaliação desta propriedade é usualmente recomendada para as misturas betuminosas, porém com a indicação de valor declarado sem imposição de limites.

No Quadro 3.1 apresenta-se um resumo das propriedades dos agregados grossos e respetivos valores recomendados internacionalmente para as misturas SMA, baseado no que foi referido no ponto 3.2 e na informação compilada no Anexo I-D.

A análise das propriedades dos agregados grossos é efetuada segundo o nível de tráfego e tipo de mistura SMA, tendo-se considerado dois tipos de tráfego: médio/elevado e reduzido. O tráfego médio/elevado corresponde a um tráfego médio diário anual (TMDA) igual ou superior a 5000 veículos para o qual se deve utilizar misturas SMA com dimensão máxima nominal do agregado igual ou superior a 8 mm. No caso do tráfego reduzido este é considerado quando inferior a um TMDA de 5000 veículos sendo recomendada a utilização de misturas SMA com agregados de dimensão máxima nominal igual ou inferior a 8 mm.

A divisão efetuada no tráfego tem por base a utilização de um intervalo representativo dos elementos do tráfego para cada tipo de mistura SMA compilados no Anexo I-D, e utilizados internacionalmente

para definição das propriedades dos agregados grossos. Adicionalmente a divisão definida no tipo de mistura SMA a utilizar tem em consideração o que foi abordado no ponto 2.3.2, em que as misturas SMA com dimensão máxima nominal igual ou superior a 8 mm, tendem a ser aplicadas para estradas com tráfego médio/elevado, como sejam autoestradas e itinerários principais. No caso de estradas com tráfego reduzido, como sejam estradas municipais e vias urbanas são recomendadas misturas com dimensão máxima nominal do agregado igual ou inferior a 8 mm, o que corrobora a informação compilada no Anexo I-D.

Quadro 3.1 – Resumo das propriedades dos agregados grossos recomendadas internacionalmente com influência no comportamento das misturas SMA

Propriedades dos agregados grossos		Tráfego Reduzido (TMDA < 5000) SMA ≤ 8 mm	Tráfego Médio/Elevado (TMDA ≥ 5000) SMA ≥ 8 mm
Propriedades geométricas	C	$C_{50/20} - C_{90/1}$	$C_{95/1} - C_{100/0}$
	FI	$FI_{25} - FI_{30}$	$FI_{10} - FI_{20}$
	SI	$\leq SI_{20}$	
Propriedades mecânicas	LA	$LA_{15} - LA_{35}^{1)}$	$LA_{15} - LA_{30}$
	SZ	$\leq SZ_{18}$	
	PSV	$PSV_{40} - PSV_{48}$	$PSV_{50} - PSV_{56}$
	M_{DE}	$M_{DE10} - M_{DE15}$	
Propriedades térmicas e de meteorização	WA₂₄ ; MS	$WA_{241} - WA_{242}; \leq MS_{18}$	
Outras	Afinidade	$\geq 80 \%$	

Legenda: 1) para camadas não sujeitas a tráfego; C – percentagem de material britado; FI – índice de achatamento; SI – índice de forma; LA – Los Angeles; SZ – ensaio de impacto; PSV – ensaio de polimento acelerado; MDE – micro-Deval; WA24 – Absorção de água; MS – ensaio do sulfato de magnésio

De acordo com o Quadro 3.1, é possível constatar, como seria espectável, para as misturas a aplicar em estradas com tráfego reduzido, uma menor exigência relativamente aos limites definidos para as propriedades recomendadas para os agregados grossos. Essa menor exigência tende a ser mais perceptível relativamente à percentagem de partículas britadas a utilizar, índice de achatamento e coeficiente de polimento acelerado, resultante de uma menor exigência por parte do tráfego que circula sobre a SMA. O mesmo não sucede para o índice de forma, ensaio de impacto, micro-Deval, afinidade entre os agregados e o betume e por fim a resistência à ação do gelo-degelo, para os quais se tende a especificar os mesmos limites independentemente do tipo de tráfego ou dimensão máxima nominal dos agregados utilizados.

Da análise das propriedades recomendadas para os agregados grossos a nível internacional, importa aferir o seu adequado enquadramento a nível nacional, considerando os agregados disponíveis no nosso país. Essa análise é fundamental para se poder conhecer quais as propriedades dos agregados grossos a recomendar para as SMA a fabricar em Portugal e conseqüentemente se, os agregados existentes permitem o fabrico de misturas SMA como definido internacionalmente.

Para o efeito, teve-se em consideração o estudo realizado por Castelo-Branco & Ferreira (2009), que se reveste da máxima importância no panorama nacional pela dimensão amostral utilizada para levantamento das características dos agregados produzidos em Portugal.

De acordo com o estudo de Castelo-Branco & Ferreira (2009) é efetuado no presente trabalho uma análise por Distrito e Regiões Autónomas, considerando as propriedades dos agregados grossos habitualmente recomendadas para as misturas SMA. A análise concretizada tem ainda por base uma preocupação de sustentabilidade ambiental. Por esse motivo apenas foram considerados os limites das propriedades de materiais pétreos que correspondam no mínimo a 50 % do material existente com essas propriedades relativamente à totalidade de materiais que são produzidos em cada Distrito e Regiões Autónomas. No Quadro 3.2 é possível observar as propriedades e respetivos limites para os agregados grossos existentes por distrito em Portugal Continental e Regiões Autónomas.

Quadro 3.2 – Propriedades dos agregados grossos existentes em Portugal Continental e Regiões Autónomas (adaptado de Castelo-Branco & Ferreira, 2009)

Localização	Distrito/Região Autónoma	Natureza petrográfica do agregado	FI	SI	LA ¹⁾	PSV ¹⁾	M _{DE}	WA ₂₄ ²⁾					
Portugal Continental	Viana do Castelo	Granito Seixo Granodiorito	F ₁₅ - F ₂₀	S ₁₅ - S ₂₀	LA ₃₀	PSV ₅₀	M _{DE} 10 - M _{DE} 15	1,1 - 1,2					
	Braga	Granito Granodiorito Reciclados			LA ₃₅		M _{DE} 15 ¹⁾	1,2					
	Vila Real	Granito			LA ₄₀		M _{DE} 10 - M _{DE} 15	1,1 - 1,2					
	Bragança	Granito Gabro Seixo											
	Porto	Granito Seixo			LA ₃₅								
	Aveiro	Granito Gnaisse Seixo			LA ₂₅								
	Viseu	Granito			LA ₄₀				M _{DE} 15 ¹⁾	1,2			
	Guarda	Granito											
	Castelo Branco	Granito			LA ₂₅								
	Coimbra	Calcário Granito Seixo			LA ₃₀				M _{DE} 10 - M _{DE} 15	1,1 - 2,0			
	Leiria	Calcário Seixo											
	Santarém	Calcário Seixo Basalto			F ₁₅ - F ₂₅				S ₁₅ - S ₂₅	LA ₂₅	1,1 - 2,9		
	Portalegre	Granito Dolomito			F ₁₅ - F ₂₀				S ₁₅ - S ₂₀	LA ₃₀	M _{DE} 15	1,2	
	Lisboa	Calcário Basalto Seixo Reciclados			F ₁₅ - F ₂₅				S ₁₅ - S ₂₅	LA ₃₅	M _{DE} 10 - M _{DE} 15	1,1 - 2,9	
	Setúbal	Calcário Granodiorito Grauvaque			F ₁₅ - F ₂₀				S ₁₅ - S ₂₀	LA ₃₀	PSV ₄₄	M _{DE} 15	2,0
	Évora	Mármore Granito Granodiorito Dolomito								LA ₃₅	PSV ₅₀	M _{DE} 10 - M _{DE} 35	1,2
Beja	Riolito/Dacito Seixo Grabo	F ₁₅	S ₁₅ - S ₂₀	LA ₂₀	PSV ₅₀	M _{DE} 10 - M _{DE} 15			1,1				
Faro	Calcário Sienito	F ₁₅ - F ₂₀		LA ₃₀		PSV ₄₄			M _{DE} 15	2,0			
Regiões Autónomas	Açores	Basalto	F ₂₀ - F ₂₅	S ₂₀ - S ₂₅	LA ₂₅	PSV ₅₀	M _{DE} 15	2,9					
	Madeira	Basalto			LA ₂₀								

Legenda: 1) categorias máximas; 2) valores médios de absorção; C – percentagem de material britado; FI – índice de achatamento; SI – índice de forma; LA – Los Angeles; SZ – ensaio de impacto; PSV – ensaio de polimento acelerado; MDE – micro-Deval; WA24 – Absorção de água; MS – ensaio do sulfato de magnésio

No Quadro 3.2 é possível constatar para os diversos distritos de Portugal Continental que os materiais disponíveis para extração apresentam de uma forma geral valores semelhantes no que concerne aos índices de forma e de achatamento, sendo comum as categorias variarem entre Fl_{15} a Fl_{20} e Sl_{15} a Sl_{20} , respetivamente. No que concerne à resistência ao polimento acelerado é comum a obtenção de uma categoria de PSV_{50} , à exceção do distrito de Setúbal e de Faro. Adicionalmente segundo a análise é improvável a obtenção de uma categoria de PSV_{56} . Relativamente à absorção de água observam-se valores médios variáveis entre 1,1 % e 1,2 % podendo em alguns distritos atingir valores médios máximos de 2,9 %. No caso da resistência ao desgaste por atrito é possível obter materiais em todo o Portugal Continental com uma categoria de MDE_{15} . Quando analisada a resistência à fragmentação através do ensaio de Los Angeles observa-se ao contrário das restantes propriedades uma grande diversidade de resistências para os diferentes distritos, variando a categoria entre LA_{20} e LA_{40} .

De uma forma geral, se consideradas as propriedades dos agregados grossos existentes em Portugal Continental e considerando os limites habitualmente definidos a nível internacional (Quadro 3.1), é possível aferir a dificuldade em garantir uma elevada resistência à fragmentação, onde as categorias a respeitar estão habitualmente entre LA_{15} e LA_{30} , situação que apenas se verifica para 10 distritos dos 18 analisados em Portugal Continental.

Se adicionalmente se considerar, como observado no ponto 0 que este tipo de mistura betuminosa é essencialmente aplicada como camada de desgaste e que apresenta um elevado desempenho estrutural, requer como observado no ponto 3.2.1 a utilização de agregados com uma elevada resistência ao polimento acelerado, tornando difícil a obtenção de materiais capazes de assegurar em simultâneo uma categoria de LA_{20} e uma categoria de PSV_{50} . Situação que apenas se verifica para o distrito de Beja. Porém, se considerado uma categoria de LA_{30} em simultâneo com uma categoria de PSV_{50} é possível ter 8 distritos como sejam Viana do Castelo, Aveiro, Castelo Branco, Coimbra, Leiria, Santarém, Portalegre e Beja.

Quando realizada a mesma análise para as Regiões Autónomas, constatamos um cenário diferente resultante do facto dos materiais disponíveis serem de origem vulcânica. Por essa razão, observam-se as seguintes diferenças em relação ao que já havia sido constatado para Portugal Continental: os limites obtidos para os índices de forma e de achatamento demonstram uma diminuição de um nível na categoria variando entre Sl_{20} a Sl_{25} e Fl_{20} a Fl_{25} , respetivamente. Relativamente à resistência ao polimento acelerado e resistência ao desgaste por atrito em meio húmido mantêm-se as categorias passíveis de serem obtidas de PSV_{50} e de MDE_{15} , respetivamente. No caso da absorção de água observam-se valores médios mais elevados de 2,9 %, o que não sendo uma questão relevante do ponto de vista do efeito de gelo/degelo para as Regiões Autónomas, reveste-se de particular importância no que concerne à definição da quantidade de betume a utilizar na mistura SMA aquando da sua formulação. Das várias propriedades a resistência à fragmentação é a única em que existe uma melhoria na categoria obtida com valores a variar entre LA_{20} e LA_{25} .

3.2.3 RECOMENDAÇÕES PARA AS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS GROSSOS A UTILIZAR EM PORTUGAL NAS MISTURAS SMA

A partir da análise efetuada em 3.2.2, no Quadro 3.3 são apresentadas as recomendações no que refere aos valores limite a definir para as propriedades dos agregados grossos a utilizar em Portugal para o fabrico de misturas SMA. Entre as propriedades apresentadas não se considera a avaliação da resistência fragmentação através do ensaio de impacto dado não ser comum o seu uso a nível internacional e nacional. Adicionalmente às propriedades habitualmente especificadas, recomenda-se a avaliação das massas volúmicas, baridade e absorção de água dos agregados grossos utilizados. As propriedades apresentadas no Quadro 3.3 têm ainda em consideração o CETO (2009), tendo-se

para o efeito utilizado como referência a propriedades dos agregados recomendadas para o micro betão betuminoso (AC 10 surf ligante – 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 (2009), o AC 10 (mBBr) e a MBR-BBM serem as misturas betuminosas que apresentam uma curva granulométrica mais próxima de uma mistura SMA.

Quadro 3.3 – Recomendações para as propriedades dos agregados grossos a utilizar no fabrico de misturas SMA em Portugal

Propriedades dos agregados grossos		Portugal Continental		Regiões Autónomas	
		Tráfego Reduzido (TMDA < 5000) SMA ≤ 8 mm	Tráfego Médio/Elevado (TMDA ≥ 5000) SMA ≥ 8 mm	Tráfego Reduzido (TMDA < 5000) SMA ≤ 8 mm	Tráfego Médio/Elevado (TMDA ≥ 5000) SMA ≥ 8 mm
Propriedades físicas	Massa volúmica	ρ_{rd} Declarado		ρ_{rd} Declarado	
	Baridade	$\rho_{b,pa}$ Declarado		$\rho_{b,pa}$ Declarado	
	Absorção de água	≤ 1 %		≤ 2 %	
Propriedades geométricas	C	$C_{90/1}$	$C_{100/0}$	$C_{90/1}$	$C_{100/0}$
	FI	FI_{20}	FI_{15}	FI_{25}	FI_{20}
	SI	SI_{20}		SI_{20}	
Propriedades mecânicas	LA	LA_{25}	LA_{20}	LA_{25}	LA_{20}
	PSV	PSV_{48}	PSV_{50}	PSV_{48}	PSV_{50}
	M_{DE}	M_{DE15}		M_{DE15}	
Propriedades térmicas e de meteorização	WA_{24} ; MS	WA_{241} ; MS_{18}		WA_{242} ; MS_{18}	
Outras	Afinidade	≥ 80 %		≥ 80 %	

Legenda: ρ_{rd} – massa volúmica das partículas secas; $\rho_{b,pa}$ – baridade das partículas ativas (ver ponto 3.2.4)
 C – percentagem de material britado; FI – índice de achatamento; SI – índice de forma; LA – Los Angeles;
 PSV – ensaio de polimento acelerado; M_{DE} – micro-Deval; WA_{24} – Absorção de água; MS – ensaio do sulfato de magnésio

Sempre que se utilizem materiais que não enquadrem nas categorias recomendadas no Quadro 3.3, devem-se efetuar, nomeadamente o estudo de formulação, trecho experimental e acompanhamento da obra, de modo a avaliar o desempenho da mistura SMA e desse modo validar a utilização de materiais com diferentes categorias para as propriedades apresentadas no Quadro 3.3. Este aspeto é particularmente importante no que concerne à resistência à fragmentação e ao polimento acelerado (no caso de misturas para camadas de desgaste), dada a dificuldade em Portugal para se obterem materiais que respeitem em simultâneo as categorias mínimas para as duas propriedades.

Complementarmente, sempre que não se verifiquem os requisitos da propriedade referente à fragmentação e com o objetivo de aumentar o leque de materiais disponíveis para utilizar no fabrico de misturas SMA, poderá ser aplicada, nomeadamente, a metodologia recomendada pelo Gatchalian *et al.* (2006), anteriormente mencionada no ponto 3.2.1, a qual recorre à avaliação das propriedades mecânicas através da utilização do ensaio de micro-Deval em combinação com a análise

da variação granulométrica dos agregados grossos, decorrente do processo de compactação para avaliar a resistência dos agregados à degradação.

Assim e efetuando uma adaptação do que é indicado por Castelo-Branco & Ferreira (2009) para o caso específico das misturas SMA, as recomendações realizadas permitem nomeadamente as seguintes vantagens:

- aos donos de obra disponibilizar informação útil de referência para os valores limite a requerer para os diferentes parâmetros no âmbito das misturas SMA aplicadas como camada de desgaste, procurando equilibrar o binómio “bom desempenho das estruturas onde os agregados são utilizados/real capacidade de fornecimento dos materiais que possam cumprir as especificações definidas”, otimizando os custos das obras e minimizando os impactes ambientais decorrentes do potencial incremento das distâncias de transporte desses materiais;
- aos projetistas e construtores disponibilizar informação útil para a seleção dos parâmetros e/ou materiais a especificar e a utilizar em obra.

3.2.4 EFEITO DE *STONE-ON-STONE* NO COMPORTAMENTO DAS MISTURAS SMA

A adoção de uma estrutura caracterizada por contacto *stone-on-stone* conduz a que resistência à deformação permanente seja assegurada essencialmente pelas propriedades dos agregados e não tanto pelas propriedades do betume, ao contrário do que sucede no caso específico das misturas betuminosas convencionais densas. Este facto conduz a que as propriedades dos agregados, em especial dos agregados grossos, utilizados na SMA apresentem um papel fundamental para o seu adequado desempenho.

A obtenção de um efeito de *stone-on-stone* tem como pressuposto numa primeira fase a determinação do volume de vazios na estrutura pétreia de agregados grossos ou de partículas ativas, consoante o método de formulação utilizado. Numa fase subsequente é necessário que a quantidade de mastique betuminoso utilizada não afaste os agregados grossos ou partículas ativas impossibilitando o contacto direto entre as partículas.

Os pressupostos anteriormente indicados conduzem a diferentes questões, nomeadamente como determinar a quantidade exata de agregados grossos a utilizar, assim como de mastique betuminoso para preencher os vazios do esqueleto criado pelos agregados grossos sem com isso afetar o efeito de *stone-on-stone*, tendo ainda posteriormente de se assegurar a porosidade necessária na mistura SMA compactada. Assim é importante compreender alguns dos pressupostos e conceitos que têm sido propostos para tentar alcançar esse objetivo, o qual constitui uma das principais questões no que concerne à formulação das misturas SMA.

É comum na literatura o efeito de *stone-on-stone* ser definido como sendo assegurado pelos agregados grossos, porém essa afirmação nem sempre está correta. Esta definição tem apenas por base, os intervalos definidos para as dimensões que as partículas de agregado devem respeitar, sendo feita de forma independente da dimensão máxima nominal do agregado utilizado na mistura de agregados onde essas partículas possam ser incorporadas. Ou seja, uma partícula com dimensão igual a 2 mm corresponde a um agregado grosso, independentemente de estar incorporada numa mistura SMA 4 ou numa mistura SMA 22. Todavia não é possível deixar de questionar se esse agregado terá em ambas as misturas SMA igual importância na função de resistir e absorver os esforços impostos pelos veículos sem se degradar ou, se terá mais como função preencher os vazios e assegurar em conjunto com o restante mastique betuminoso a coesão da mistura betuminosa.

Vavrik *et al.* (2002) introduz um importante contributo ao redefinir agregado grosso com base na teoria de arranjo estrutural das partículas habitualmente utilizada para os betões de cimento. Segundo os autores, um agregado grosso deverá ser definido como correspondendo às partículas de agregado de maior dimensão que quando colocadas numa unidade de volume são responsáveis por criar vazios, sendo os agregados finos constituídos pelas partículas que conseguem preencher os vazios criados pelos agregados grossos.

A divisão entre agregado grosso e agregado fino deverá então ser efetuada através de um peneiro designado de peneiro de controlo primário (PCS - *Primary Control Sieve*) que depende da dimensão máxima nominal do agregado utilizado na mistura betuminosa. Segundo Vavrik *et al.* (2002) e de acordo com a revisão bibliográfica realizada sobre estudos de análise bidimensional e tridimensional de arranjo das partículas de agregados, os autores selecionaram o rácio do diâmetro (relação entre o peneiro de controlo primário e a dimensão máxima nominal do agregado) como sendo igual a 0,22. Segundo os autores em média é expectável que uma partícula com dimensão igual a 0,22 da dimensão máxima nominal do agregado (D) preencha os vazios criados pelas partículas de maior dimensão.

De acordo com a definição de um rácio de 0,22 escolhida por Vavrik *et al.* (2002) para a relação entre o peneiro de controlo primário e a dimensão máxima nominal do agregado (D) pode-se obter os peneiros função da dimensão máxima nominal do agregado utilizada na mistura betuminosa, como se pode observar no Quadro 3.4. O peneiro de controlo primário é posteriormente definido como o peneiro mais próximo do valor obtido da multiplicação da dimensão máxima nominal do agregado com 0,22.

Quadro 3.4 – Peneiro de controlo primário (Vavrik *et al.*, 2002)

Dimensão máxima nominal do agregado (mm)	Dimensão máxima nominal do agregado \times 0,22 (mm)	Peneiro de controlo primário (mm)
37,5	8,25	9,5
25,0	5,50	4,75
19,0	4,18	4,75
12,5	2,75	2,36
9,5	2,09	2,36
4,75	1,05	1,18
2,36	0,52	0,600
1,18	0,26	0,300
0,600	0,13	0,150
0,300	0,07	0,075

Este conceito de rácio de 0,22 é posteriormente utilizado como base para métodos de formulação de misturas, como seja o caso do método de Bailey que será posteriormente avaliado no capítulo 4. Contudo, estudos como Shashidhar & Gopalakrishnan (2006) questionam a base teórica da definição de um valor de 0,22, pelo facto de não ser claro se os materiais com dimensão inferior à obtida pelo rácio do diâmetro vão ser responsáveis por desenvolver vazios ou por preencher os vazios criados pelos agregados grossos. Segundo Vavrik (2000) e Yu (2012) o arranjo estrutural que as partículas tomam é função:

- do tipo e quantidade de energia de compactação utilizada. Diferentes métodos de compactação vão aplicar diferentes níveis de energia durante a compactação dos materiais, resultando em diferentes tipos de arranjo estrutural;
- da forma dos agregados. Estudos têm demonstrado que agregados não cúbicos e/ou achatados tendem a partir e a rearranjarem-se durante a compactação ao invés dos agregados cúbicos e/ou não achatados que tendem a formar uma estrutura pétreia mais estável;
- da textura das partículas utilizadas. As partículas lisas relativamente a partículas com superfície rugosa permitem um arranjo estrutural com uma maior baridade;
- da distribuição granulométrica utilizada. Estruturas pétreas constituídas por agregados unidimensionais não irão compactar de forma tão densa como uma mistura de agregados composta por uma distribuição contínua;
- resistência das partículas. Agregados com menor resistência à fragmentação irão degradar-se mais do que os agregados com maior resistência e dessa forma conduzir um aumento da baridade no arranjo das partículas.

Do mesmo modo, segundo Shashidhar & Gopalakrishnan (2006) este conceito não tem em consideração o desempenho da mistura betuminosa, pois a resistência da mistura à compressão e ao corte não decorre apenas de colocarmos os agregados necessários num espaço inferior a $0,22 \cdot D$.

Ainda assim a tendência atual nas misturas SMA é para uma crescente definição da dimensão mínima dos agregados grossos com base na dimensão máxima nominal dos agregados (D) utilizados na mistura betuminosa, isto é, a dimensão mínima para definir os agregados grossos será diferente consoante se trate de uma mistura SMA 7 ou SMA 19 (Austroads, 2009).

Tal variação do peneiro de referência para definição dos “agregados grossos” (partículas ativas) responsáveis por assegurar um elevado imbricamento nas misturas SMA, decorre nomeadamente dos diversos estudos realizados por Brown & Manglorkar (1993) e Brown & Mallick (1994) no âmbito do estudo Brown *et al.* (1998). Nestes estudos observou-se que o VMA das misturas SMA 12,5 ou com dimensão maior são muito sensíveis a pequenas variações na percentagem de material passado no peneiro de referência 4,75 mm, comparativamente a uma mistura betuminosa convencional. Sendo essa influência variável consoante a dimensão máxima nominal dos agregados utilizados na mistura betuminosa. Destes estudos observou-se ainda que, para se assegurar uma elevada percentagem de betume requerida para este tipo de mistura betuminosa, seria necessário utilizar uma estrutura descontínua de “agregados grossos” (partículas ativas) para a qual se obtinha o VMA máximo, reduzindo este à medida que se adiciona os “agregados finos” (partículas passivas), fíler, aditivos e betume, voltando o VMA a aumentar quando a quantidade de mastic betuminoso é excessiva, afastando as partículas ativas e reduzindo assim a estabilidade e a resistência à deformação permanente da mistura betuminosa. Com o objetivo de otimizar o efeito de *stone-on-stone* e a quantidade de betume aplicada nas SMA será posteriormente avaliado o VMA nas misturas SMA estudadas, aquando da Fase 4 do estudo experimental.

Apesar de internacionalmente ser comum, como observado anteriormente, a utilização do termo de agregado grosso, independentemente da dimensão mínima das partículas resultantes da dimensão máxima dos agregados utilizados numa SMA, considera-se oportuno no presente trabalho manter a designação de agregado grosso apenas para os materiais com dimensão mínima de 2 mm. Assim qualquer referência a agregados com um limite na dimensão mínima distinta da anteriormente referida, será feita como “partículas ativas” ou “partículas passivas”. Como exemplo, caso seja considerado o peneiro de referência 4,75 mm para os agregados grossos, todo o material de dimensão igual ou

superior a 4,75 mm será designado como “partículas ativas” e o material de dimensão inferior até uma dimensão de 0,063 mm como “partículas passivas”.

Assim e redefinindo o que foi indicado por Vavrik *et al.* (2002), uma partícula ativa deverá ser definida como correspondente às partículas de agregado de maior dimensão, cuja dimensão mínima é definida por um peneiro de referência, e que quando colocadas numa unidade de volume são responsáveis por criar vazios. As partículas passivas constituídas pelas partículas de dimensão inferior ao peneiro de referência até uma dimensão mínima de 0,063 mm que conseguem preencher os vazios criados pelas partículas ativas.

De acordo com a classificação dos agregados utilizada nos EUA para as misturas SMA, é definido um peneiro de referência (*break point sieve*, na terminologia anglo-saxónica) que define o limite inferior a adotar para a dimensão das partículas ativas. Esse peneiro de referência é função da dimensão máxima nominal do agregado (D , correspondente ao peneiro seguinte de malha superior ao peneiro onde ficam retidos pelo menos 10 % de agregados) utilizada no fabrico de uma mistura SMA. No Quadro 3.5 são apresentados os peneiros de referência para as partículas ativas a utilizar segundo a NAPA (1999).

Quadro 3.5 – Peneiro de referência para definição das partículas ativas (NAPA, 1999)

Dimensão máxima nominal do agregado (mm)	Peneiro de referência (mm)
25,0	4,75
19,0	4,75
12,5	4,75
9,5	2,36
4,75	1,18

De acordo com o Quadro 3.5, por exemplo numa mistura SMA com agregado de dimensão máxima nominal igual ou superior 12,5 mm, é considerada partícula ativa todo o material pétreo com dimensão mínima de 4,75 mm.

À parte da definição de agregados grossos, partículas ativas e partículas passivas, a formulação de uma mistura SMA com uma elevada resistência à deformação permanente, tem sido baseada apenas na definição de fusos granulométricos que permitam ter uma mistura betuminosa com uma curva granulométrica descontínua na fração grossa, a qual é posteriormente preenchida por uma elevada percentagem de mastique betuminoso constituída maioritariamente por fíler e por betume, à semelhança do que foi observado inicialmente no capítulo 3. Este facto continua ainda atualmente a verificar-se.

De acordo com Nicholls (1998) e Drueschner (2005), a fração de agregado grosso deve apresentar uma granulometria de tal forma descontínua que permita assegurar um volume de vazios nos agregados grossos variável entre 35 % e 40 %, para acomodar um volume de mastique betuminoso, que garanta após compactada a mistura SMA, a existência de um volume de vazios nos agregados grossos (cerca de 2,5 % a 5,0 %) para além do volume de mastique betuminoso. Porém, a definição de uma determinada granulometria baseada apenas num fuso granulométrico não permite compreender o comportamento de uma SMA nas várias fases da sua vida.

Na fase de construção, a granulometria influencia a trabalhabilidade da mistura, devendo os agregados manter as suas características intactas. Para tal, é necessário, como referido no ponto 3.2.1, que este ofereça resistência à fragmentação (aquando da sua aplicação) e ao choque térmico, dadas as elevadas temperaturas de fabrico e de aplicação das misturas betuminosas, que rondam, no caso das SMA, os valores habitualmente utilizados nas misturas betuminosas convencionais apesar da incorporação de aditivos estabilizantes (se considerado fibras celulósicas) para mitigar o escorrimento de material betuminoso.

Na fase de serviço, a granulometria escolhida condiciona o tipo de estrutura que se vai obter, assim como o nível de imbricamento entre as partículas de agregado. De acordo com Roberts *et al.* (1996) a principal diferença entre uma mistura betuminosa convencional e uma mistura SMA, decorre de, no primeiro caso a resistência à deformação permanente ser assegurada em grande parte pelos agregados finos, sendo no caso das misturas SMA assegurada principalmente pelos agregados grossos.

Segundo Pell & Cooper (1975), a granulometria escolhida é ainda um fator fundamental na determinação da quantidade de betume utilizada na mistura, influenciando indiretamente o desempenho das misturas betuminosas à fadiga. A utilização de uma curva granulométrica descontínua, como numa SMA, ao invés duma granulometria extensa, promove um aumento da resistência à fadiga, uma vez que este tipo de estrutura pétreia se apresenta menos densa proporcionando assim um aumento da percentagem de betume utilizada.

Assim, segundo Zichner (1974), responsável pelo desenvolvimento das misturas SMA, uma “verdadeira” SMA deveria apresentar uma granulometria que respeitasse um fuso granulométrico em que os agregados grossos correspondiam entre 65 % e 80 %, preferencialmente entre 70 % e 75 %, da massa total da mistura betuminosa. O mastique betuminoso deveria corresponder entre 20 % a 35 %, preferencialmente entre 25 % e 30 %, da massa total da mistura betuminosa. A quantidade de betume deveria ser pelo menos 20 %, preferencialmente entre 23 % e 32 %, da quantidade de mastique betuminoso.

No Anexo I-E apresenta-se uma análise dos fusos habitualmente utilizados a nível internacional para as misturas SMA 8, SMA 10, SMA 11, SMA 12 (SMA 12,5) e SMA 14, assim como os limites gerais especificados na norma EN 13108-5 para os peneiros de controlo. As misturas indicadas são as que maior número de utilizadores apresentam no continente europeu e a nível internacional, como observado no ponto 2.3.2 e pela sua dimensão as que maior probabilidade terão de aplicação a nível nacional como camada de desgaste, as quais no caso da SMA 11, SMA 12 e SMA 14 se inserem no âmbito do presente trabalho.

Da análise dos limites definidos por diversos fusos utilizados internacionalmente apresentados no Anexo I-E é possível constatar, nomeadamente, que os fusos definidos a nível europeu tendem a utilizar todo o intervalo definido para os peneiros de controlo na norma EN 13108-5, demonstrando uma adequada correspondência entre a norma europeia e os diversos fusos definidos pelos países europeus que habitualmente utilizam misturas SMA. Porém, esta situação apenas se constata para a atual norma EN 13108-5, verificando-se que em versões anteriores da norma o limite inferior do intervalo definido para o peneiro de controlo 2,0 mm correspondia 20 % (15 % na atual norma), o qual em diversos casos não abrangia a totalidade dos fusos utilizados a nível europeu para as misturas SMA.

No Anexo I-E é igualmente possível verificar que a definição de um limite máximo de 30 % para a percentagem acumulada de material passado tende a ocorrer para o peneiro de dimensão igual a 2 mm (2,36 mm) ou inferior, ao contrário do que é recomendado na literatura (Brown *et al.*, 1997 e Brown & Haddock, 1997) que indica o peneiro de 4,75 mm.

Adicionalmente, para os casos específicos das SMA 12 e SMA 14, de acordo com a definição utilizada nos EUA o peneiro de referência que define o limite inferior a adotar para definir a dimensão das partículas ativas, deveria corresponder nestas duas misturas ao peneiro 4,75 mm. Seria portanto espetável que o limite máximo de 30 % se verificasse para o peneiro 4,75 mm, situação que não se observa internacionalmente, mas apenas de forma aproximada para o fuso definido nos EUA para a mistura SMA 12,5, onde um limite máximo de 35 % ocorre próximo do peneiro 4,75 mm.

No Quadro 3.6 é apresentada uma súmula das composições ponderais utilizadas internacionalmente nas misturas SMA 8, SMA 10, SMA 11, SMA 12 e SMA 14, de acordo com os fusos granulométricos analisados no Anexo I-E. A análise realizada no Quadro 3.6 tem como pressuposto a utilização do conceito de partículas ativas ($\geq 4,75$ mm) comparativamente aos agregados grossos.

Quadro 3.6 – Composição ponderal das misturas SMA 8, SMA 10, SMA 11, SMA 12 e SMA 14

Tipo de mistura SMA	Limite do fuso	Porcentagem de material passado no peneiro (%)					
		2 mm			4,75 mm		
		Agregados grossos/Partículas ativas	Agregados finos/Partículas passivas	Filer	Partículas ativas	Partículas Passivas	Filer
SMA 8	Superior	85	23	14	-	-	-
	Inferior	64	10	5	-	-	-
SMA 10	Superior	85	21	15	-	-	-
	Inferior	65	7	8	-	-	-
SMA 11	Superior	82	19	13	-	-	-
	Inferior	68	10	6	-	-	-
SMA 12	Superior	84	18	13	80	27	13
	Inferior	70	8	8	60 ¹⁾	12	8
SMA 14	Superior	85	18	13	82	22	13
	Inferior	70 ²⁾	7	8	65 ³⁾	10	8

Legenda: 1) não considerando o fuso definido na Roménia, o qual tem um limite mínimo de 45 %; 2) não considerando o fuso definido em Singapura, o qual tem um limite mínimo de 66 %; 3) não considerando o fuso definido em Singapura, o qual tem um limite mínimo de 52 %

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 3.6 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 em média igual a 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. Constata-se assim que, para um aumento da dimensão máxima nominal do agregado utilizado numa mistura SMA, corresponde um aumento da percentagem de agregados grossos a utilizar, quando considerado o peneiro 2 mm.

Todavia, ainda assim, nos EUA é recomendada a adoção de um peneiro de referência de dimensão igual a 4,75 mm para a formulação das misturas SMA cujo agregado apresenta uma dimensão máxima

nominal igual ou superior a 12 mm (12,5 mm). A utilização do peneiro 4,75 mm tem, aparentemente, como intuito assegurar que o aumento da percentagem mínima de material grosso utilizada (de 65 % para 70 %), se repercute sobre os agregados de maiores dimensões dentro dos agregados grossos (partículas ativas), os quais apresentam, nomeadamente, uma maior capacidade para gerar um aumento do volume de vazios existente nos agregados grossos, situação fundamental para assegurar o efeito de *stone-on-stone* sem condicionar a quantidade de betume a utilizar.

A fim de aferir o que foi anteriormente indicado é igualmente apresentado no Quadro 3.6 a avaliação da quantidade de partículas ativas a utilizar, considerando como peneiro de referência o 4,75 mm, em vez do peneiro 2 mm, para misturas SMA cujo agregado apresenta uma dimensão máxima nominal igual ou superior a 12 mm. Da análise verifica-se que os intervalos passam de um intervalo de 70 % e 84 % (SMA 12) e 70 % e 85 % (SMA 14) da massa total de agregados (considerando o peneiro 2,00 mm) para os seguintes intervalos: 60 % e 80 % e 65 % e 82 %, respetivamente (considerando o peneiro 4,75 mm). Os intervalos observados enquadram-se desta forma no intervalo que é habitualmente definido para as SMA com dimensão inferior a 12 mm em que se considera o peneiro de referência 2 mm.

Outra razão passível de ser considerada está relacionada com o facto da “quebra” que se observa no fuso granulométrico se deslocar para a direita à medida que aumenta a dimensão máxima nominal dos agregados utilizados numa mistura betuminosa. Sendo objetivo numa mistura SMA a obtenção de um esqueleto com efeito de *stone-on-stone*, este deverá ser maioritariamente constituído por agregados correspondentes à fração de material de maiores dimensões da curva granulométrica escolhida, os quais pela uniformidade de dimensão são capazes de formar um esqueleto pétreo sem preenchimento da estrutura desenvolvida. Esta situação pode ser constatada nos fusos das misturas SMA definidos nos EUA (Quadro 3.7), onde para as misturas SMA 12 (12,5) e SMA 19, a “quebra” no fuso granulométrico ocorre no peneiro 4,75 mm, no caso de uma mistura SMA 10 (9,5), a “quebra” no fuso granulométrico ocorre no peneiro 2,36 mm. Os peneiros indicados correspondem aos peneiros de referência recomendados pela AASHTO M325 para as misturas SMA.

Quadro 3.7 – Fusos granulométricos recomendados nos EUA para as misturas SMA (AASHTO M325, 2012)

Abertura do peneiro de malha ASTM (mm)	Fusos granulométricos					
	SMA 19		SMA 12 (12,5)		SMA 10 (9,5)	
	Limite inferior	Limite superior	Limite superior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior
25,0	100	100				
19,0	90	100	100	100		
12,5	50	88	90	100	100	100
9,5	25	60	50	80	95	95
4,75	20	28	20	35	50	50
2,36	16	24	16	24	30	30
1,18	-	-	-	-	21	21
0,600	-	-	-	-	18	18
0,300	-	-	-	-	15	15
0,075	8,0	11,0	8,0	11,0	12,0	12,0

Seguidamente na Figura 3.3 apresenta-se uma representação esquemática do peneiro de referência para o fuso definido nos EUA para uma mistura SMA 12 (12,5) mm, assim como a divisão entre partículas ativas responsáveis por assegurar o efeito de *stone-on-stone* e partículas passivas responsáveis por preencher o esqueleto pétreo formado pelas partículas ativas.

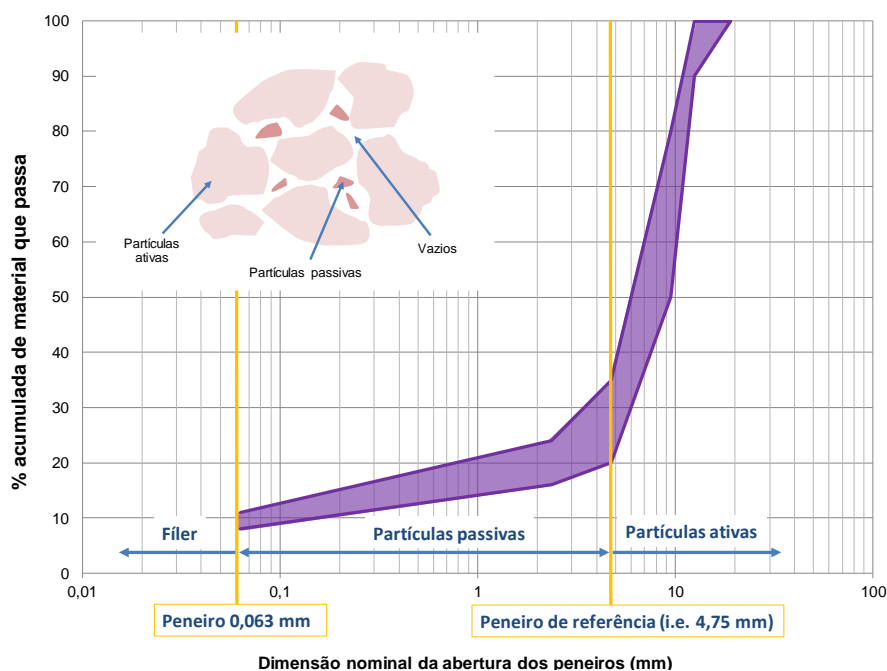


Figura 3.3 – Divisão entre partículas ativas, partículas passivas e fíler

Na Figura 3.3 é possível observar que uma mistura SMA têm 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.

Contudo, Watson *et al.* (2004) sugeriu que a definição do peneiro de referência não deva assentar apenas na dimensão máxima nominal do agregado utilizado na mistura betuminosa SMA, mas deverá ter igualmente em consideração a inclinação da curva granulométrica. Segundo o mesmo autor, uma regra geral será definir o peneiro de referência, com base no peneiro com malha de menor dimensão possível para o qual fica retido pelo menos 10 % da mistura de agregados.

Pode-se ainda assim colocar a questão, porque não considerar o peneiro de referência de 4,75 mm para misturas SMA com dimensão máxima nominal inferior a 12 mm. No estudo realizado por Cooley & Brown (2003), foram estudadas misturas SMA 4,75, SMA 9,5, SMA 12,5 e SMA 19, com o intuito de aferir qual a sua permeabilidade, considerando para a formulação das SMA os peneiros de referência recomendados pela NAPA (1999), assim como a utilização de um peneiro de referência superior ao recomendado. Na Figura 3.4 e na Figura 3.5 é possível observar a representação gráfica dos resultados obtidos no estudo que se relaciona a permeabilidade e a porosidade em função do peneiro de referência utilizado.

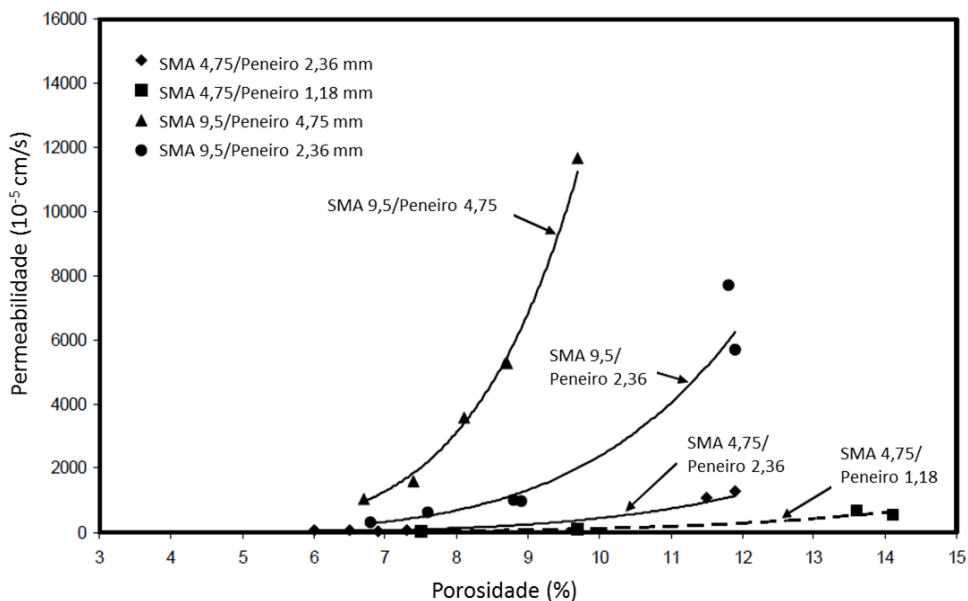


Figura 3.4 – Permeabilidade para misturas SMA 4,75 e SMA 9,5 segundo diferentes peneiros de referência (adaptado de Cooley & Brown, 2003)

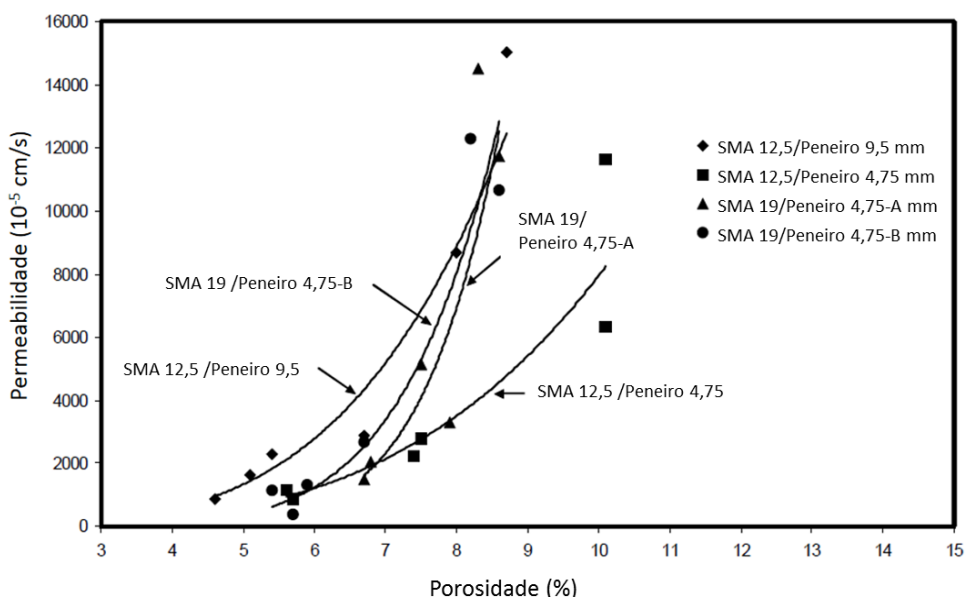


Figura 3.5 – Permeabilidade para misturas SMA 12,5 e SMA 19 segundo diferentes peneiros de referência (adaptado de Cooley & Brown, 2003)

Segundo a Figura 3.4 e a Figura 3.5 é possível observar um aumento da permeabilidade com o aumento da dimensão máxima nominal do agregado utilizado na SMA, assim como um aumento significativo da permeabilidade para todas as SMA estudadas quando se utiliza um peneiro de referência superior ao recomendado pela NAPA (1999). Tal resulta do facto de quando utilizado um peneiro de referência de maior dimensão se estar a contribuir para a utilização de uma maior percentagem de agregados de maiores dimensões (partículas ativas) dentro dos agregados grossos.

De acordo com Blazejowski (2011) a utilização de um peneiro de referência de dimensão superior promove as seguintes consequências nas propriedades de uma SMA:

- aumento do volume de vazios na mistura de agregados (VMA);
- aumento substancial da quantidade ótima de betume a utilizar, resultante de um aumento do volume de vazios existente entre as partículas ativas;
- aumento da resistência à deformação permanente;
- aumento da permeabilidade da mistura betuminosa, uma vez que para a mesma porosidade numa SMA compactada, a permeabilidade tende a ser superior para o caso em que se utiliza um peneiro de referência superior.

Tendo em consideração as consequências indicadas é espectável que um utilizador tente maximizar a percentagem de partículas ativas para maximizar a percentagem de betume utilizada e a resistência à deformação permanente. Contudo, o utilizador deve ter presente que uma elevada permeabilidade em conjunto com uma porosidade, percentagem de betume e espessura da película de betume que envolve os agregados inadequadas, contribui para um aumento da sensibilidade à água e ao envelhecimento. Assim a formulação de uma SMA deve ter como objetivo a obtenção de uma composição volumétrica ótima que assegure um adequado desempenho global para a mistura SMA.

Em suma, é possível concluir que internacionalmente o intervalo de partículas ativas a utilizar numa mistura SMA tende a estar compreendido entre 64 % e 85 %, quando considerado, o peneiro 2 mm (2,36 mm) e o peneiro 4,75 mm, para misturas SMA cujo agregado apresenta uma dimensão máxima nominal igual ou inferior a 11 mm e igual ou superior a 12 mm, respetivamente.

Pode-se assim aferir que a definição dos limites para a percentagem de agregado a utilizar numa mistura SMA, para se obter um efeito de *stone-on-stone* depende da opção que seja definida:

- manter constante o intervalo de partículas ativas a utilizar (de 60 % a 85 %, tendencialmente de 64 % a 85 %), criando peneiros de referência, como efetuado nos EUA, para definir diferentes limites inferiores para a dimensão das partículas ativas (i.e. 1,18 mm; 2,36 mm e 4,75 mm) de acordo com a dimensão máxima nominal do agregado utilizado numa mistura SMA;
- ou manter inalterável o peneiro que define o limite inferior para a dimensão dos agregados grossos (i.e. 2 mm), fazendo variar, desse modo, os limites da percentagem de agregados grossos a utilizar, consoante se trate de uma mistura SMA cujo agregado apresenta uma dimensão máxima nominal igual ou inferior a 11 mm, ou igual ou superior a 12 mm.

Da análise efetuada é ainda possível verificar que os limites para as partículas ativas a utilizar numa mistura SMA, compreendidos entre 64 % e 85 % da massa total de agregados, se aproxima, ainda atualmente, do intervalo inicialmente definido por Gerard Zichner (Zichner, 1974) que recomendava a utilização de uma percentagem de agregados grossos entre 65 % e 80 % da massa total de agregados. Verifica-se, porém atualmente uma diminuição do limite inferior para a percentagem de agregados grossos a utilizar, com o objetivo de minimizar o potencial de permeabilidade e aumentar a trabalhabilidade das SMA. Isso mesmo é possível de se constatar quando analisada a evolução das especificações publicadas na Alemanha desde a ZTV bit StB-84 até à ZTV Asphalt StB-07.

Como se pode observar, a definição do fuso granulométrico de uma mistura SMA é fundamental, influenciando o comportamento e desempenho que a mistura terá durante a fase de fabrico até à fase de serviço em que necessita de assegurar o efeito de *stone-on-stone*.

Porém, a definição apenas de uma curva granulométrica baseada num fuso granulométrico a utilizar para determinada mistura SMA, não garante por si só a obtenção de um imbricamento do tipo *stone-on-stone*, ou uma SMA que apresente um desempenho adequado.

Adicionalmente, a utilização das massas dos agregados de acordo com a análise granulométrica é igualmente limitativa quando se pretende obter um imbricamento das partículas do tipo *stone-on-stone*. Tal deve-se ao facto de iguais percentagens de massa de dois diferentes agregados utilizados não terem de corresponder necessariamente a um mesmo volume ocupado. Isso é tanto mais evidente quanto maior a diferença entre as massas volúmicas dos agregados utilizados. A norma AASHTO M325 indica que sempre que se observa uma diferença de $0,2 \text{ Mg/m}^3$ entre as frações de agregados deve ser utilizada uma formulação volumétrica.

A utilização de diferentes massas volúmicas influencia ainda a quantidade de betume utilizada numa mistura betuminosa, sendo comum definir-se uma quantidade mínima de betume a utilizar função de uma determinada massa volúmica de referência. De acordo com a norma EN 13108-5 para as misturas SMA um coeficiente α deve ser utilizado para uma mistura de agregados com uma massa volúmica de referência diferente de $2,650 \text{ Mg/m}^3$. De acordo com a norma o coeficiente α pode ser calculado como se indica seguidamente:

$$\alpha = \frac{2,650}{\rho_a} \quad (3.1)$$

sendo:

α – coeficiente de correção da percentagem de betume;

ρ_a – massa volúmica da mistura de agregados determinada de acordo com a norma EN 1097-6, (Mg/m^3).

No caso da AASHTO R46 é indicado que a correção da percentagem de betume deve ser efetuada sempre que se observe uma massa volúmica da mistura de agregados diferente de $2,750 \text{ Mg/m}^3$. De acordo com a mesma norma, $0,1 \%$ de betume deve ser adicionado ou retirado por cada decréscimo ou acréscimo de $0,050 \text{ Mg/m}^3$, respetivamente, relativamente ao valor de referência da massa volúmica.

A formulação de uma mistura betuminosa através da definição da curva granulometria baseada nas massas dos materiais utilizadas não será a mais adequada, tendo em consideração as diferentes massas volúmicas que os diferentes materiais constituintes podem apresentar.

Pretendendo desenvolver um método de formulação que tivesse por base a determinação do efeito de *stone-on-stone*, e no seguimento dos estudos de Haddock *et al.* (1993) e de Brown & Mallick (1994) que avaliaram o efeito de *stone-on-stone* em misturas SMA através da avaliação da variação do VMA, do VCA_{DRC} e do VCA_{MIX} em função da percentagem de material passado no peneiro $4,75 \text{ mm}$, Brown & Haddock (1997), desenvolveram um método denominado de *dry-rodded unit weight apparatus* (contemplado na norma AASHTO T19 e ASTM C29) no âmbito do estudo Brown *et al.* (1998). O método desenvolvido tem como base a avaliação do volume de vazios existente entre as partículas ativas (VCA_{DRC}) através do método de compactação *dry-rodded*, o qual se compara posteriormente com o volume de vazios das partículas ativas preenchidos com mastique

betuminoso na SMA compactada (VCA_{MIX}), verificando-se a obtenção do efeito de *stone-on-stone* na SMA compactada através da relação $VCA_{MIX} < VCA_{DRC}$ ou $VCA_{MIX} / VCA_{DRC} < 1$.

No estudo realizado por Brown & Haddock (1997), cinco métodos diferentes de compactação foram avaliados, entre eles o compactador *Marshall*, compactação com varão (*dry-rodded*, na terminologia anglo-saxónica), placa vibradora, um compactador giratório superpave (SGC) e um martelo vibrador (*British Kango vibrating hammer*). O estudo contemplou ainda a variação da granulometria do material utilizado na compactação, através da avaliação do acréscimo na percentagem de material passado no peneiro de dimensão igual a 4,75 mm, resultante da quebra das partículas ativas durante a compactação, como se pode observar na Figura 3.6.

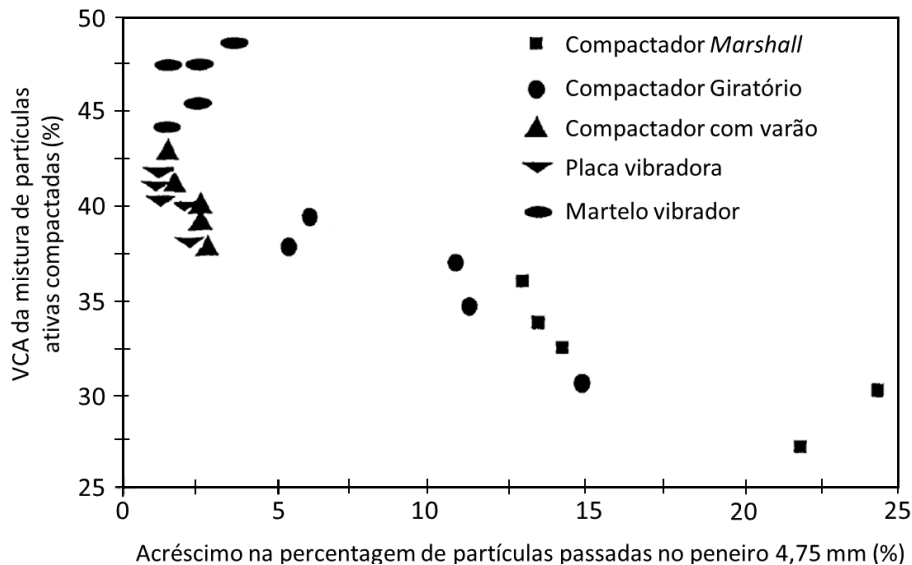


Figura 3.6 – Variação da percentagem de VCA relativamente ao acréscimo na percentagem de material passado no peneiro 4,75 mm função do tipo de compactador utilizado (adaptado de Brown & Haddock, 1997)

De acordo com o estudo realizado concluiu-se que os métodos de compactação com varão e com placa vibratória apresentam valores para o volume de vazios das partículas ativas (*VCA*) muito semelhantes entre si e intermédios quando comparados com os diversos valores de *VCA* obtidos pelos diferentes métodos de compactação avaliados como se observa na Figura 3.6.

No que concerne à quebra de partículas ativas decorrente da compactação verifica-se de acordo com a Figura 3.6 que os compactadores giratório e *Marshall* tendem a promover uma elevada quebra de agregados (entre cerca de 5 % a 15 % e 12,5 % a 25 %, respetivamente) comparativamente aos outros três métodos em que a quebra é reduzida (cerca de 2,5 % no máximo). Tal, poderá constituir um problema se durante o fabrico, transporte e aplicação da SMA em obra a quebra das partículas ativas for inferior ou superior à determinada pelos métodos de compactação indicados. Ainda de acordo com a Figura 3.6 verifica-se que a obtenção de menores valores de *VCA* (compactador *Marshall* e giratório) está relacionado com uma maior quebra de partículas ativas e consequentemente de um aumento da percentagem de material passado no peneiro 4,75 mm, reforçando os resultados anteriormente obtidos por Brown & Mallick (1994).

Segundo os autores do estudo, as diferenças observadas no valor do *VCA* para os diferentes métodos de compactação resultam diretamente dos diferentes níveis de quebra que ocorre nos agregados. Assim torna-se necessário verificar qual a quebra de partículas ativas que habitualmente ocorre em obra a fim de se determinar qual o método de compactação mais indicado para avaliar o *VCA*, situação

que não foi avaliada no estudo em análise e que é avaliada no âmbito do presente trabalho no capítulo 7 (Fase 3 do estudo experimental).

Porém, estudos posteriores como o realizado por West & James (2005), West & Moore (2006) e Tao *et al.* (2011) em que se avalia a quebra das partículas ativas obtida nas amostras recolhidas em obra observaram uma quebra de agregado variável entre cerca de 2,5 % e 9,0 %, o que corrobora a ideia de que a compactação de partículas ativas com o método do varão tende a não ser representativo da quebra de agregado que ocorre em obra para as partículas ativas. De acordo com a Figura 3.7 verifica-se que o acréscimo na percentagem de partículas passadas no peneiro 4,75 mm varia entre cerca de 2,5 % e 8,0 %, se não considerado o Projeto 3 (0,5 %). No estudo de West & Moore (2006) esse valor variou entre 5,4 % e 7,9 %, tendo-se obtido resultados semelhantes por Tao *et al.* (2011) em que a quebra de agregado varia entre cerca de 3,0 % e 9,0 %.

Do mesmo modo observou-se que a quebra que ocorre em obra tende a corresponder à obtida em laboratório para o compactador *Marshall* e giratório, como se pode observar resultados obtidos por West & James (2005) na Figura 3.7, sendo exceção a obra “Projeto 3”.

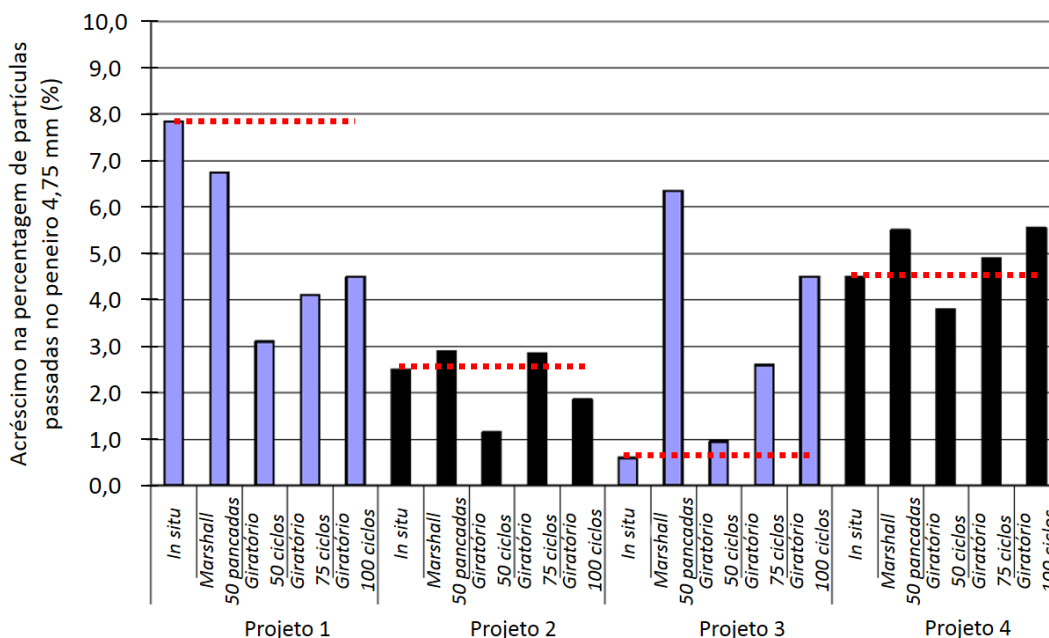


Figura 3.7 – Análise comparativa da percentagem de agregados partidos em laboratório e em obra (adaptado de West & James, 2005)

Resultados semelhantes já haviam sido obtidos no estudo realizado por Brown & Cooley (1999) para avaliar a quebra de agregado que ocorre em laboratório relativamente à que ocorre em obra, constatou-se que tanto as misturas SMA compactadas em laboratório com compactador *Marshall* como com o compactador giratório apresentam uma percentagem de agregados partidos muito semelhante à percentagem obtida nas amostras recolhidas em obra, como se pode observar no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 – Análise comparativa da percentagem de agregados partidos em laboratório e em obra (adaptado de Brown & Cooley, 1999)

Local	Percentagem média passada no peneiro 4,75 mm		
	Compactador Giratório	Compactador Marshall	Amostras recolhidas <i>in situ</i>
2	32,5	35,4	36,0
3	35,5	36,3	40,6
4	33,9	36,2	33,0
5	37,3	37,9	36,5
6	31,6	33,5	33,9
9	34,2	38,4	33,5
10	31,5	34,0	33,4
11	32,7	35,1	33,4

Com a avaliação do efeito de *stone-on-stone* introduzem-se assim novas grandezas (VCA_{DRC} e VCA_{MIX}) as quais se torna importante compreender e entender a sua diferença comparativamente ao VMA habitualmente utilizado na formulação de misturas betuminosas convencionais assim como de misturas SMA. Na Figura 3.8 é efetuada a representação esquemática das grandezas VCA_{DRC} , VCA_{MIX} e VMA para melhor e mais intuitiva compreensão das mesmas.

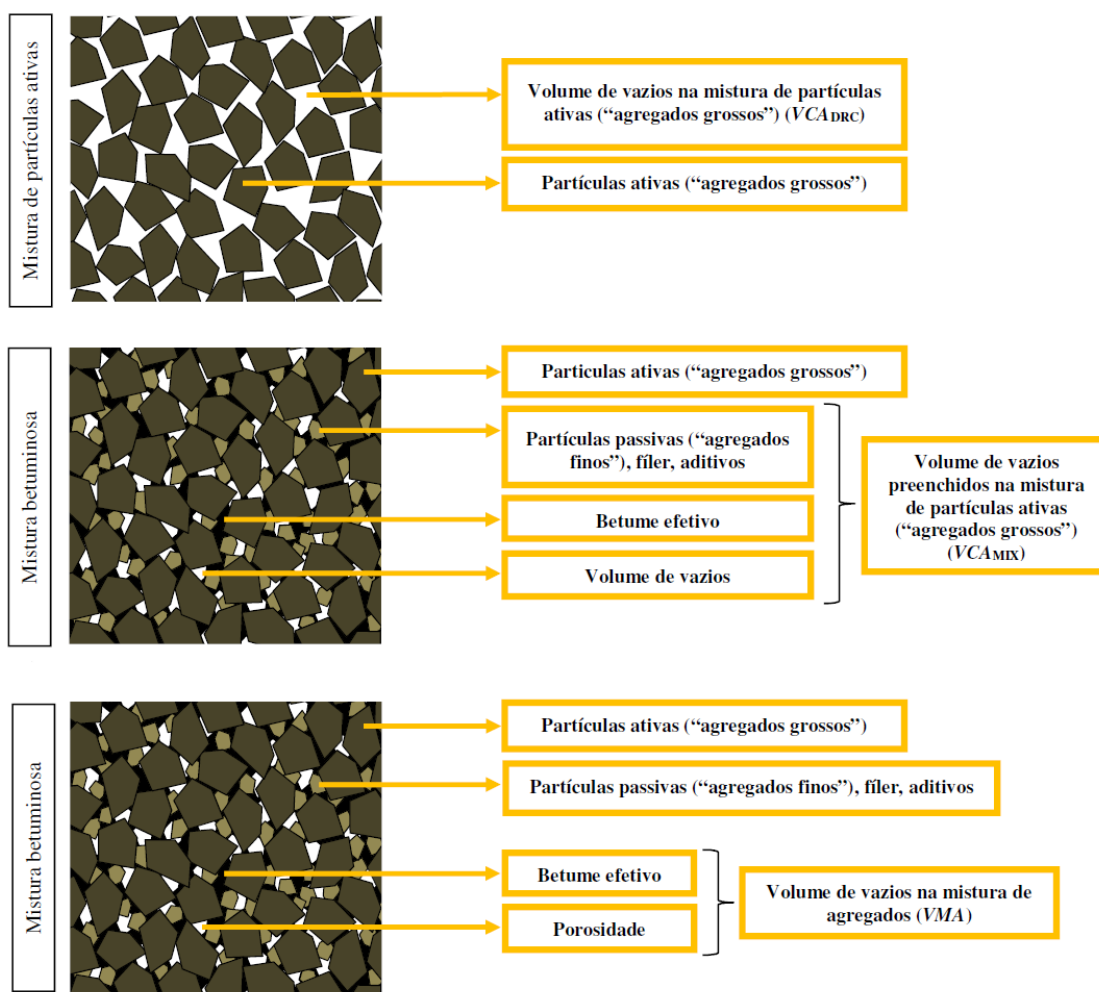


Figura 3.8 – Representação esquemática das grandezas VCA_{DRC} , VCA_{MIX} , VMA na composição de uma mistura SMA

De acordo com a Figura 3.8, o VCA_{DRC} consiste no volume de vazios da mistura de partículas ativas compactadas com o varão (*dry-rodded*) as quais correspondem à porção de agregados, do total da mistura de agregados, que fica retida num determinado peneiro de referência. A dimensão da malha do peneiro de referência varia em função da dimensão máxima nominal do agregado escolhida para o fabrico da SMA (ver Quadro 3.5), correspondente ao peneiro de malha imediatamente superior ao peneiro de menor malha onde fica retido pelo menos 10 % do total da mistura de agregados.

De acordo com a Figura 3.8, o VCA_{MIX} corresponde ao volume de vazios preenchidos na mistura de partículas ativas (“agregados grossos”) existentes numa mistura betuminosa SMA compactada, ou seja correspondente ao somatório dos volumes de partículas passivas (“agregados finos”), fíler, aditivos, betume e de vazios.

Por sua vez, o VMA consiste no volume de vazios na mistura de agregados, ou seja corresponde ao espaço entre as partículas dos agregados de uma mistura compactada, incluindo o volume de vazios e o volume de betume efetivo, expresso como percentagem do volume total.

Analisando a Figura 3.8, é possível constatar que todas estas grandezas (VCA_{DRC} , VCA_{MIX} e VMA) acabam por descrever um volume de vazios existente na mistura de agregados ou numa porção da mistura de agregados. Porém apenas a análise comparativa entre o VCA_{DRC} e o VCA_{MIX} , pretende assegurar que o volume de mastique betuminoso para uma determinada porosidade da SMA compactada, não seja superior ao volume de vazios existente na mistura de partículas ativas “agregados grossos”, assegurando-se deste modo, teoricamente, um imbricamento do tipo *stone-on-stone*, o mesmo será dizer que $VCA_{MIX} < VCA_{DRC}$ ou $VCA_{MIX} / VCA_{DRC} < 1$.

3.3 O MASTIQUE BETUMINOSO – AGREGADOS FINOS

O mastique betuminoso numa mistura SMA corresponde a cerca de 20 % a 40 % da massa total da mistura betuminosa, sendo constituído por agregados finos, por uma elevada percentagem de fíler e de betume e aditivos estabilizantes, comparativamente a uma mistura betuminosa convencional.

Na Figura 3.9 é efetuada a apresentação gráfica de uma análise comparativa em massa para o mastique betuminoso de uma mistura betuminosa SMA 12 e respetiva comparação com diferentes tipos de misturas betuminosas utilizadas em Portugal (PA12,5 – mistura betuminosa drenante; AC10 Surf (mBBr) – microbetão betuminoso rugoso; AC14 Surf (BBr) – betão betuminoso rugoso e AC14 Surf (BB) – betão betuminoso).

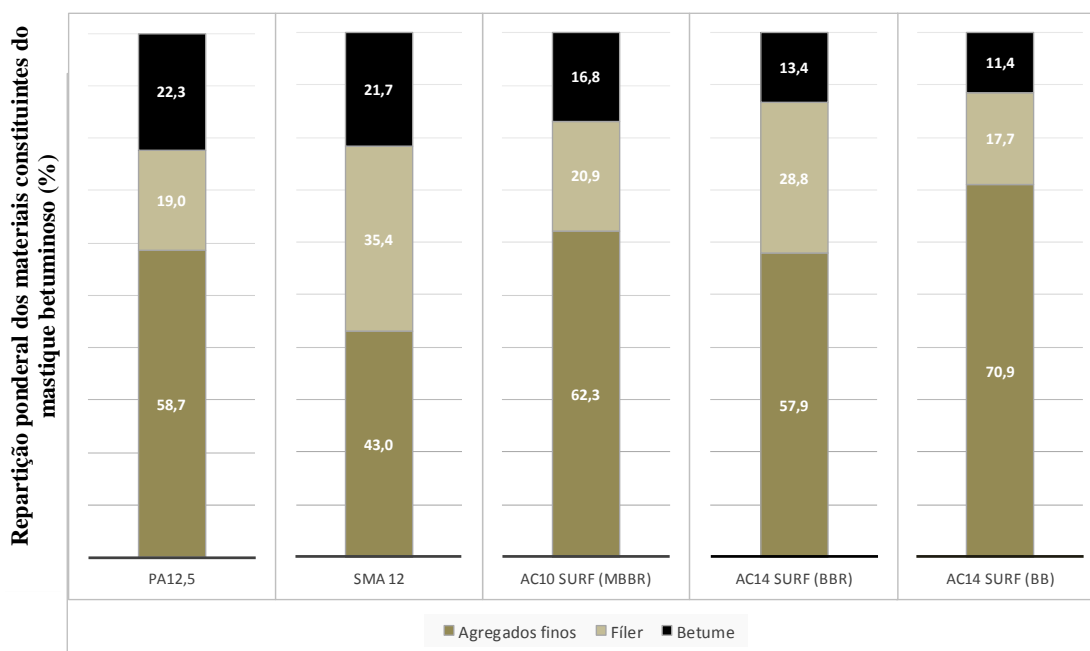


Figura 3.9 – Análise comparativa entre a composição do mástico betuminoso de uma mistura SMA e de diferentes tipos de misturas betuminosas utilizadas em Portugal

De acordo a Figura 3.9 verifica-se uma repartição ponderal dos materiais constituintes de cerca de 43 % de agregados finos, 35 % de fíler e 22 % de betume para um SMA 12, comparativamente a cerca de 71 % de agregados finos, de 18 % de fíler e 11 % de betume para um betão betuminoso. A elevada quantidade de betume utilizada numa mistura betuminosa SMA, comparativamente às restantes misturas betuminosas convencionais [AC10 surf (mBBr), AC14 surf (BBr), AC14 surf (BB)], sendo exceção a mistura betuminosa drenante (PA 12,5), contribui para uma maior trabalhabilidade (Brown, 1992a), maior resistência à fadiga, menor sensibilidade à água e conseqüentemente para uma maior durabilidade. Contudo, a definição de uma adequada composição do mástico betuminoso apresenta um importante contributo para a durabilidade das misturas SMA (Austroads, 2013a). Nos pontos seguintes passa-se a analisar cada um dos constituintes do mástico betuminoso de uma SMA, como contributo para o desenvolvimento do conceito de *mastic-within-stone* (Fase 4 do estudo experimental).

3.3.1 INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS FINOS NO COMPORTAMENTO DAS MISTURAS SMA

— Influência da percentagem de agregados —

Na composição de um mástico betuminoso os agregados finos tendem a corresponder a cerca de 40 % da massa total de uma mistura betuminosa convencional (Little *et al.*, 2001). No caso de uma mistura SMA esse valor é bastante inferior, como observado no capítulo 3 com a utilização de uma percentagem entre cerca de 5 % e 24 % da massa total de uma mistura betuminosa, a que corresponde entre cerca de 4 % e 22 % do volume da mistura betuminosa se considerada uma massa volúmica de 2,650 Mg/m³ para os agregados e de 1,030 Mg/m³ para o betume.

Os agregados finos ou partículas passivas (quando o peneiro de referência para a dimensão máxima é diferente de 2 mm) numa mistura SMA têm como função, nomeadamente, preencher os vazios formados pelo esqueleto pétreo dos agregados grossos ou partículas ativas (quando o peneiro de

referência para a dimensão mínima é diferente de 2,0 mm), tendo como intuito melhorar a trabalhabilidade da mistura SMA e diminuir a sua permeabilidade. Tendo isto em mente, a percentagem de agregados finos em conjunto com o filer, betume e aditivos estabilizantes deverá ser tal que permita assegurar a porosidade pretendida para a mistura SMA, sem com isso afastar as partículas ativas (“agregados grossos”), principais responsáveis pelo imbricamento e resistência da mistura betuminosa à deformação permanente.

A influência dos agregados finos na porosidade de uma mistura SMA 12 (SMA 12,5) foi avaliada no estudo efetuado por Brown (1992), tendo-se constatado que entre as variáveis avaliadas (percentagens de betume, de finos, de filer e de fibras celulósicas), a percentagem de agregados finos era a que maior influência apresentava na porosidade da mistura SMA, como se pode observar na Figura 3.10.

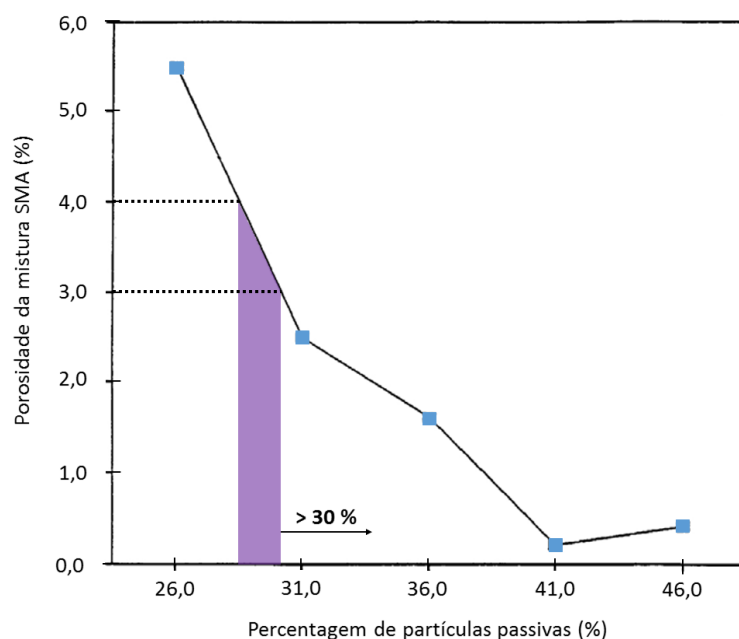


Figura 3.10 – Variação da porosidade relativamente à variação da percentagem de partículas passivas (< 4,75 mm) na mistura SMA (adaptado de Brown, 1992)

De acordo com a Figura 3.10 é possível verificar que a percentagem de partículas passivas (< 4,75 mm) utilizada apresenta um efeito muito significativo na porosidade obtida na SMA compactada. Segundo os autores do estudo, uma diminuição de 2,5 % na quantidade de material fino passado no peneiro 4,75 mm permite um aumento da porosidade em cerca de 1,0 %. Ainda de acordo com os autores a elevada sensibilidade das misturas à variação da percentagem de material passado no peneiro 4,75 mm indica que particular atenção deve ser dada no controlo do material que passa neste peneiro, principalmente durante a fase de construção.

Na Figura 3.10 é ainda possível observar que um volume de vazios entre 3 % e 4 % corresponderá à utilização de uma percentagem de partículas passivas entre aproximadamente 28 % e 30 %, o que parece corroborar a referências de Brown *et al.* (1997) e Brown & Haddock (1997) de que a percentagem de partículas passivas utilizadas numa mistura SMA se deve situar abaixo de 30 %. Esta conclusão corrobora o que já havia sido constatado no ponto 3.2.4, apesar dos fusos granulométricos utilizados internacionalmente não terem isso em consideração, à exceção dos EUA.

Ainda segundo o mesmo estudo a melhor forma de aumentar a percentagem de betume numa mistura SMA consiste em diminuir a percentagem de partículas passivas (< 4,75mm) na medida em que

apresenta uma significativa influência sobre o volume de vazios na mistura de agregados (VMA) da SMA como se pode observar na Figura 3.11. A utilização de uma menor percentagem de partículas passivas promove um aumento da porosidade e do volume de vazios na mistura de agregados, o que permite aumentar significativamente a percentagem de betume utilizada, sem condicionar o efeito de *stone-on-stone*.

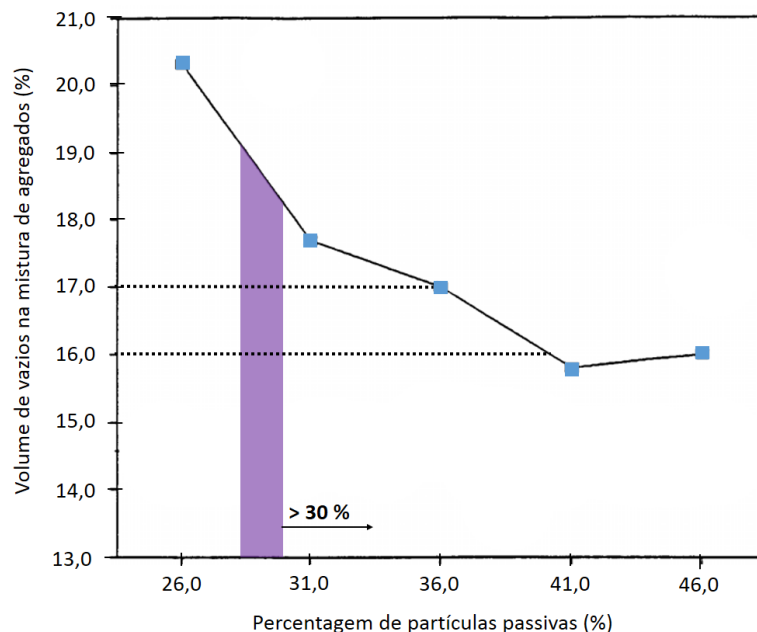


Figura 3.11 – Variação do volume de vazios na mistura de agregados relativamente à variação da percentagem de partículas passivas na mistura SMA (adaptado de Brown, 1992)

De acordo com a Figura 3.11 e à semelhança do que foi observado anteriormente na Figura 3.10 o volume de vazios na mistura de agregados tende a ser claramente superior a 17 % (valor mínimo habitualmente indicado nos EUA para ser obtido na formulação das misturas SMA) para uma percentagem de partículas passivas entre aproximadamente 28 % e 30 %. O valor do volume de vazios na mistura de agregados é de 17 % para uma percentagem mínima de partículas passivas de 36 %.

Se tivermos em consideração a análise dos fusos granulométricos efetuada no ponto 3.2.4, constata-se que a nível europeu a percentagem de material que passa no peneiro 4,75 mm ronda entre 30 % e 50 %, podendo chegar a cerca de 70 % no caso da Holanda, o que de acordo com a Figura 3.11, torna expectável que a definição de um valor mínimo de VMA, que não é comumente definido a nível europeu deva ser inferior a 17 %, provavelmente entre 15 % e 16 %.

No que concerne à influência da percentagem de partículas passivas na resistência das misturas SMA à deformação permanente foi avaliada por Austroads (2013). No estudo realizado foram avaliadas cinco misturas SMA, as quais foram fabricadas com 20 % e 30 % de partículas passivas (< 4,75 mm) e avaliadas à deformação permanente com o ensaio de pista (*wheel tracking*, na terminologia anglo-saxónica). No Quadro 3.9 são apresentados os resultados decorrentes dos ensaios, no que concerne à média da profundidade de rodeira assim como a respetiva porosidade das lajetas ensaiadas.

Quadro 3.9 – Influência da percentagem de partículas passivas na resistência à deformação permanente das misturas SMA (adaptado de Austroads, 2013)

Identificação das misturas ensaiadas	20 % de partículas passivas passadas no peneiro 4,75 mm		30 % de partículas passivas passadas no peneiro 4,75 mm	
	Porosidade (%)	Média da profundidade de rodeira a 10000 ciclos (mm)	Porosidade (%)	Média da profundidade de rodeira a 10000 ciclos (mm)
Qld 1	7,2	1,4	4,2	2,6
Qld 2	7,1	1,1	4,6	3,5
SA 1	7,8	3,9	2,6	5,4
NSW 1	9,1	2,2	5,4	4,1
NSW 2	8,0	2,4	4,0	3,9

De acordo com Quadro 3.9 do estudo efetuado a média da profundidade de rodeira para as misturas SMA com 30 % de partículas passivas é sempre superior à das misturas SMA com 20 % de partículas passivas. De acordo com o mesmo estudo, esta tendência é evidente para as misturas com 30 % de partículas passivas, que apesar de apresentarem menor porosidade, o que deveria contribuir para um aumento da resistência à deformação permanente comparativamente às misturas SMA com 20 % de partículas passivas, apresentam ainda assim uma maior média da profundidade de rodeira.

Contudo, os autores do estudo referem que a utilização de misturas com 20 % de partículas passivas pode promover um aumento da permeabilidade e conseqüente redução da durabilidade. De acordo com os autores do estudo a formulação das misturas SMA deverá assegurar um equilíbrio entre a resistência à deformação permanente e a sensibilidade à água, apesar desta última propriedade não ter sido avaliada no estudo.

As conclusões obtidas levam a crer que um método de formulação a ser definido para as misturas SMA deverá contemplar a avaliação da deformação permanente e da sensibilidade à água, como forma de otimizar o desempenho estrutural das SMA, situação que se insere no âmbito do estudo do presente trabalho (Fase 4 do estudo experimental).

— Influência da forma —

No que concerne à influência da forma dos agregados finos a utilizar numa mistura SMA a sua escolha deve permitir uma boa trabalhabilidade sem colocar em causa a estabilidade da mistura betuminosa.

O Asphalt Institute (1997) e Little *et al.* (2001) indicam que a forma/angulosidade e textura dos agregados finos são propriedades fundamentais para o adequado desempenho das misturas betuminosas, ao fendilhamento por fadiga, às quais se adiciona a quantidade e propriedades do material que passa no peneiro 0,063 mm como sendo também passível de influenciar a deformação permanente e a adesividade entre os agregados e o betume.

Por esse motivo à semelhança dos agregados grossos, é igualmente recomendado para os agregados finos a utilização de uma percentagem mínima de partículas britadas. Segundo a AAPA (1998) para aplicações em autoestradas e/ou itinerários principais, onde a SMA é tipicamente utilizada e onde uma resistência à deformação permanente é fundamental, apenas são recomendados agregados finos britados. Existem especificações que limitam a utilização de agregados finos não britados a um máximo de 50 % relativamente à massa total de agregados finos (Nicholls, 1998). Contudo, a utilização de agregados finos não britados, tem sido limitada a estradas com um volume de tráfego reduzido ou simplesmente eliminada com o objetivo de não reduzir o imbricamento obtido pelas partículas ativas (“agregados grossos”).

Deste modo, quanto mais irregular ou angular a forma dos agregados finos, maior será o contributo para o aumento da resistência à deformação permanente das misturas SMA. Contudo tal contributo não deverá ser excessivo para minimizar eventuais problemas de trabalhabilidade aquando do fabrico e compactação das SMA. De igual modo, e à semelhança do que sucede com os agregados grossos, uma diminuição do volume de vazios disponível está associada à utilização de agregados finos mais redondos, com menor angulosidade ou menor textura, ou uma combinação destes fatores (Sukhwani *et al.*, 2006).

A forma/angulosidade dos agregados finos é avaliada de forma distinta dos agregados grossos que requerem a avaliação do índice de forma ou do índice de achatamento. Segundo a norma EN 933-6 a avaliação da forma dos agregados finos pode ser realizada através da medição da angulosidade do agregado utilizado um angulómetro que mede o tempo de escoamento dos agregados por injeção de ar num recipiente cónico dotado de um orifício na sua parte inferior. De acordo com a norma EN 933-6 os agregados podem ser classificados na sua forma/angulosidade segundo a categoria E_{cs38} (coeficiente de escoamento maior ou igual a 38) até à categoria E_{cs30} (coeficiente de escoamento maior ou igual a 30), sendo o mesmo indicado como E_{CS} Declarado quando o coeficiente de escoamento não se insere nas categorias estabelecidas, ou quando não seja requerido será apresentado como E_{csNR} .

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 SMA. Assim é fundamental a definição de um ponto de equilíbrio que permita assegurar a resistência à deformação permanente sem comprometer a trabalhabilidade da SMA. Segundo Blazejowski (2011), o desempenho do agregado fino relativamente à sua forma/angulosidade é considerado como apropriado para as misturas SMA, quando maior ou igual a 30 ou 35 segundos (categoria E_{cs30} ou E_{cs35}).

— Influência do volume de vazios —

De acordo com Huber *et al.* (1998) e Fernandes *et al.* (2000), os ensaios para avaliar a forma/angulosidade dos agregados finos nem sempre conseguem distinguir os agregados com um desempenho adequado ou desadequado. Propriedades relativas à compactação, como é caso do volume de vazios dos agregados não compactados, não são apenas função da forma/angulosidade, sendo igualmente afetadas pela textura, granulometria e massa volúmica dos agregados (Sukhwani *et al.*, 2006).

Segundo os resultados dos ensaios realizados sobre nove tipos de agregados, obtidos no estudo realizado por Little *et al.* (2001), concluiu-se que o volume de vazios dos agregados finos não compactados está relacionado com a deformação permanente. Quanto maior o volume de vazios nos agregados finos não compactados, maior a resistência à deformação permanente da mistura betuminosa convencional do tipo betão betuminoso. O estudo recomenda que seja utilizado um valor mínimo permissível para o volume de vazios dos agregados finos, em vez de um valor máximo como atualmente especificado nos EUA. A especificação da *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE, 2008) recomenda que para misturas SMA a serem aplicadas em aeroportos seja utilizado um valor mínimo de volume de vazios de 45 %.

— Influência da “limpeza” dos finos —

No que concerne à “limpeza” dos finos, a sua avaliação deverá ser efetuada através do ensaio de azul metileno relativo à fração 0/0,125 mm sempre que o conteúdo de finos seja superior a 3 % (categoria f_3 , segundo a norma EN 13043). O ensaio azul metileno é fundamental para avaliar a qualidade do

material orgânico existente na mistura de agregados finos, a qual influencia o comportamento à deformação permanente e adesividade entre os agregados e o betume. Quando o conteúdo de finos for superior a 10 % (categoria f_{10}), deve a avaliação dos finos ser complementada com a verificação da conformidade dos restantes requisitos aplicáveis aos fíleres. Segundo Castelo-Branco & Ferreira (2009) o parecer da Comissão Técnica 154 apontou um valor limite de MB_{f10} para agregados a utilizar em misturas betuminosas em Portugal.

3.3.2 ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES EXIGIDAS PARA OS AGREGADOS FINOS

No Quadro 3.10 apresenta-se um resumo das propriedades dos agregados finos e respetivos valores recomendados internacionalmente para as misturas SMA, baseado no que foi referido anteriormente no presente ponto e na informação compilada no Anexo I-F.

Quadro 3.10 – Resumo das propriedades dos agregados finos recomendadas internacionalmente com influência no comportamento das misturas SMA

Propriedades dos agregados finos		Tráfego Reduzido (TMDA < 5000) SMA ≤ 8 mm	Tráfego Médio/Elevado (TMDA ≥ 5000) SMA ≥ 8 mm
Propriedades físicas	Volume de vazios	≥ 30	
Propriedades geométricas	C	$C_{50/0}^{1)}$; $C_{100/0}$	
	G_F	$G_{r85} - G_{r92}$	
	f	$f_3 - f_{50}$	
	E_{CS}	$E_{CS \text{ Declarado}} - E_{CS35}$	
Propriedades de "limpeza"	EA	$EA_{35}^{1)}$ - EA_{70}	
	IP	Não plástico - IP_4	
	LL	$LL \leq 25\%$	
Propriedades térmicas e de meteorização	WA_{24} ; MS	$WA_{241} - WA_{242}$; $MS_{18} - MS_{30}$	

Legenda: 1) para camadas não sujeitas a tráfego; C – percentagem de material britado; G_F – tolerâncias da granulometria típica; f – conteúdo de finos; E_{CS} – coeficiente de escoamento; EA – equivalente de areia; IP – índice de plasticidade; LL – limite de liquidez; WA_{24} – Absorção de água; MS – ensaio do sulfato de magnésio

Segundo a informação compilada no Anexo I-F relativa às propriedades dos agregados finos e respetivos valores recomendados internacionalmente para as misturas SMA, é possível verificar que as propriedades para os agregados finos habitualmente indicadas se referem às propriedades físicas através do volume de vazios e geometrias avaliadas através da percentagem de material britado a utilizar (C), das tolerâncias da granulometria típica (G_F), do conteúdo de finos (f), do coeficiente de escoamento (E_{CS}), às propriedades de "limpeza" através do equivalente de areia (EA), do índice de plasticidade (IP), do limite de liquidez (LL), e às propriedades térmicas e de meteorização avaliadas através da resistência à ação do gelo-degelo (WA_{24} ; MS) aplicada em países onde tende a ocorrer queda de neve. Entre estas propriedades, apenas a avaliação da resistência à ação do gelo-degelo, tendem a não ser avaliadas em Portugal, recomendando-se, nesta última, a sua avaliação nas misturas SMA, apenas em ambientes sujeitos a ciclos de gelo-degelo e quando o valor da absorção de água determinada assim o requeira (absorção de água superior a 2 %). Porém, independentemente da ocorrência de gelo-degelo a avaliação da absorção de água é recomendada no CETO (2009), devendo a mesma ser limitada a 1 % no caso de misturas betuminosas aplicadas como camada de desgaste.

Efetuada uma súmula das propriedades recomendadas internacionalmente para os agregados finos a utilizar no fabrico de uma SMA (Quadro 3.10), é possível constatar que não existe habitualmente uma diferenciação entre os agregados finos a utilizar em misturas SMA, a aplicar em estradas com tráfego reduzido ou com tráfego médio/elevado.

3.3.3 RECOMENDAÇÕES PARA AS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS FINOS A UTILIZAR EM PORTUGAL NAS MISTURAS SMA

Da análise das propriedades recomendadas internacionalmente para os agregados finos, importa aferir o seu adequado enquadramento a nível nacional, considerando os materiais disponíveis no nosso país. Para o efeito, teve-se em consideração o CETO (2009), sendo no Quadro 3.11 apresentadas as recomendações no que se refere aos valores limite a definir para as propriedades dos agregados finos a utilizar em Portugal para o fabrico de misturas SMA.

Quadro 3.11 – Recomendações para as propriedades dos agregados finos a utilizar no fabrico de misturas SMA em Portugal

Propriedades dos agregados finos		Tráfego Reduzido (TMDA < 5000) SMA ≤ 8 mm	Tráfego Médio/Elevado (TMDA ≥ 5000) SMA ≥ 8 mm
Propriedades físicas	Massa volúmica	ρ_f Declarado	
	Baridade	$\rho_{b,pp}$ Declarado	
	Absorção de água	≤ 1 %	
Propriedades geométricas	C	$C_{100/0}$	
	G_F	$G_{\neq NR}$	
	f	f_{NR}	
	E_{CS}	E_{CS} Declarado	
Propriedades de “limpeza”	MB_F	MB_F-10	
Propriedades térmicas e de meteorização	WA_{24} ; MS	$WA_{24}1$; MS_{18} ¹⁾	

Legenda: 1) Se $WA_{24} > 2$, o valor do sulfato de magnésio deve ter uma categoria no máximo igual a MS_{18} ; C – percentagem de material britado; G_F – tolerâncias da granulometria típica; f – conteúdo de finos; E_{CS} – coeficiente de escoamento; MB_F – azul metileno; EA – equivalente de areia; WA_{24} – Absorção de água; MS – ensaio do sulfato de magnésio

Apesar das recomendações apresentadas no Quadro 3.11, não é objetivo limitar a utilização de outros materiais. Sendo recomendado sempre que se utilizem materiais que não se enquadram nas categorias apresentadas no Quadro 3.11, efetuar nomeadamente o estudo de formulação, trecho experimental e acompanhamento da obra, de modo a avaliar o desempenho da mistura SMA e desse modo validar a utilização de materiais com diferentes categorias para as propriedades. Em Portugal segundo o CETO (2009) é recomendada a avaliação da tolerância da granulometria típica, assim como do conteúdo de finos, apenas para agregados utilizados em camadas granulares, nomeadamente para agregados naturais e reciclados e misturas não ligadas. No caso de agregados utilizados nas camadas betuminosas a sua avaliação não é requerida. Por esse motivo não é requerida a sua avaliação no Quadro 3.11 para os agregados a utilizar nas misturas SMA. Segundo o que foi anteriormente analisado no ponto 3.3.1, recomenda-se que o coeficiente de escoamento se baseie na declaração do valor obtido na sua avaliação, como forma de se aferir a sua eventual utilidade para uma melhor compreensão do comportamento das SMA, nomeadamente no que concerne à sua resistência à deformação permanente e à sua trabalhabilidade.

3.4 O MASTIQUE BETUMINOSO – FÍLER

3.4.1 INFLUÊNCIA DO FÍLER NO COMPORTAMENTO DAS MISTURAS SMA

De acordo com Kandal *et al.* (1998) o fíler tem uma influência significativa sobre as propriedades das misturas betuminosas, influenciando a resistência à deformação permanente (Rao & Sen, 1973, Kalcheff & Tunnicliff, 1982, Yao & Monismith, 1986 e Balghunaim *et al.*, 1988) à fadiga e a sensibilidade à água (Breuer, 1967 e Kandhal, 1981). Contudo, essa influência varia consoante a quantidade e as propriedades do fíler utilizado, como seja a natureza (composição mineral e físico-química), a granulometria, a superfície específica e o seu volume de vazios (Kandhal, 1981 e Harris & Stuart, 1995).

Segundo (Asphalt Institute, 1969) duas teorias podem ser utilizadas para explicar a influência do fíler no comportamento das misturas betuminosas. A primeira, o fíler dada a dimensão reduzida que apresenta, serve para preencher os vazios entre as partículas de agregado, aumentando a baridade e a resistência das misturas betuminosas compactadas. A segunda presume que as partículas de fíler se encontram em suspensão no betume adsorvendo o mesmo e contribuindo assim para um aumento da viscosidade do betume, e conseqüentemente da estabilidade das misturas betuminosas (Rao & Sen, 1973). Porém é considerado que ambas as teorias se aplicam em simultâneo Abdula Rahman *et al.* (1992).

— Influência da percentagem de fíler —

Numa mistura SMA a percentagem de fíler varia entre 5,0 % e 15,0 % da massa total de agregados (SMA 8 – 5,0 % e 14,0 %; SMA 10 – 8,0 % e 15,0 %; SMA 11 – 6,0 % e 13,0 %; SMA 12 – 8,0 % e 13,0 % e SMA 14 – 8,0 % e 13,0 %) de acordo com análise efetuada no ponto 3.2.4 e Anexo I-E. Este intervalo é semelhante ao que é definido na norma EN 13108-5 que indica um intervalo entre 5,0 % e 14,0 % para misturas SMA com dimensão máxima nominal igual ou inferior a 8 mm, diminuindo para 5,0 % a 13,0 % (SMA 10, SMA 11 e SMA 12) e para 5,0 % a 12,0 % (dimensão igual ou superior a SMA 14). Segundo a norma EN 13108-5, a um aumento da dimensão máxima nominal do agregado utilizado, corresponde uma diminuição da percentagem máxima de fíler passível de se adotar numa mistura SMA.

Todavia, se considerada a média dos valores utilizados internacionalmente para a percentagem mínima e máxima de fíler, constata-se que o intervalo é bastante mais restritivo correspondendo de 7,5 % a 13,0 % da massa total de agregados (SMA 8 – 8,0 % e 12,4 %; SMA 10 – 8,6 % e 13,0 %; SMA 11 – 7,9 % e 12,3 %; SMA 12 – 8,5 % e 12,3 % e SMA 14 – 7,5 % e 11,8 %). Constata-se assim internacionalmente que a percentagem de fíler se tende a manter aproximadamente constante (em média entre cerca de 8,1 % e 12,4 %) independentemente da dimensão máxima nominal do agregado utilizada.

A conclusão obtida parece corroborar igualmente o que foi constatado no ponto 3.2.4, em que a percentagem de partículas ativas se deve manter constante independentemente da dimensão máxima nominal, para se assegurar o efeito de *stone-on-stone* e garantir um adequado volume de vazios para ser preenchido pelo mastique betuminoso. Assim e tendo o fíler numa mistura SMA como função preencher os vazios formados pelo esqueleto pétreo dos agregados grossos e finos é natural que se pretenda manter relativamente constante a sua percentagem, de modo a manter uma reduzida permeabilidade da SMA, através da formação do mastique betuminoso em conjunto com os agregados finos, betume e aditivos estabilizantes.

Talvez por esse motivo seja comum durante a formulação de uma mistura SMA definir uma percentagem de fíler constante, fazendo-se variar apenas a percentagem dos outros constituintes da SMA. Assim qualquer alteração a existir na definição da percentagem dos materiais constituintes do mastique betuminoso deverá ocorrer preferencialmente sobre a percentagem de agregados finos, os quais apresentam uma significativa influência sobre a porosidade da mistura SMA como constatado no ponto 3.3.1.

A preocupação com a permeabilidade das SMA é possível de se constatar ao analisar que em média a percentagem mínima de fíler internacionalmente utilizada de 8,1 %, é ligeiramente superior aos limites inferiores que são indicados na norma EN 13108-5, o que parece evidenciar uma crescente utilização de maiores percentagens de fíler para se assegurar que as misturas SMA produzidas apresentam uma reduzida permeabilidade e uma adequada trabalhabilidade.

A percentagem de fíler utilizada numa mistura SMA comparativamente a uma mistura betuminosa convencional é muito elevada, sendo comum a utilização de um rácio de fíler/betume de 1,5 (WSDOT, 2000). Esse rácio para uma mistura betuminosa convencional densa segundo as especificações do método *Superpave* corresponde entre 0,6 e 1,2 segundo UFC (2001), Prowell *et al.* (2009) e Austroads (2013b).

Se considerado o intervalo da percentagem de betume definido internacionalmente, como se abordará posteriormente no Quadro 3.14 do ponto 3.5.2, corresponde entre 5,5 % a 8,0 %, assim como o intervalo da percentagem de fíler observado anteriormente e que varia entre 7,5 % e 13,0 %, o rácio de fíler/betume é em média 1,5, podendo variar no limite entre cerca de 0,6 a 2,5 (SMA 8 – 0,6 e 2,3; SMA 10 – 1,1 e 2,5; SMA 11 – 0,8 e 2,2; SMA 12 – 1,1 e 2,2; SMA 14 – 0,7 e 2,2). Tais valores podem por vezes conduzir a mastiques betuminosos com uma rigidez desadequada o que influencia a trabalhabilidade das misturas SMA. Uma menor trabalhabilidade pode contribuir para dificultar a obtenção da porosidade requerida na SMA compactada, conduzindo a problemas de permeabilidade e durabilidade da SMA durante a fase de serviço. Um excesso de trabalhabilidade da SMA conduzirá por sua vez a uma menor resistência à deformação permanente e aumento da propensão para a ocorrência de exsudação durante a fase de serviço da SMA.

Isso mesmo foi constatado no estudo efetuado por Bryant (2005), onde diversos tipos de fíleres e de rácios de fíler/betume foram utilizados. Na Figura 3.12 é apresentado o aspeto das misturas (conjunto betume-fíler) efetuadas no estudo, onde se pode observar desde misturas muito fluídas até misturas completamente secas, demonstrando que o tipo e percentagem de fíler utilizada apresenta um efeito significativo na viscosidade do conjunto betume-fíler.

















Tipo de fíler	Rácio de fíler/betume (em massa)			
	1,00	1,25	1,50	1,75
<i>Baghouse dust</i>				
<i>Ultra-fine dust</i>				
Cal hidratada				
Cinzas volantes				

Figura 3.12 – Aspeto dos conjuntos betume-fíler avaliados (adaptado de Bryant, 2005)

Da análise da Figura 3.12 é possível constatar que a definição de um valor universal (por exemplo de 1,5 como referido anteriormente) para o rácio de fíler/betume consiste apenas numa mera aproximação. Assim deve o rácio de fíler/betume ser definido para cada tipo de fíler, como forma de apoiar na escolha da composição de uma mistura SMA, contribuindo para que o mastique betuminoso apresente uma rigidez adequada.

Isso mesmo foi avaliado por Austroads (2013) onde para diversos tipos de fíler se estudou a influência de diferentes rácios fíler/betume na viscosidade do conjunto betume-fíler.

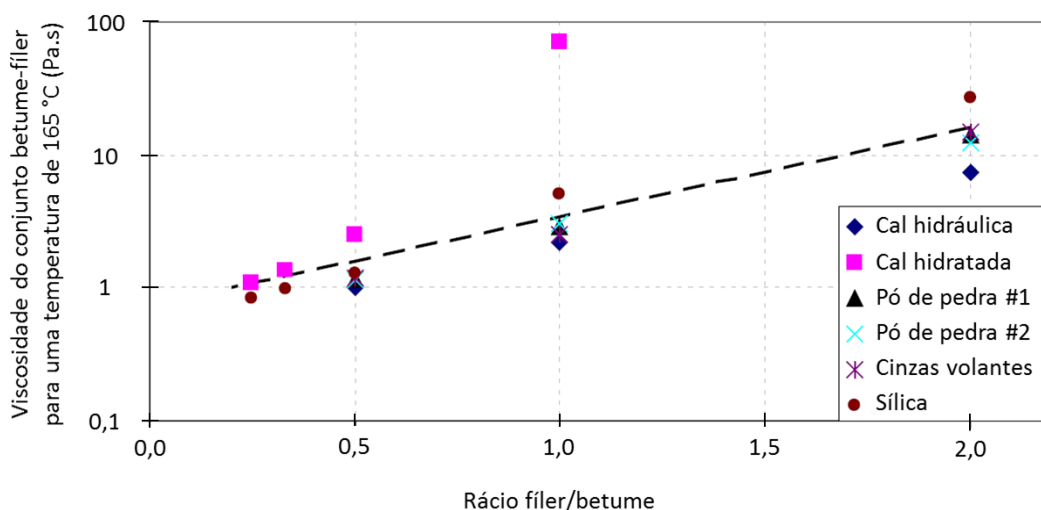


Figura 3.13 – Variação da viscosidade do conjunto betume-fíler relativamente ao rácio fíler/betume (adaptado de Austroads, 2013)

Segundo os autores do estudo o rácio de fíler/betume parece não fornecer elementos suficientes para avaliar o comportamento do conjunto betume-fíler. Ainda assim de acordo com a Figura 3.13 e autores foi possível obter um bom coeficiente de correlação de 0,64 para o rácio fíler/betume relativamente à viscosidade do conjunto betume-fíler. Posteriormente será abordado o conceito de betume livre e fixo o qual tende a apresentar uma melhor correlação com a viscosidade do conjunto betume-fíler, comparativamente ao rácio fíler/betume.

— Influência da natureza petrográfica do fíler —

Segundo Eick & Shook (1978), Dukatz & Anderson (1980), Kandhal (1981), Anderson *et al.* (1982) o tipo de fíler utilizado é indicado como sendo passível de influenciar a rigidez do conjunto betume-fíler, nomeadamente a temperatura de amolecimento (AbdulaRahman *et al.*, 1992) e consequentemente do mastique betuminoso. No caso da mistura betuminosa o tipo de fíler utilizado pode ainda influenciar a percentagem ótima de betume, a baridade, a porosidade, o módulo de deformabilidade, o fendilhamento por fadiga e a deformação permanente (Anderson *et al.*, 1992, Anderson *et al.*, 1992a e Kim & Little, 2005).

Os fíleres usualmente utilizados no fabrico de misturas SMA variam desde cinzas volantes, a cal hidratada, cal hidráulica e cimento Portland (UFC, 2001 e CAPA, 2002), sendo a cal hidratada a menos comum dos vários tipos de fíler utilizados.

A nível nacional, os fíleres a utilizar no fabrico de misturas betuminosas podem ser comerciais (pó de calcário, cimento Portland, cal hidráulica ou cinzas volantes) ou recuperados através da recuperação

dos finos no processo de fabrico das misturas betuminosas (de qualquer natureza petrográfica). Deste modo as diferenças existentes no tipo de fíleres utilizados a nível nacional relativamente aos fíleres frequentemente utilizados internacionalmente para as SMA, referem-se à possibilidade de utilização de pó de calcário e de fíleres recuperados, não sendo porém recomendada a utilização de cal hidratada.

No que concerne à cal hidratada e cimento Portland de acordo com o estudo realizado por AbdulaRahman *et al.* (1992), constatou-se que a substituição de cal hidráulica por cal hidratada aumenta significativamente a temperatura de amolecimento. Esse aumento é tanto mais elevado quanto maior a percentagem de cal hidratada utilizada. No caso de substituição por 3 % de cimento não se verificou uma alteração significativa da temperatura de amolecimento.

Os resultados obtidos estão de acordo com estudos realizados por Lesueur & Little (1999) e Little & Peterson (2005), em que se verificou que a cal hidratada tem uma elevada reatividade. Segundo os estudos o nível de interação entre a cal hidratada e o betume tende a afetar fortemente a reologia para temperaturas elevadas comparativamente a outros tipos de fíleres.

Para maiores percentagens de fíler (5,5 % e 8,0 %), como comumente aplicado nas misturas SMA segundo Abdula Rahman *et al.* (1992), as misturas com cal hidratada a substituir a cal hidráulica possuem maiores percentagens ótimas de betume, maior porosidade e menor baridade do que as misturas betuminosas que contêm cimento a substituir a cal hidráulica. As diferenças na percentagem ótima de betume, porosidade e na baridade aumentam com o aumento da percentagem de cal hidratada.

Porém a utilização de cal hidratada ou de cimento para substituição de cal hidráulica demonstrou uma redução da resistência à deformação permanente, para maiores percentagens de cal hidratada ou de cimento (5,0 % de cal hidráulica com 3,0 % de cal hidratada ou de cimento). Segundo Austroads (2013b) a utilização de cal hidratada no fabrico de misturas SMA não deve rondar mais do que 1,0 % a 1,5 % relativamente à massa total de agregados.

No estudo realizado por Pashula (2005), em que se avaliou diferentes fíleres (nomeadamente, fíler calcário, fíler recuperado, cinzas volantes) semelhante conclusão foi obtida, não sendo recomendada a utilização de grandes quantidades de cal hidratada. O estudo realizado permitiu ainda concluir que, à semelhança do que havia sido constatado por Schellenberger (2002), o fíler recuperado não deve ser recomendado, uma vez que esse material apresenta uma grande variabilidade nas suas propriedades mesmo quando a origem do fíler é a mesma. No caso do pó calcário foi utilizado com sucesso, tendo as cinzas volantes produzido misturas betuminosas muito secas resultante do excesso de finura do material à semelhança do que é indicado por Prowell *et al.* (2009), ou em misturas betuminosas que requerem uma elevada percentagem de betume, o que pode ser considerado como uma prática desadequada do ponto vista do custo/benefício comparativamente a outros tipos de fíleres.

A incorporação de cinzas volantes na composição de uma mistura SMA, apesar de permitir a utilização de um material com menor custo, deverá pelos motivos indicados anteriormente requer uma especial atenção dada a elevada percentagem de fíler usualmente utilizada nas misturas SMA, de modo a evitar misturas betuminosas demasiadamente secas.

— Influência das propriedades geométricas —

— Influência da granulometria —

De acordo com Tunnicliff (1967), Puzinauskas (1968) e Anderson *et al.* (1982), a dimensão das partículas do fíler influencia a coesão do masticue betuminoso e conseqüentemente da mistura betuminosa. Segundo Kandhal *et al.* (1998) quanto mais fino o fíler, maior a modificação do betume e maior o aumento da rigidez da mistura betuminosa. Todavia, quando as partículas são demasiadamente pequenas o fíler deixa de atuar como um fíler passando a atuar como um extensor do betume. Nesses casos verifica-se um aumento da exsudação e uma diminuição da resistência à deformação permanente resultante de uma diminuição da resistência ao corte, existindo casos em que a quantidade de betume poderá ter de ser reduzida para minimizar esses efeitos (Schrimsher, 1976).

Por esse motivo, segundo (UFC, 2001) o fíler a adotar numa mistura SMA deve ser bem graduado devendo na sua constituição conter apenas 20 % de partículas de dimensão inferior a 20 microm (0,020 mm) relativamente à massa total de fíler. Porém, segundo os estudos de Brown & Cooley (1999) e Bryant (2005), não foi constatada nenhuma correlação entre o material que passa no peneiro 0,020 mm e o desempenho do masticue, ainda assim não é recomendada a sua utilização.

De acordo com Kandhal *et al.* (1998) a dimensão da malha do peneiro em que passa 60 % do fíler (D_{60}) está relacionado com a resistência à deformação permanente das misturas betuminosas, estando a sensibilidade à água relacionada com a dimensão da malha do peneiro em que passa 10 % do fíler (D_{10}). É igualmente recomendada a avaliação da “limpeza” através do ensaio do azul de metileno para complementar a avaliação destas duas propriedades. De acordo com o mesmo estudo a dimensão do fíler e a limpeza dos finos não apresentam correlação com a resistência ao fendilhamento por fadiga.

— Influência das propriedades físicas —

— Influência da superfície específica —

No que concerne à superfície específica dos fíleres, em geral, foi verificado que quanto maior a superfície específica do fíler, maior será o efeito no aumento da rigidez da mistura betuminosa (Austroads, 2009). Segundo Brown & Cooley (1999) a superfície específica de um fíler tem um efeito significativo no comportamento das misturas betuminosas para temperaturas de serviço elevadas, sendo esse efeito negligenciável para temperaturas reduzidas, comparativamente à quantidade de fíler utilizada, a qual afeta significativamente o desempenho das misturas betuminosas.

— Influência do volume de vazios —

O volume de vazios é importante para o comportamento do fíler sendo dependente de quatro propriedades principais: a forma, a dimensão das partículas, a granulometria, e a textura (Kandhal, 1981 e Kandhal *et al.*, 1998). Segundo Rigden (1947) o volume de fíler e o volume de vazios existentes no fíler consistem nos principais parâmetros para avaliar as propriedades reológicas do conjunto betume-fíler.

Segundo Austroads (2009) o volume de vazios obtido pelo ensaio de Rigden apresenta uma boa correlação com a rigidez do masticue, podendo ser utilizado para caracterizar a forma do fíler.

Geralmente, fíleres com maior angulosidade tendem a produzir um maior volume de vazios neste ensaio. De acordo com Prowell *et al.* (2009) este ensaio é adequado para avaliar os fíleres a utilizar numa mistura SMA, sendo um ensaio menos dispendioso comparativamente ao equipamento *Superpave binder testing*.

No estudo efetuado por Harris & Stuart (1995) foi constatado que a utilização de fíleres com um volume de vazios superior a 39 % (volume de vazios Rigden) resulta em misturas betuminosas com uma elevada rigidez. Tal dificulta a aplicação e a compactação das misturas betuminosas, promovendo simultaneamente um aumento da sua propensão ao fendilhamento. Semelhantes conclusões foram obtidas nos estudos realizados por Brown & Cooley (1999) e Bryant (2005), os quais concluíram que fíleres com um volume de vazios Rigden superior a 50 % tendem a causar um aumento excessivo da rigidez do mastique betuminoso diminuindo a trabalhabilidade das misturas betuminosas. Por sua vez a utilização de fíleres com um reduzido volume de vazios (< 34 % de volume de vazios Rigden) tende a produzir misturas betuminosas com uma baixa rigidez, a qual promove um aumento da exsudação do betume após a aplicação e compactação das misturas SMA (Harris & Stuart, 1995).

O método Rigden dá origem ao conceito de betume livre (*free binder* na terminologia anglo-saxónica) que se relaciona com a capacidade do fíler para fixar o betume (*filler fixing fator – FFF*) e com a fração de betume fixo (*fixed binder fraction*), como se representa esquematicamente na Figura 3.14.

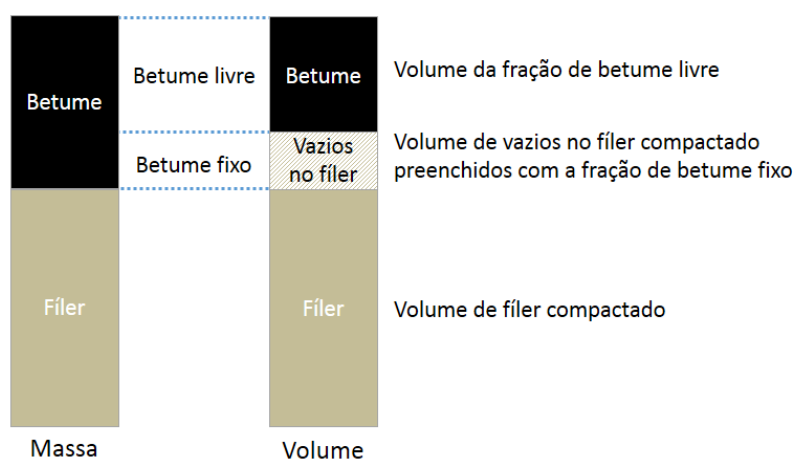


Figura 3.14 – Representação esquemática do conceito de betume livre no fíler

Este conceito assume que no volume de fíler existe um volume de vazios passível de ser preenchido com betume. O betume necessário para preencher os vazios do fíler é definido por betume fixo, sendo o restante definido por betume livre.

Assim o betume fixo aglutina o fíler, ficando o betume livre disponível para envolver os restantes materiais constituintes de uma mistura SMA. O volume de vazios é determinado através do ensaio de Rigden. Assim fíleres com uma grande capacidade para fixar o betume (elevado volume de vazios), produzem misturas betuminosas que parecem mais secas e que geralmente têm um mastique betuminoso mais rígido (Austroads, 2009). Fíleres com reduzida capacidade para fixar o betume (reduzido volume de vazios), promovem um aumento do betume livre, o que poderá resultar em misturas betuminosas com propensão para ocorrência de exsudação após aplicadas (Austroads, 2009).

De acordo com (Austroads, 2013) a fração de betume fixo no fíler pode ser determinada através da seguinte equação:

$$f_{binder} = \left(\frac{100 - P_b}{100} \right) \cdot \frac{\rho_b}{\rho_f} \cdot \frac{V_{v,f}}{(100 - V_{v,f})} \cdot \frac{P_f}{P_b} \tag{3.2}$$

sendo:

f_{binder} - fração de betume fixo no fíler;

P_b - percentagem de betume (%);

ρ_b - massa volúmica do betume (Mg/m³);

ρ_f - massa volúmica do fíler (Mg/m³);

V_b - volume de betume na mistura betuminosa (%);

$V_{v,f}$ - volume de vazios no fíler compactado com o equipamento de Rigden (%);

P_f - percentagem de fíler relativamente à massa total de agregados (%).

De acordo com o estudo efetuado por Austroads (2013) foi observada uma boa correlação entre a fração de betume fixo no fíler e a viscosidade do conjunto betume-fíler a 165 °C determinada através do viscosímetro de Brookfield. Na Figura 3.15 são apresentados graficamente os resultados do estudo, tendo-se obtido um coeficiente de correlação de 0,91 entre a fração de betume fixo e a viscosidade do conjunto betume-fíler.

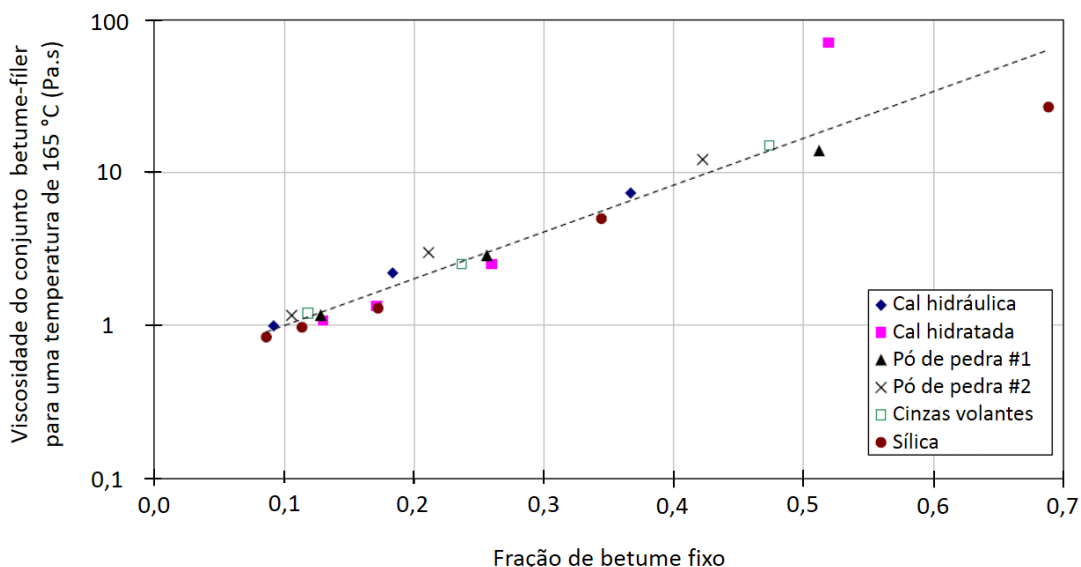


Figura 3.15 – Variação da viscosidade do conjunto betume-fíler relativamente à fração de betume fixo (adaptado de Austroads, 2013)

O betume livre no fíler deverá ser posteriormente calculado como o volume total de betume (%) menos o volume absorvido pelos agregados (%) e o volume teórico de betume fixo no fíler (%). De acordo com o conceito de betume livre no fíler as especificações de QDMR indicam que as misturas SMA devem apresentar um volume de betume livre mínimo de 7,0 % (QDMR, 2011 e Austroads, 2013b). De acordo com Prowell *et al.* (2009) o volume mínimo de betume livre deve estar compreendido entre 8 % e 11 % (7,5 % e 11 % durante o fabrico em central). O intervalo definido baseia-se em misturas SMA aplicadas nos EUA (Virgínia e Maryland) e na Austrália (Queensland).

A utilização do conceito de betume fixo no fíler e consequentemente de betume livre no fíler permite que a formulação das misturas SMA tenha em consideração a obtenção de misturas betuminosas com uma melhor trabalhabilidade e menor propensão para a exsudação, ao invés de uma preocupação apenas com o desempenho da mistura SMA. Nesse sentido será avaliado o conceito de betume livre no fíler, no âmbito do presente trabalho no ponto 8.2.3 (Fase 4 do estudo experimental) para aferir a sua aplicabilidade no método de formulação proposto.

3.4.2 ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES EXIGIDAS PARA O FÍLER

Segundo a informação compilada, relativa às propriedades do fíler e respetivos valores recomendados internacionalmente para as misturas SMA, é possível verificar que é comum ser recomendado o tipo de fíler e a percentagem máxima a utilizar no caso da cal hidratada e do cimento. No que concerne às propriedades do fíler é habitualmente indicada qual a granulometria que o fíler deverá apresentar, assim como propriedades físicas avaliadas através do volume de vazios Rigden, da “limpeza” do fíler através do azul metileno ou equivalente de areia, assim como a avaliação do índice de plasticidade. Entre estas propriedades, apenas a avaliação do equivalente de areia e índice de plasticidade 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.

No Quadro 3.12 apresenta-se um resumo das propriedades utilizadas para o fíler e respetivos valores recomendados internacionalmente para as misturas SMA, baseado no que foi referido no ponto 3.4 e na informação compilada no Anexo I-G.

Quadro 3.12 – Resumo das propriedades do fíler recomendadas internacionalmente com influência no comportamento das misturas SMA

Propriedades do fíler		Tráfego Reduzido (TMDA < 5000) SMA ≤ 8 mm	Tráfego Médio/Elevado (TMDA ≥ 5000) SMA ≥ 8 mm
Tipo de fíler		Cal hidráulica, cal hidratada, cimento Portland, pó de pedra	
Percentagem de material (%)		1 - 3 (cal hidratada) 2 - 3 (cimento Portland)	
Propriedades físicas	Rigden, $V_{v,f}$	$V_{2\theta}/V_{50}$	
Propriedades geométricas	Material passado peneiro 0,425 mm	100	
	Material passado no peneiro 0,150 mm	90 - 100	
	Material passado no peneiro 0,075 mm	65 - 100	
Propriedades de “limpeza”	MB_F/EA	MB_F10 ; $EA \leq 2$	
	IP	Não plástico - IP_4	

3.4.3 RECOMENDAÇÕES PARA AS PROPRIEDADES DO FÍLER A UTILIZAR EM PORTUGAL NAS MISTURAS SMA

Da análise das propriedades recomendadas para o fíler a nível internacional, importa aferir o seu adequado enquadramento a nível nacional, considerando os tipos de fíler disponíveis no nosso país. Para o efeito, teve-se em consideração o CETO (2009), sendo no Quadro 3.13 apresentadas as recomendações no que se refere aos valores limite a definir para as propriedades do fíler a utilizar em Portugal para o fabrico de misturas SMA.

Quadro 3.13 – Recomendações para as propriedades do fíler a utilizar no fabrico de misturas SMA em Portugal

Propriedades do fíler		Tráfego Reduzido (TMDA < 5000) SMA ≤ 8 mm	Tráfego Médio/Elevado (TMDA ≥ 5000) SMA ≥ 8 mm
Tipo de fíler		Pó de calcário, cimento Portland, cal hidráulica, cal hidratada	
Percentagem máxima de material (%)		1,5 (cal hidratada ou cimento)	
Propriedades físicas	Rígidon, $V_{v,f}$	V_{28}/V_{38}	
Propriedades geométricas	Material passado peneiro 2 mm	100	
	Material passado no peneiro 0,125 mm	85 - 100	
	Material passado no peneiro 0,063 mm	70 - 100	
Propriedades de "limpeza"	MB_F	MB_F10	
	IP	IP_{NR}	

De acordo com o Quadro 3.13 é recomendada a utilização de fíleres 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, à semelhança do que foi constatado no ponto 3.4.1. Apesar das cinzas volantes e dos fíleres 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 obter misturas betuminosas com uma reduzida trabalhabilidade e elevada heterogeneidade segundo o que foi mencionado no ponto 3.4.1.

No que concerne às propriedades geométricas e físicas teve-se em consideração o CETO (2009) para a definição das categorias a adotar para as propriedades do fíler, as quais são em tudo semelhantes às recomendadas internacionalmente para o fíler a utilizar em misturas SMA.

Apesar das recomendações apresentadas no Quadro 3.13, não é objetivo limitar a utilização de outros materiais, sendo recomendado sempre que se utilizem materiais que não se enquadrem nas categorias apresentadas no Quadro 3.13, efetuar nomeadamente o estudo de formulação, trecho experimental e acompanhamento da obra, de modo a avaliar o desempenho da mistura SMA e desse modo validar a utilização de materiais com diferentes categorias para as propriedades.

3.5 O MASTIQUE BETUMINOSO – BETUME

3.5.1 INFLUÊNCIA DO BETUME NO COMPORTAMENTO DAS MISTURAS SMA

— Influência da percentagem de betume —

O betume numa mistura betuminosa SMA representa cerca de 6,5 % a 6,8 % da massa total da mistura betuminosa de acordo com Austroads (2009), podendo a mesma segundo a norma EN 13108-5 variar de 5,0 % a 7,6 % relativamente à massa total da mistura SMA, o que corresponde a cerca de 12,0 % a 17,5 % do volume das misturas betuminosas se considerada uma massa volúmica de 1,030 Mg/m³.

A elevada percentagem de betume utilizada nas misturas SMA, comparativamente às percentagens de betume habitualmente utilizadas nas misturas betuminosas convencionais (entre 3,0 % e 5,0 %), contribui para um aumento da espessura da película de betume que envolve os agregados, o que segundo Campen *et al.* (1959) e Wang (2007), permite misturas betuminosas mais flexíveis e com maior durabilidade relativamente a misturas betuminosas com menor película de betume, as quais tendem a fendilhar mais facilmente e a ser mais propensas à desagregação.

Isso mesmo foi constatado por Kandhal & Chakraborty (1996) os quais concluíram que a espessura da película de betume ótima a utilizar numa mistura betuminosa para minimizar o envelhecimento a curto e a longo prazo do betume deverá estar compreendida entre 9 e 10 microns, verificando-se para uma espessura inferior um aumento do envelhecimento, espessura que corrobora os resultados obtidos por Goode & Lufsey (1965).

Porém, aquando da formulação de uma mistura SMA casos podem ocorrer em que se verifica uma menor película de betume a envolver os agregados, mesmo quando se obtêm valores suficientemente elevados de VMA como resultado de uma menor percentagem ótima de betume relativamente à massa total da mistura betuminosa, quando se utilizam agregados com uma maior massa volúmica (Austroads, 2009). Semelhante situação poderá ocorrer quando os agregados utilizados apresentem uma elevada absorção de água, sendo disso exemplo, de acordo com a análise realizada no ponto 3.2.2, os agregados obtidos a nível nacional em algumas pedreiras da zona centro e sul (Faro), com especial incidência nas Regiões Autónomas de Portugal.

A absorção de betume depende segundo Cole (2011) da quantidade e dimensão dos vazios nos agregados, da dimensão do agregado, da rugosidade do agregado e da composição química e mineral. Kandhal & Khatri (1992), constataram para agregados com poros com diâmetro inferior a 0,05 microns que não se observa uma significativa absorção de betume. Segundo os autores a dimensão dos poros para os quais se observava uma maior absorção de betume consistiam em diâmetros compreendidos entre 0,05 – 0,1 microns.

Em 1937 Reagel (Reagel, 1937), estimou o valor da absorção de betume como correspondendo a 75 % da absorção de água. Larsen (1957) determinou a absorção de betume em função do volume de agregado variando entre 26 % e 88 % da absorção de água. De acordo com Cole (2011) a absorção do betume varia entre 69 % e 100 %.

As misturas SMA permitem a utilização de uma maior percentagem de betume, porém a sua definição (percentagem ótima de betume) apresenta uma maior variabilidade relativamente a uma mistura betuminosa densa (Brown & Mallick, 1994), sendo muito sensível à percentagem de agregados finos e fíler que é utilizada (UFC, 2001). Semelhante conclusão foi obtida no estudo realizado por Ljubic & Prosen (2004) onde foram avaliadas duas misturas SMA (SMA8 e SMA 11) à deformação permanente. De acordo com o estudo realizado observou-se que o fíler e o betume apresentam uma

importância primordial na resistência à deformação permanente das misturas SMA. Os autores recomendaram à semelhança do que foi constatado no ponto 3.3.1, que a formulação das misturas SMA deve ser realizada fazendo variar a percentagem de agregados grossos e finos, mantendo inalterável a percentagem de fíler e de betume, ao contrário do que é efetuado segundo o método de formulação *Marshall*.

Complementarmente, se a adoção de uma maior percentagem ótima de betume permite um aumento da durabilidade das misturas SMA, o aumento da espessura da película de betume que envolve os agregados das misturas SMA, tende a requerer para estados iniciais da vida da camada de desgaste alguma análise e cuidados no que concerne à segurança da circulação rodoviária, dada a existência de uma película rica em betume que envolve os agregados e que tende a criar uma superfície que apresenta um baixo coeficiente de atrito principalmente para condições em que o pavimento se encontra molhado (Woodward *et al.*, 2005).

De acordo com estudos realizados por Bastow *et al.* (2005) e McGhee *et al.* (2005) o valor do coeficiente de atrito inicial é similar ao que é obtido para misturas betuminosas convencionais, sendo a película de betume que envolve os agregados completamente removida entre 6 a 12 meses após aplicada a mistura SMA. Ainda assim segundo o estudo realizado por Bastow *et al.* (2005) apesar dos valores iniciais do coeficiente de atrito serem reduzidos, são tipicamente superiores aos valores mínimos aceitáveis.

De acordo com estudo realizado por Woodward *et al.* (2005) sobre a avaliação do coeficiente de atrito em misturas SMA, a combinação das propriedades dos agregados e do betume tem particular importância sobre o coeficiente de atrito inicial. Segundo os mesmos autores o tipo de agregado é importante no caso de se utilizar betumes convencionais, em particular para os agregados com menor resistência que irão perder rapidamente a película de betume que os envolve. Porém, a utilização de agregados com elevado *PSV* não promove numa fase inicial um aumento do coeficiente de atrito, ao contrário de agregados com menores valores de *PSV* que tendem a quebrar mais rapidamente e a apresentar valores de coeficiente de atrito iniciais semelhantes aos que se obtêm para agregados com *PSV* elevado após removida a película de betume.

Para tentar aumentar o coeficiente de atrito inicial, segundo Drieschner (2005) é obrigatório na Alemanha (como se observa na Figura 3.16) o espalhamento de agregados de pequena dimensão (*griting*, na terminologia anglo-saxónica), sobre a camada de SMA após a sua aplicação e para uma gama de temperaturas compreendida entre 65 °C e 93 °C.



Figura 3.16 – Equipamento e espalhamento de agregados de pequena dimensão (Drieschner & Schaefer, 2005)

A Figura 3.17 apresenta o aspeto antes e após o espalhamento de agregados de pequena dimensão. Os agregados espalhados irão absorver o excesso de betume na superfície da camada de desgaste melhorando o atrito inicial da camada de desgaste.



Figura 3.17 – Aspeto antes (à esquerda) e após espalhamento de agregados de pequena dimensão (à direita, Drueschner, 2006)

De acordo com Schreck (2004), os agregados a utilizar podem ser previamente envolvidos com 0,8 % de betume de modo a controlar o pó que envolve os agregados, sendo igualmente possível o seu armazenamento sem que as partículas se agrupem.

Segundo o mesmo autor, os agregados a utilizar no espalhamento devem ter uma dimensão entre 1 mm e 3 mm, sendo utilizada uma taxa de aplicação de cerca de 0,7 kg/m² a 1,4 kg/m² para misturas SMA com dimensão máxima nominal de 8 mm. Quando utilizadas misturas SMA com agregados de maior dimensão, o espalhamento de agregados entre 2 mm e 5 mm deve ser efetuada, utilizando uma taxa de aplicação de 1,4 kg/m² a 2,3 kg/m².

— Influência do tipo de betume —

No que concerne ao tipo de betume usualmente utilizado nas misturas SMA, é comum segundo Campbell (1999) a utilização de betumes convencionais com penetração igual a 50/70×10⁻¹ mm (equivalente à classe 320) e em menor extensão o betume convencional com penetração igual a 70/100×10⁻¹ mm (equivalente à classe 170).

Apesar de comum a utilização do betume com classe de penetração igual a 50/70×10⁻¹ mm, a adoção de um betume com determinada penetração, depende da gama de temperaturas a que uma camada estará sujeita, assim como do volume de tráfego e cargas que a solicitará. O valor da penetração utilizado vai influenciar a flexibilidade verificando-se que quanto maior o valor da penetração, maior é a flexibilidade que a mistura betuminosa apresenta, resultando num aumento da resistência à fadiga, em contraste com uma diminuição da resistência à deformação permanente.

No caso específico das misturas SMA, a utilização de betumes com uma penetração superior à requerida para a gama de temperaturas a que a camada betuminosa estará sujeita vai facilitar o escorrimento de material betuminoso durante a fase de fabrico e aplicação, assim como a exsudação durante a fase de serviço (Noor & Omar, 2001).

Outro aspeto a ter em consideração aquando da escolha do tipo de betume consiste no facto do adequado desempenho da SMA à deformação permanente se basear principalmente no imbricamento obtido pelo esqueleto de partículas ativas (“agregados grossos”), ao invés de se basear no mastique betuminoso, pelo que o efeito benéfico na deformação permanente, resultante da utilização de betume modificados é habitualmente inferior ao que é obtido para outras misturas betuminosas (Nicholls, 1998).

Contudo, a necessidade de produzir pavimentos com camadas betuminosas mais flexíveis, mais resistentes às solicitações do tráfego, menos suscetíveis às variações climáticas, em suma com maior durabilidade, faz com que seja cada vez maior o recurso a betumes modificados para melhorar o comportamento das misturas betuminosas. Na Alemanha a utilização de betumes modificados com polímeros em misturas SMA tem sido a principal escolha desde 1998 (Austroads, 2009). Segundo Campbell (1999) e Allen (2006) o betume modificado com polímeros elastómeros do tipo estireno-butadieno-estireno (SBS) consiste entre os betumes modificados, no que maior utilização apresenta nas misturas SMA.

De acordo com Sharp (1996), Brown *et al.* (1997a), Chiu & Lu (2007) e Beckedahl (2009) a utilização de betumes modificados, nomeadamente com SBS, EVA e modificados por via húmida com borracha reciclada de pneus permite aumentar a resistência à deformação permanente das misturas SMA relativamente às misturas SMA que utilizam betumes convencionais.

Relativamente à resistência à fadiga, Aurstad *et al.* (2006) concluíram que misturas SMA com betumes modificados com SBS apresentam uma maior resistência ao fendilhamento por fadiga comparativamente a misturas SMA com betumes convencionais. Mollenhauer (2007) avaliou a resistência à fadiga para uma mistura SMA 8 com uma percentagem de betume de 6,6 % fazendo variar o tipo de betume utilizado. Na Figura 3.18 é possível constatar um aumento da resistência ao fendilhamento por fadiga à medida que se utiliza betumes com maior nível de modificação, sendo a mistura SMA com betume convencional a que menor resistência à fadiga apresenta.

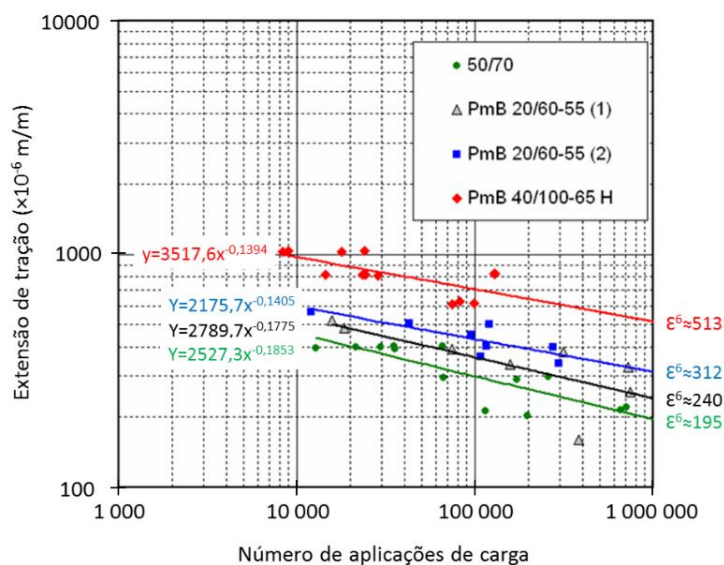


Figura 3.18 – Resultados dos ensaios para avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga de uma SMA 8 com 6,6 % de betume (adaptado de Mollenhauer, 2007)

De acordo com a Figura 3.18 a mistura SMA com betume convencional apresentou uma extensão de tração para um milhão de aplicações de carga (ϵ_6) de cerca de 200×10^{-6} , variando o mesmo até um ϵ_6 de cerca de 500×10^{-6} consoante a modificação do betume.

Apesar da utilização de betumes modificados no fabrico de misturas SMA ser comum e permitir melhorar as suas propriedades, não evita que seja necessária a utilização de aditivos estabilizantes para mitigar a propensão destas misturas betuminosas para a ocorrência de escorrimento de material betuminoso (BCA, 1999 e Austroads, 2009). Isso mesmo foi observado no estudo realizado por Brown & Mallick (1994), onde se constatou que as misturas SMA com betume modificado com polímeros apresentam uma redução do valor do escorrimento, porém ainda assim superior comparativamente às misturas SMA com adição de 0,3 % de fibras celulósicas ou de fibras minerais e superior ao máximo admissível de 0,3 %.

3.5.2 ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES EXIGIDAS PARA O BETUME

Segundo a informação compilada das propriedades do betume e respetivos valores recomendados internacionalmente para as misturas SMA é possível verificar que as propriedades para o betume comumente recomendadas se referem ao tipo e percentagem de betume a utilizar, função da dimensão máxima nominal do agregado utilizado na mistura SMA.

No Quadro 3.14 apresenta-se um resumo das propriedades do betume e respetivos valores recomendados internacionalmente para as misturas SMA, baseado na informação compilada no Anexo I-H.

Quadro 3.14 – Resumo das propriedades do betume recomendadas internacionalmente com influência no comportamento das misturas SMA

Propriedades do betume		Tráfego Reduzido (TMDA < 5000) SMA ≤ 8 mm	Tráfego Médio/Elevado (TMDA ≥ 5000) SMA ≥ 8 mm
SMA 4	Tipo de betume	Convencional	-
	Percentagem de betume (%)	6,4 - 7,4	-
SMA 5	Tipo de betume	Convencional, PmB	-
	Percentagem de betume (%)	7,2 - 7,4	-
SMA 6	Tipo de betume	Convencional, PmB	-
	Percentagem de betume (%)	6,5 - 7,5	-
SMA 8 (SMA 7)	Tipo de betume	Convencional, PmB	PmB
	Percentagem de betume (%)	6,0 - 8,0	6,0 - 8,0
SMA 10 (SMA 9,5)	Tipo de betume	-	Convencional, PmB
	Percentagem de betume (%)	-	6,0 - 7,5
SMA 11	Tipo de betume	-	Convencional, PmB
	Percentagem de betume (%)	-	6,0 - 7,5
SMA 12 (SMA 12,5)	Tipo de betume	-	Convencional, PmB
	Percentagem de betume (%)	-	5,8 - 7,0
SMA 14	Tipo de betume	-	Convencional, PmB
	Percentagem de betume (%)	-	5,8 - 7,0

Efetuada uma súmula das propriedades habitualmente recomendadas internacionalmente para o betume a utilizar no fabrico de uma SMA como se apresenta no Quadro 3.14, é possível constatar, como seria espectável, para as misturas a aplicar em estradas com tráfego reduzido, uma menor exigência relativamente aos limites definidos para as propriedades recomendadas. Essa menor

exigência é mais perceptível relativamente ao tipo de betume que é recomendado. Para misturas SMA com agregados de dimensão igual ou inferior a 8 mm é comum a recomendação de betumes convencionais. No caso de misturas SMA com agregados de dimensão igual ou superior a 8 mm e tráfego médio/elevado é tendencialmente recomendado betumes convencionais com menor penetração ou betumes modificados dada a maior exigência a que este tipo de misturas betuminosas estará sujeita. Porém, particular atenção deve ser tida, se recomendados betumes excessivamente modificados, os quais podem dificultar a aplicação deste tipo de misturas (Austroads, 2009).

No que concerne à percentagem de betume, verifica-se a sua diminuição para um aumento da dimensão máxima nominal do agregado, podendo variar entre 6,4 % e 7,4 % para uma mistura SMA 4 e entre 5,8 % e 7,0 % para uma mistura SMA 14. A diminuição da percentagem de betume resulta, nomeadamente, de uma menor área específica na mistura de agregados virtude de uma maior dimensão do agregado utilizado.

Como regra geral, é comum na literatura ser indicada uma percentagem de betume mínima de 6,0 % relativamente à massa total da mistura SMA (CAPA, 2002), tendo-se observado inicialmente que segundo a norma EN 13108-5 a percentagem de betume pode variar de 5,0 % a 7,6 % relativamente à massa total da mistura SMA. Porém, segundo o Quadro 3.14 é possível observar que para misturas SMA com dimensão máxima nominal dos agregados inferior a 8 mm a percentagem mínima é de 6,4 %. Para misturas SMA com dimensão máxima nominal do agregado entre 8 mm e 11 mm a percentagem mínima é de 6,0 % e quando a dimensão máxima nominal do agregado é igual ou superior a 12 mm a percentagem mínima de betume é de 5,8 %.

3.5.3 RECOMENDAÇÕES PARA AS PROPRIEDADES DO BETUME A UTILIZAR EM PORTUGAL NAS MISTURAS SMA

Da análise das propriedades recomendadas para o betume a nível internacional, importa aferir o seu adequado enquadramento a nível nacional, considerando os betumes disponíveis no nosso país. Essa análise é fundamental para se poder conhecer quais as propriedades do betume a recomendar para as misturas SMA a fabricar em Portugal e conseqüentemente se os betumes existentes permitem o fabrico de misturas SMA como definido internacionalmente. Para o efeito, teve-se em consideração o CETO (2009), sendo no Quadro 3.15 apresentadas as recomendações no que refere aos valores limite a definir para as propriedades do betume a utilizar em Portugal para o fabrico de misturas SMA.

Quadro 3.15 – Recomendações para as propriedades dos betumes a utilizar no fabrico de misturas SMA em Portugal de acordo com o CETO (2009)

Requisitos do betume	Propriedades do betume	Tráfego Reduzido (TMDA < 5000) SMA ≤ 8 mm	Tráfego Médio/Elevado (TMDA ≥ 5000) SMA ≥ 8 mm		
Tipo de betume		35/50 ¹⁾ , 50/70	PmB 25/55	PmB 45/80	PmB 65/105
Percentagem mínima de betume		6,0	5,5		
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)		
	ou Penetração retida, 25 °C (%)	≥ 53	-		
	ou Aumento da Temp. de Amolecimento (°C) ²⁾	≤ 8, ≤ 9	Classe 2 (≤ 8)		
	Penetração, 25°C, 1/10 mm (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)		

Legenda: 1) aplicável a todas as misturas SMA preferencialmente na rede rodoviária principal; 2) obrigatória a sua avaliação no caso dos betumes modificados

Nas recomendações apresentadas no Quadro 3.15 é possível observar a recomendação apenas de betumes convencionais no caso de estradas com tráfego reduzido, porém casos podem existir em que uma mistura SMA com dimensão inferior a 8 mm possa ser utilizada, nomeadamente em obras de arte da rede rodoviária principal, pelo que poderá ser requerida a utilização de betumes modificados, os quais deverão respeitar as propriedades indicadas no Quadro 3.15 para misturas SMA com dimensão máxima nominal de agregados igual ou superior a 8 mm.

No caso da percentagem mínima de betume, são recomendadas para as misturas SMA a fabricar em Portugal, valores inferiores aos internacionalmente especificados, uma vez que se considera que, numa primeira fase da aplicação deste tipo de misturas betuminosas, se deve para os materiais disponíveis a nível nacional validar a utilização de percentagens mínimas superiores.

Dos betumes especificados pelo CETO (2009) não se indica no Quadro 3.15 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, como anteriormente referido.

Não sendo objetivo limitar a utilização de outros betumes, é recomendado sempre que se utilizem materiais que não se enquadrem no Quadro 3.15, efetuar nomeadamente o estudo de formulação, trecho experimental e acompanhamento da obra, de modo a avaliar o desempenho da mistura SMA e desse modo validar a utilização de materiais com diferentes propriedades.

3.6 O MASTIQUE BETUMINOSO – 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, como se pode observar na Figura 3.19, promovendo a segregação do mastique 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 (Figura 3.19), como observado por Brown (1992a) e Brown et al. (1997a) em misturas SMA aplicadas nos EUA.



Figura 3.19 – Escorrimento de material betuminoso (à esquerda, JRS, Rettenmaier, 2007) e exsudação (à direita, JRS, Rettenmaier, 2005a)

A quantidade de escorrimento, é assim função do volume total de betume utilizado, do qual uma parte será absorvida pela mistura de agregados, variando essa absorção de acordo com o tipo de agregados e de betume utilizados, sendo o restante volume de betume utilizado para envolver os agregados. Todavia, o volume de betume necessário para envolver os agregados é função da superfície específica da mistura de agregados utilizada, sendo essa superfície no caso das misturas SMA inferior à necessária para o volume de betume disponível, dada a elevada percentagem de agregados grossos utilizada. Assim o volume de betume que não consegue envolver a superfície dos agregados fica livre na mistura betuminosa, sendo esse o volume de betume mais propenso ao escorrimento quando a mistura betuminosa é sujeita a temperaturas elevadas.

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 de um 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; materiais provenientes da reciclagem como seja a borracha proveniente dos pneus e o plástico; sílica artificial e em menor extensão polímeros; ou ainda a combinação destes aditivos.

No que concerne à adição de borracha pela via húmida para modificar o betume a utilizar nas misturas SMA, diversos estudos têm sido realizados (Sharma & Goyal, 2006, Kumar *et al.*, 2007, Dong & Tan, 2011 e Mashaan *et al.*, 2013), tendo-se observado de uma maneira geral que a sua adição permite mitigar o escorrimento de material betuminoso, apresentando as misturas SMA um comportamento similar ou melhor comparativamente às misturas SMA que utilizam fibras celulósicas ou minerais nomeadamente no que concerne à resistência ao fendilhamento por fadiga.

A adição de plásticos provenientes da reciclagem tem igualmente sido avaliada (Moghaddam *et al.*, 2012 e Bindu & Beena, 2014), observando-se que a sua utilização contribui para mitigar o escorrimento de material betuminoso. No que concerne ao comportamento, a adição de plásticos permite um aumento da resistência ao fendilhamento por fadiga comparativamente a misturas SMA com adição de fibras.

Relativamente à adição de sílica artificial, (Ishai *et al.*, 2010) demonstraram ser possível a sua utilização nas misturas SMA para mitigar o escorrimento, evidenciando as misturas que incorporam sílica na sua composição um comportamento similar ou melhor comparativamente a misturas SMA que utilizam fibras celulósicas, nomeadamente na resistência à deformação permanente.

A adição de polímeros termoplásticos e elastómeros diretamente no misturador de uma central de misturas betuminosas tem igualmente sido avaliada (Stuart & Malmquist, 1994, Al-Hadidy & Tan, 2009 e Bindu & Beena, 2014), sendo habitualmente utilizadas percentagens de 3,0 % a 8,0 % relativamente à massa total de betume (Ibrahim, 2005). Segundo Nicholls (1998) a utilização de polímeros nas misturas SMA é habitualmente realizada para melhorar o desempenho das misturas betuminosas, tendo um efeito secundário na mitigação do escorrimento de material betuminoso nas misturas SMA comparativamente à adição de fibras à semelhança do que é constatado por Mogawer & Stuart (1995), Brown & Mallick (1995) e AIPCR (1999).

Apesar da utilização dos materiais provenientes da reciclagem, da sílica artificial e dos polímeros permitirem mitigar o escorrimento, assim como melhorar o desempenho das misturas SMA e, ser possível a sua utilização de acordo com a norma EN 13108-5, é ainda assim quase que unânime a utilização de fibras nas aplicações *in situ* que se efetuam de misturas SMA.

Estudos realizados têm demonstrado que a adição de fibras permite mitigar de forma efetiva o escorrimento em misturas SMA durante o fabrico, transporte, aplicação e compactação (Serfass & Samanos, 1996 e Hassan *et al.*, 2005). A adição de fibras permite ainda reduzir a sensibilidade à água (Putman & Amirkhanian, 2004), assim como melhorar a resistência à deformação permanente (Maurer & Malasheskie, 1989 e Tapkin 2007).

Quanto à sua classificação, segundo AIPCR (1999) as fibras abrangem um amplo leque de materiais as quais se podem classificar como naturais (i.e. celulose e amianto) e não naturais, as quais se podem subdividir em fibras sintéticas (i.e. poliéster, polietileno, polipropileno e acrílico) ou inorgânicas (i.e. vidro, metálicas e minerais). Apesar da diversidade, nem todos os tipos de fibras indicados são comumente utilizados nas misturas SMA. Entre os diferentes tipos de fibras mencionadas, a fibra mais usual no fabrico de SMA é a fibra orgânica natural de celulose, sobre a qual se pormenorizará posteriormente no presente ponto.

No que concerne às fibras naturais de amianto foram inicialmente aplicadas no fabrico de SMA (Kast, 1985 e Samanos *et al.*, 1991), apresentando habitualmente um comprimento entre 1,5 mm e 40 mm (AIPCR, 1999). Porém, posteriormente foram proibidas pela elevada propensão para causar alergias e doenças cancerígenas, segundo o IARC (2002).

Adicionalmente aos tipos de fibras anteriormente referidos, outros materiais fibrosos naturais têm recentemente merecido estudos no sentido de avaliar a sua possível incorporação em misturas SMA, como seja o caso de fibras provenientes da cana-de-açúcar (Stael, 1997 e Leal, 2013), e de

cocos (Vale, 2007) as quais têm habitualmente uma dimensão inferior a 1,3 mm e 10 a 20 microns de diâmetro de acordo com Suchismita (2009).

Apesar dos vários tipos de fibras que podem ser utilizadas no fabrico de misturas SMA, apenas as fibras naturais (de celulose) e as fibras não naturais inorgânicas (minerais), apresentam maior desenvolvimento em termos de divulgação e aplicação (Brown, 1992a, Chen & Li, 2005, Sharma & Goyal, 2006 e Prowell *et al.*, 2009).

Segundo (Prowell *et al.*, 2009) a adição de fibras celulósicas ou minerais durante o processo de fabrico das misturas SMA apresenta as seguintes vantagens:

- aumentar a quantidade de betume passível de ser utilizada;
- aumentar a espessura da película de betume que envolve os agregados entre 30 % a 40 %;
- aumentar a estabilidade da mistura betuminosa;
- promover algum imbricamento entre as fibras e os agregados que melhora a resistência da mistura betuminosa;
- mitigação do escorrimento durante o transporte, aplicação e compactação da mistura betuminosa.

Porém, de ambos os tipos de fibras, são as fibras de celulósicas, as que apresentam uma aplicação quase exclusiva a nível mundial (Austroads, 2009), que segundo ARRB (2004) se deve à sua elevada relação custo/benefício e que resulta do facto das fibras minerais absorverem menor quantidade de betume, comparativamente às fibras celulósicas (Brown, 1992a e OPSS, 2004).

Por esse motivo é comum a utilização de 0,3 % a 0,5 % de fibras celulósicas relativamente à massa total da mistura SMA, sendo requerido no caso das fibras minerais, para a mesma percentagem de betume, a adição de uma quantidade de fibras entre 0,5 % e 0,9 % da massa total da mistura SMA. Para uma melhor compreensão, na Figura 3.20 é possível observar a morfologia das fibras celulósicas e minerais.

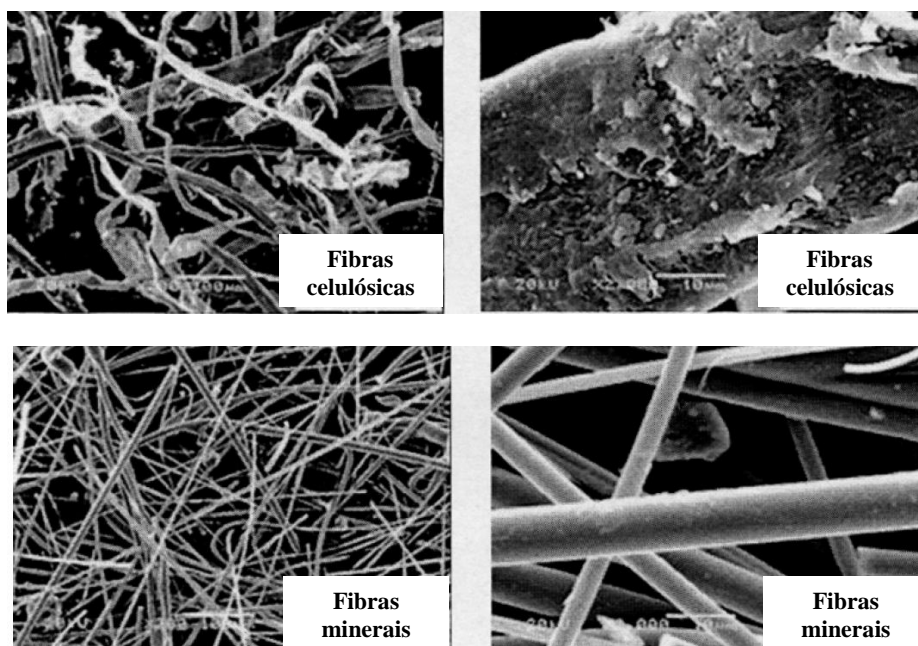


Figura 3.20 – Morfologia das fibras celulósicas e minerais (adaptado de Ye & Wu, 2009)

Na Figura 3.20 é possível observar as fibras celulósicas e minerais através do recurso a um microscópio com imagem ampliada 200 e 2000 vezes. Nas imagens é possível observar que as fibras celulósicas são compostas essencialmente por material cuja superfície apresenta uma textura com uma elevada rugosidade, o que promove uma elevada capacidade deste tipo de fibras para absorver o betume. No caso das fibras minerais são mais regulares, arredondadas tendo uma superfície com uma reduzida textura (Ye & Wu, 2009). A superfície lisa, rígida e inorgânica das fibras minerais promove uma menor capacidade para absorver betume comparativamente a outros tipos de fibras.

Adicionalmente, a utilização de fibras celulósicas permite a utilização de um material inerte, resistente a ácidos diluídos e soluções alcalinas e, inócuo do ponto de vista fisiológico e toxicológico para a saúde humana e ambiental. As fibras minerais ao contrário das fibras de celulose, podem causar alergias segundo o IARC (2002), à semelhança do que sucede de forma mais severa, com as fibras de amianto, que foram inicialmente aplicadas no fabrico das SMA e posteriormente proibidas.

Dos vários tipos de fibras utilizadas as fibras celulósicas são as que maior aplicação e capacidade de absorção de betume apresentam. Nesse sentido e uma vez que serão o tipo de fibras utilizadas no presente trabalho, será seguidamente dada particular atenção às mesmas.

— Fibras celulósicas —

As fibras celulósicas são constituídas na sua essência como a designação indica, por pasta de papel, que pode ser obtida através do processamento de madeira, principalmente de pinheiros e eucaliptos, ou através da reciclagem de papel usado, o que constitui um benefício ambiental.

Este material pode ser utilizado no fabrico de misturas SMA, sob a forma de fibras individuais, de fibras aglomeradas (*pellets*, na terminologia anglo-saxónica) sem adição de um aglutinante, ou ainda como fibras aglomeradas com adição de um aglutinante e/ou de aditivos, tendo estas últimas a forma de um granulado.

As fibras celulósicas podem ser fornecidas: em sacos termo fundíveis que se derretem rapidamente para as temperaturas de fabrico, quando introduzidos no misturador de uma central de misturas betuminosas; sacos de grandes dimensões (500 kg ou 1000 kg) ou; para armazenamento em silos. No caso dos sacos termo fundíveis, a massa de fibras existente em cada saco pode ser definida com o fornecedor das fibras e deverá basear-se na máxima quantidade de massa que a central de misturas betuminosas consiga produzir em cada “amassadura”, sendo comum o fabrico de sacos com uma massa de 3 kg, 5 kg ou 10 kg. A utilização de sacos termo fundíveis é mais comum para obras de pequena dimensão ou para estudos de investigação em que a mão-de-obra requerida para a sua adição é diminuta.

— Fibras celulósicas individuais —

As fibras celulósicas individuais (Figura 3.21) podem apresentar diversas dimensões, que variam consoante o tipo de aplicação que se pretenda. Segundo AIPCR (1999), geralmente no fabrico de SMA são utilizadas fibras com um comprimento entre 0 e 2 mm e diâmetro que pode variar entre 17 e 45 micron.



Figura 3.21 – Aspeto das fibras celulósicas individuais (Fiberand, 2014)

Este tipo de fibras celulósicas é a que maior aplicação teve no fabrico de misturas SMA. Uma das suas principais vantagens reside no facto de se tornarem imediatamente ativas aquando da adição com os agregados e com o betume. Este tipo de fibras deve estar protegido da humidade dado o seu comportamento altamente hidrófilo. As fibras celulósicas quando molhadas não são capazes de absorver o betume e como tal não são efetivas (Blazejowski, 2011). Adicionalmente, as fibras celulósicas individuais resistem a uma temperatura de 140 °C durante vários dias, porém apenas resistem alguns segundos quando sujeitas a uma temperatura de 200 °C (AIPCR, 1999).

As fibras celulósicas individuais são fornecidas em sacos termo fundíveis, podendo ser igualmente armazenadas em silos. Durante o fabrico das misturas SMA, este tipo de fibras pode ser enviado diretamente para o misturador através de um sistema de alimentação automático (Blazejowski, 2011), como apresentado anteriormente na Figura 2.7 e Figura 2.8 do ponto 2.2.

De acordo com Blazejowski (2011), quando se utilizam fibras celulósicas individuais é importante lembrar que:

- o tempo de mistura das fibras no misturador é muito importante; os sacos das fibras devem ser colocados no misturador durante a fase de mistura a seco, antes da adição do betume;
- um excesso de mistura durante a fase de mistura a seco (sem betume) pode promover a destruição das fibras por ação de desgaste por parte dos agregados através da redução do seu tamanho, limitando o efeito das fibras como estabilizante;
- as fibras celulósicas individuais são muito sensíveis à humidade e como tal devem ser armazenadas em local protegido.

— Fibras celulósicas aglomeradas sem adição de aglutinantes —

As fibras celulósicas aglomeradas sem adição de aglutinantes são fabricadas através da compressão de fibras celulósicas individuais de modo a formar aglomerados (*pellets*, na terminologia anglo-saxónica) sem que seja necessário a adição de um aglutinante. Na Figura 3.22 é possível observar o aspeto das fibras celulósicas aglomeradas sem adição de aglutinantes.



Figura 3.22 – Aspeto das fibras celulósicas aglomeradas sem adição de aglutinantes (Racanel & Burlacu, 2013)

A compressão de fibras individuais em aglomerados permite reduzir o espaço necessário para o seu armazenamento, assim como facilitar a sua utilização durante o fabrico das misturas SMA, nomeadamente no que concerne à sua pesagem. Porém, segundo (Schneider, 2000) as fibras aglomeradas sem adição de aglutinantes, não se conseguem dispersar tão facilmente durante o fabrico da mistura betuminosa, como resultado da elevada compressão a que são sujeitas durante o seu fabrico para formação dos aglomerados.

Apesar da compressão a que as fibras são sujeitas para formar os aglomerados, tal não minimiza o seu comportamento altamente hidrófilo, uma vez que durante o seu processo de fabrico não é utilizado qualquer tipo de aglutinante para envolver as fibras celulósicas individuais. Assim particular cuidado deve ser tido com o local de armazenamento dos sacos das fibras, para que os mesmos não se rompam, o que poderia potenciar a absorção de água e conseqüente degradação das fibras, à semelhança do que sucede para as fibras celulósicas individuais.

Durante o fabrico das misturas SMA, este tipo de fibras, à semelhança do que sucede com as fibras celulósicas individuais pode ser enviado diretamente para o misturador através de um sistema de alimentação automático. Este tipo de fibras é habitualmente fornecido em sacos de grandes dimensões ou armazenadas em silos, contudo também é possível o seu fornecimento em sacos termo fundíveis.

— Fibras celulósicas aglomeradas com adição de aglutinantes e/ou de aditivos —

As fibras celulósicas aglomeradas na forma de um granulado consistem em pequenos conjuntos com cerca de 3 a 8 mm de comprimento, formados através da compressão de fibras celulósicas individuais, aglutinadas através da utilização individual ou em conjunto de betume, ceras, óleos ou polímeros (i.e. EVA), como se pode observar na Figura 3.23.



Figura 3.23 – Aspeto de fibras celulósicas aglomeradas com adição de betume e/ou de aditivos

As fibras são aglutinadas considerando uma determinada proporção percentual de betume e de fibras, que permite envolver por completo cada fibra individual, e cuja composição varia habitualmente entre 10/90 a 50/50 (% de betume / % de fibras) relativamente à massa total do aglomerado.

A adição de granulados de fibras com uma elevada percentagem de betume, poderá requer algum cuidado aquando da determinação da percentagem de betume utilizada numa mistura SMA. Como exemplo se um granulado tiver uma percentagem de betume de 50 %, tal corresponde a um acréscimo de 1,5 g por cada quilo de mistura betuminosa fabricada, se considerada uma percentagem de fibras de 0,3 % relativamente à massa total da mistura betuminosa. Tal corresponde a um acréscimo de cerca de 0,15 % de betume numa mistura SMA com uma percentagem ótima de betume igual a 6,0 %.

Outra alternativa consiste no fabrico de fibras aglomeradas através da aglutinação com determinada percentagem de betume à qual é adicionada uma percentagem de óleos ou de polímeros (i.e. 10/40/50 correspondente a % de betume / % de óleos ou polímeros / % de fibras), como se representa na Figura 3.24.

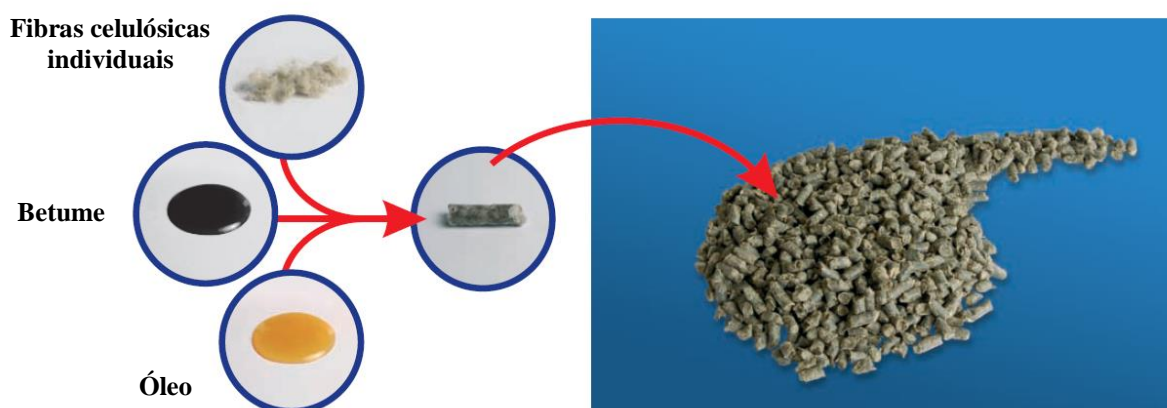


Figura 3.24 – Materiais utilizados no fabrico de aglomerados de fibras celulósicas com adição de óleo ou polímeros (adaptado de JRS, Rettenmaier, 2014)

Adicionalmente é ainda possível a substituição da totalidade do betume por uma percentagem de cera que se adiciona a uma determinada percentagem de fibras (i.e. 40/60 a que corresponde a % de cera / % de fibras), como se observa na Figura 3.25.

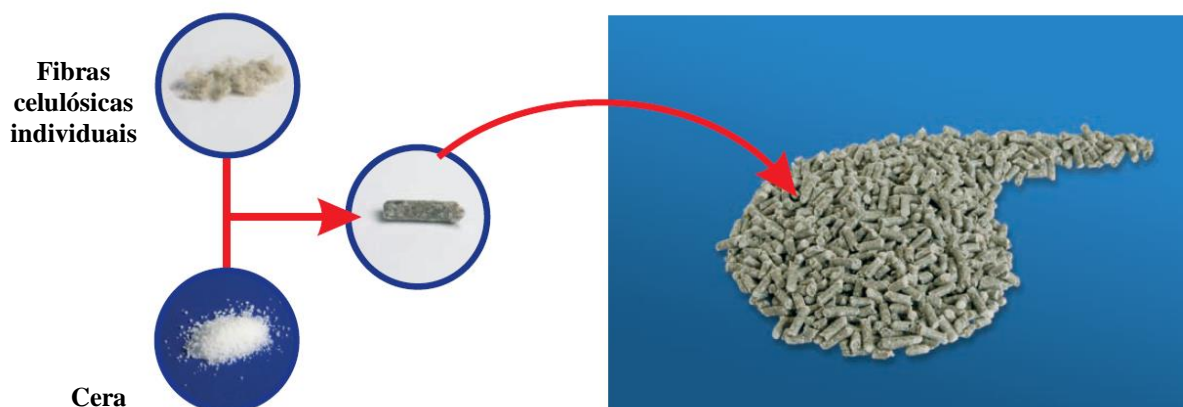


Figura 3.25 – Materiais utilizados no fabrico de aglomerados de fibras celulósicas com adição de cera (adaptado de JRS, Rettenmaier, 2014a)

As variantes existentes nos aglomerados de fibras celulósicas com adição de aglutinantes e/ou de aditivos, têm como intuito responder às diferentes necessidades de aplicação. Por exemplo a adição de uma determinada percentagem de polímeros têm como intuito não apenas mitigar o escorrimento, mas também melhorar o comportamento da SMA resultante. Já a utilização de fibras com cera, tem como principal intuito permitir o fabrico de misturas SMA com temperaturas de mistura e de aplicação inferiores às habitualmente adotadas para as misturas SMA em que se utilizam apenas fibras celulósicas individuais ou envolvidas com betume. A utilização de temperaturas mais reduzidas permite um ganho ambiental através da redução de emissões de CO₂ e de consumo de combustível no fabrico das misturas SMA. De acordo com Martinho *et al.* (2013) a utilização de fibras celulósicas aglomeradas com adição de cera em misturas SMA deverá permitir uma redução do consumo de combustível até 50 %.

As fibras celulósicas aglomeradas com adição de aglutinantes e/ou aditivos tem como vantagens relativamente às fibras celulósicas individuais e aglomeradas sem adição de aglutinantes, uma maior resistência ao acondicionamento, resultante da reduzida suscetibilidade à humidade que apresentam dada a película de betume que envolve cada fibra individual, assim como uma maior facilidade de utilização no fabrico. Segundo Cooley (2000), nos EUA a especificação de fibras minerais relativamente às fibras celulósicas, estaria numa fase inicial da aplicação de misturas SMA, relacionada com o facto de se considerar que as fibras celulósicas apresentam uma maior absorção de água que iria conduzir a uma redução do desempenho *in situ*. Porém no estudo apresentado no qual se avaliou a sensibilidade à água de misturas betuminosas drenantes foi constatado que, as misturas fabricadas com fibras celulósicas apresentam um comportamento semelhante às misturas fabricadas com fibras minerais tanto em laboratório como em obra.

Outras vantagens deste tipo de fibras celulósicas consistem no facto de não libertarem odores ou poeiras (Schneider, 2000). A adição de um aglutinante para envolver as fibras permite adicionalmente controlar os esforços que são aplicados às fibras durante a fase de fabrico, lubrificando a sua superfície o que facilita assim a separação das fibras individuais. Tal permite consequentemente uma distribuição mais homogénea das fibras pela mistura SMA comparativamente às fibras celulósicas individuais e fibras celulósicas aglomeradas sem adição de aglutinante (Blazejowski, 2011).

O facto das fibras se dispersarem mais rapidamente na mistura betuminosa, faz com que o tempo de mistura requerido seja inferior comparativamente ao tempo necessário para dispersar por completo as fibras celulósicas individuais e as fibras aglomeradas sem adição de aglutinantes (ver ponto 2.2). Tal, permite por um lado uma redução do desgaste existente no misturador e nos agregados, e por outro um aumento da produção no fabrico das misturas SMA (Schneider, 2000). Pelas vantagens apresentadas este tipo de fibras são uma opção particularmente interessante para aplicações de média e grande dimensão dada a facilidade de utilização e de obtenção de misturas SMA com melhor qualidade.

O facto deste tipo de fibras celulósicas ser envolvida por um aglutinante e/ou aditivo permite que sejam fornecidas em sacos de grandes dimensões o que possibilita o seu armazenamento nos sacos ou em silos, podendo ainda ser também fornecidas em sacos termo fundíveis. A utilização de alimentadores automáticos é igualmente possível (Blazejowski, 2011), à semelhança do que sucede para os outros tipos de fibras celulósicas.

3.6.1 INFLUÊNCIA DAS FIBRAS CELULÓSICAS NO COMPORTAMENTO DO BETUME

A capacidade das fibras celulósicas para se associarem/interligarem com o betume pode ser considerada como elevada quando comparada com a utilização de agregados finos ou fíler de

superfície específica semelhante (Hannant, 1994 e Serfass & Samanos, 1996). Segundo os mesmos autores esta capacidade depende de diferentes fatores associados ao tipo de fibra utilizada, tais como: a percentagem utilizada; o seu comprimento; o diâmetro; a superfície específica; a forma; a textura superficial; assim como as interligações que podem ser criadas através de processos de adsorção física ou química.

Apesar da elevada capacidade de absorção de betume que as fibras celulósicas apresentam, tendem à semelhança das fibras de vidro a não amolecer ou dissolverem-se quando misturadas com o betume à temperatura de fabrico das misturas SMA, não sendo expectável que ocorra uma reação química com o betume (AIPCR, 1999).

Todavia, estudos realizados (Chen & Li, 2005 e Wu *et al.*, 2007) com fibras celulósicas demonstram que a sua adição permite melhorar as propriedades reológicas do betume à medida que são adicionadas até uma percentagem limite a partir da qual existe uma regressão nas melhorias observadas.

Isso mesmo foi constatado no estudo realizado por Huseyin (2011), onde se utilizaram fibras celulósicas com diferentes comprimentos e composição. O estudo realizado considerou a utilização de fibras celulósicas com um comprimento (c) variável entre: $c < 1,60$ mm; $1,6 \text{ mm} < c < 3,36$ mm e $c > 3,36$ mm e composição granulométrica entre 25 microns a 1,6 mm. De acordo com o estudo realizado constatou-se uma diminuição da penetração do betume para aumento da percentagem de fibras, sendo essa diminuição mais acentuada com o aumento do comprimento das fibras celulósicas. No que concerne à temperatura de amolecimento e à viscosidade, observa-se que um aumento da percentagem de fibras corresponde um aumento da temperatura de amolecimento e da viscosidade, à semelhança do que foi observado por Ye & Wu (2009), sendo esse efeito mais acentuado com o aumento do comprimento das fibras celulósicas.

Ainda segundo o estudo realizado por Huseyin (2011) verificou-se que tanto a penetração como a temperatura de amolecimento diminui e aumenta, respetivamente, cerca de 25% para um aumento de 1,0 % de fibras celulósicas. Adicionalmente o autor do estudo concluiu ainda que o comportamento do betume melhora significativamente para valores superiores a 0,4 % de fibras celulósicas, o que significa que um reforço “estrutural” apenas tende a ocorrer após determinada percentagem de fibras, contribuindo para um aumento da resistência à deformação plástica do betume.

Akbulut (1999) no estudo que realizou constatou igualmente que a adição de fibras celulósicas promove um aumento da viscosidade, assim como um aumento do módulo de rigidez do betume, como se pode observar na Figura 3.26.

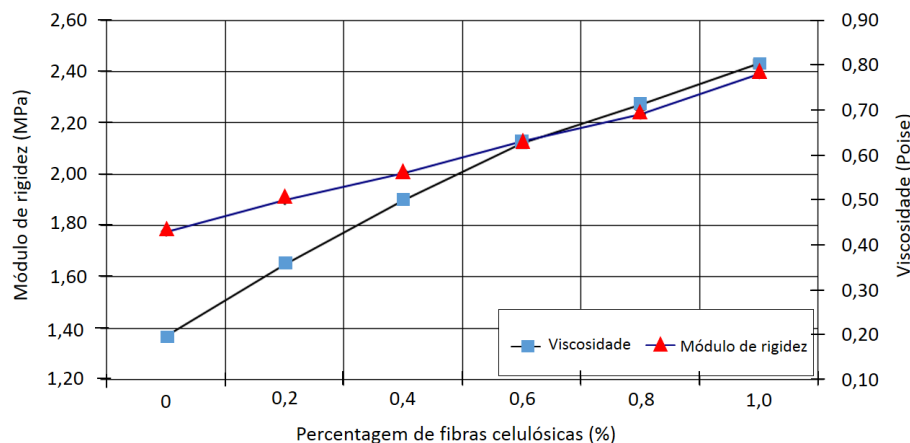


Figura 3.26 – Variação da viscosidade e rigidez do betume em função da percentagem de fibras (adaptado de Akbulut, 1999)

Tendo em consideração que betumes com menor penetração e maior módulo de rigidez apresentam de uma forma geral uma maior resistência à deformação plástica, é espectável de acordo com os estudos apresentados que a utilização de fibras celulósicas promova uma melhoria do comportamento à deformação permanente das misturas SMA que as incorporam.

3.6.2 INFLUÊNCIA DAS FIBRAS CELULÓSICAS NO COMPORTAMENTO DAS MISTURAS SMA

A adição de fibras celulósicas no fabrico de misturas SMA tende a possibilitar os seguintes efeitos, segundo AIPCR (1999):

- a curto prazo os efeitos são diretos e consistem na mitigação do escorrimento de material betuminoso durante o fabrico, transporte e aplicação;
- os efeitos a longo prazo podem ser distinguidos como diretos e indiretos. O efeito direto consiste no aumento da estabilidade da mistura betuminosa mesmo para temperaturas elevadas. Os efeitos indiretos consistem na utilização de uma maior percentagem de betume, resultante de uma maior superfície específica existente na mistura betuminosa, o que contribui para um aumento da espessura da película de betume que envolve os agregados.

Os efeitos a curto e a longo prazo que se observam nas misturas SMA, dependem de acordo com o estudo realizado por Hannant (1994) principalmente da quantidade, comprimento e superfície específica das fibras, assim como da capacidade de interligação com o betume.

Nos efeitos a curto prazo por exemplo, a utilização de fibras que sejam muito compridas, dificulta a sua adequada dispersão na mistura betuminosa criando aglomerados de fibras não dispersas, reduzindo-se assim o efeito de mitigação do escorrimento. Por sua vez, a utilização de fibras demasiadamente pequenas, pode não promover um aumento do reforço estrutural da mistura betuminosa, funcionando apenas com uma extensão do fíler na mistura SMA (Mahrez & Karim, 2007).

Como orientação e considerando os diversos componentes que constituem uma mistura SMA, apresentam-se seguidamente no Quadro 3.16, diversos fatores com influência na quantidade de escorrimento de material betuminoso que ocorre.

Quadro 3.16 – Fatores com influência no escoamento de material betuminoso (Blazejowski, 2011)

Fator	Efeito no escoamento	
	Diminuição	Aumento
Percentagem de aditivo	Aumento	Diminuição
Tipo de aditivo		
Fibras	Médio a elevado	
Polímeros	Reduzido a médio	
Composição da mistura SMA		
Betume efetivo	Diminuição	Aumento
Percentagem de agregados finos	Aumento	Diminuição
Percentagem de fíler	Aumento	Diminuição
Propriedades dos agregados		
Vazios Rigden	Aumento	Diminuição
Absorção de betume	Aumento	Diminuição
Condições de fabrico da mistura SMA		
Temperatura de fabrico	Diminuição	Aumento
Tempo de armazenamento	Diminuição	Aumento

No que concerne aos efeitos a longo prazo, o aumento da percentagem de fibras nas misturas SMA, segundo o estudo realizado por Brown & Manflorkar (1993), promove um aumento ligeiro do *VMA* o que permite a utilização de uma percentagem ótima de betume ligeiramente superior. Os mesmos autores concluíram ainda que o aumento do *VMA* e da percentagem de betume é tipicamente superior ao observado nas misturas betuminosas em que se utilizam fibras minerais, situação que também foi constatada por Behbahani *et al.* (2009).

A adição de fibras, e a adição de uma maior percentagem de betume, contribui para um aumento da espessura da película de betume que envolve os agregados a qual permite um aumento da durabilidade Serfass & Samanos (1996). Ainda de acordo com Button & Epps (1981), Stephenson & Bullen (2001) e Muniandy & Bujang (2006) a utilização de fibras permite reforçar as misturas betuminosas melhorando o comportamento à fadiga, aumentando desse modo a durabilidade da mistura betuminosa com benefícios económicos. Ainda segundo os estudos realizados por Putman & Amirkhanian (2004) e Behbahani *et al.* (2009), este último onde foram utilizadas fibras celulósicas até uma percentagem de 0,5 %, foi possível constatar que o aumento da percentagem de fibras celulósicas corresponde um aumento da resistência à deformação permanente das misturas SMA. Semelhantes conclusões foram observadas no estudo realizado por Ye & Wu (2009), onde a adição de fibras celulósicas permitiu diminuir a deformação permanente em cerca de 23 % relativamente ao caso em que não se adicionam fibras.

De acordo com os estudos realizados seria interessante a avaliação de uma percentagem ótima de fibras que permita não só mitigar o escoamento nas misturas SMA, mas também otimizar o seu desempenho.

Porém, dado o reduzido conhecimento relativo aos mecanismos de reforço assim como das formas de otimização das propriedades das fibras (i.e., diâmetro das fibras, comprimento, textura, etc.) o desempenho que se obtém nas misturas betuminosas reforçadas com fibras é ainda por vezes considerado marginal (Prowell *et al.*, 2009). Isso mesmo é possível de ser observado nas diversas especificações que existem a nível mundial para o fabrico das misturas SMA. Raramente se exigem requisitos a respeitar pelas fibras, sendo apenas comum a exigência do tipo e percentagem mínima

de fibras a utilizar, como se abordará seguidamente no ponto 3.6.3. Por esse motivo grande parte dos estudos realizados incidem principalmente sobre a influência desses dois requisitos.

Assim no que concerne à obtenção de uma percentagem ótima de fibras celulósicas a utilizar, deverá ainda existir um aprofundamento do conhecimento existente quanto à sua aplicabilidade não apenas para mitigar o escorrimento, mas para melhorar o desempenho das misturas SMA.

3.6.3 ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES EXIGIDAS PARA OS ADITIVOS ESTABILIZANTES

No Quadro 3.17 apresenta-se uma compilação das propriedades e respetivos valores recomendados em especificações utilizadas internacionalmente para as misturas SMA no que concerne aos aditivos estabilizantes.

Quadro 3.17 – Requisitos recomendados internacionalmente para os aditivos estabilizantes a utilizar no fabrico de misturas SMA

País	Requisitos			Percentagem mínima de fibras (%)
	Aditivos estabilizantes			
	Fibras Celulósicas	Fibras Minerais	Outros	
Alemanha	■	■		0,3 - 1,5
Áustria				-
Bulgária	■			0,3 - 1,5
Dinamarca				-
Escócia	■			0,3
Eslovénia	■			0,3
Finlândia	■			0,3 - 0,5
Grécia	■			0,3
Holanda	■			0,3
Noruega	■			4 - 6 ¹⁾
Polónia	■	■		0,3 - 1,5
Reino Unido	■	■	■ ²⁾	0,3
República Checa	■	■	■	0,3
Roménia	■		■ ²⁾	0,3 - 1,0
Suécia	■	■		0,3 - 1,5
Suíça	■	■		A especificar
Argentina	■	■	■	0,35
Brasil	■			0,3 - 1,5
EUA	■	■		0,3 ⁵⁾ ; 0,4 ⁶⁾
China	■	■	■	0,3 ⁵⁾ ; 0,4 ⁶⁾
Hong Kong	■	■	■ ³⁾	0,3
Índia	■			0,3
Singapura	■			0,3
Rússia	■			0,2 - 0,5
Nova Zelândia e Austrália	■	■	■ ⁴⁾	0,3 ⁵⁾ ; 0,5 ⁶⁾

Legenda: 1) percentagem relativamente à massa de betume; 2) a utilização de outro tipo de fibras requer aprovação técnica; 3) as fibras a utilizar não podem ser tóxicas e devem ser quimicamente inertes; 4) fibras de acrílico; 5) fibras celulósicas; 6) fibras minerais

No Quadro 3.17 é possível verificar que as propriedades para os aditivos estabilizantes habitualmente recomendadas se referem ao tipo e percentagem mínima de aditivo a adotar, a qual depende do tipo de aditivo utilizado. De acordo com a análise efetuada constata-se que em todos os 25 países analisados é especificada a utilização de fibras celulósicas como aditivo estabilizante para o fabrico de misturas SMA, sendo a utilização de fibras minerais especificada apenas em cerca de metade dos países analisados. No que concerne à utilização de outros tipos de aditivos estabilizantes a sua utilização apenas é contemplada em oito países, dos quais dois é necessária a obtenção de uma aprovação técnica para a sua utilização. A Alemanha, Suécia e os EUA como maiores utilizadores de SMA (de acordo com o que foi mencionado no ponto 2.3.1), apenas recomendam a utilização de fibras celulósicas ou minerais.

Assim como havia sido constatado na literatura, a percentagem mínima de fibras celulósicas que é habitualmente recomendada corresponde a 0,3 % relativamente à massa total da mistura betuminosa, diferindo essa percentagem apenas no caso da Rússia, onde se recomenda uma percentagem mínima de fibras celulósicas de 0,2 %.

No que concerne à percentagem mínima de fibras minerais a utilizar quando especificada, corresponde a 0,4 % ou 0,5 % relativamente à massa total da mistura betuminosa.

Casos existem em que é especificado um intervalo para os aditivos entre 0,3 % e 1,5 %. Este intervalo deverá resultar de estudos tendo como intuito, de acordo com o que foi observado anteriormente no ponto 3.6.2 possibilitar um intervalo para formular uma mistura SMA com uma percentagem de fibras que permita otimizar o seu desempenho e não apenas o de mitigar o escorrimento de material betuminoso.

Apesar de não ser comum a especificação de propriedades a respeitar para os aditivos a utilizar nas misturas SMA, existem países que o requerem. Do total de países analisados, apenas sete indicam propriedades a respeitar no que concerne às fibras celulósicas, dos quais um também recomenda as propriedades para as fibras minerais, não sendo apresentada qualquer recomendação para outros tipos de aditivos estabilizantes. Para as fibras celulósicas são habitualmente recomendadas as seguintes propriedades:

- geométricas, com a avaliação da dimensão das fibras (EUA, Finlândia, Grécia, Índia, China), diâmetro das fibras e diâmetro do granulado de fibras aglutinadas com aditivo (Grécia) e granulometria (EUA);
- físicas, com a avaliação da absorção de óleo (EUA, China e Índia) e massa de água absorvida (EUA, Finlândia, Índia, China), com a avaliação da percentagem de material não volátil (EUA, Finlândia, Índia, China), pH (EUA, China, Grécia);

No que concerne à dimensão máxima das fibras a utilizar, este valor deve ser igual ou inferior a 6 mm, de acordo com as recomendações estabelecidas nos EUA e China e a 8 mm no caso da Índia. Adicionalmente no caso da Grécia é recomendada a utilização de fibras com uma dimensão média de 1 mm, sendo que no caso da Finlândia, 80 % das fibras devem ter uma dimensão entre 1,2 mm e 1,9 mm e 50 % das fibras entre 0,5 mm e 0,9 mm.

O diâmetro das fibras celulósicas segundo a recomendação utilizada na Grécia deverá ser de aproximadamente 45 microm em que pelo menos 85 % das fibras tenha um diâmetro de 800 microm. De igual forma é recomendado apenas na Grécia o comprimento médio e o diâmetro que os aglomerados de fibras devem apresentar, devendo ter um comprimento médio de 5 ± 3 mm e um diâmetro de 5 ± 1 mm.

Relativamente à granulometria recomendada para as fibras celulósicas, apresenta-se no Quadro 3.18 as percentagens de material passado a respeitar em cada peneiro.

Quadro 3.18 – Granulometria das fibras celulósicas a utilizar no fabrico de misturas SMA recomendada nos EUA

Dimensão nominal da abertura dos peneiros ASTM (mm)	Percentagem acumulada de material que passa
0,150	70 ± 10 %

A percentagem de material não volátil deverá ser de 18 % ± 5 % (EUA e China), sendo na Índia recomendado um máximo de 20 % relativamente à massa total de fibras analisada. No caso da Finlândia é recomendado que a perda de massa seja inferior a 7,0 % para uma temperatura de 220 °C durante 5 min. Relativamente ao pH é comum a recomendação de um valor de 7,5 % ± 1 % (EUA, China e Grécia).

No que concerne à absorção de óleo a mesma deverá ser 5 ± 1 vezes a massa das fibras analisadas (EUA), superior a 5 vezes a massa das fibras (China) ou superior a 4 vezes a massa das fibras analisadas se consideradas as recomendações utilizadas na Índia.

No caso da percentagem de água nas fibras deverá ser igual ou inferior a 5 % relativamente à massa das fibras (EUA, Índia e China). Na Finlândia é recomendado uma percentagem de água nas fibras inferior a 8 %.

Adicionalmente às propriedades indicadas anteriormente, na Grécia é ainda recomendado que cada aglomerado de fibras seja constituído por uma percentagem de fibras igual a 80 % ± 5 % relativamente à massa de cada granulado.

Relativamente às fibras minerais apenas os EUA apresentam propriedades a respeitar as quais se resumem seguidamente:

- geométricas, com a avaliação da dimensão máxima das fibras, diâmetro e granulometria.

No que concerne à dimensão das fibras minerais, nos EUA é recomendado um comprimento igual ou inferior a 6 mm, devendo o diâmetro ser igual ou inferior a 5 micron. Relativamente à granulometria recomendada para as fibras minerais, apresenta-se no Quadro 3.19 as percentagens a respeitar de material passado em cada peneiro.

Quadro 3.19 – Granulometria das fibras minerais a utilizar no fabrico de misturas SMA recomendada nos EUA

Dimensão nominal da abertura dos peneiros ASTM (mm)	Percentagem mínima acumulada de material que passa
0,250	95
0,075	65

De acordo com o Quadro 3.19 as fibras minerais utilizadas apresentam uma menor dimensão comparativamente às fibras celulósicas.

3.6.4 RECOMENDAÇÕES PARA AS PROPRIEDADES EXIGIDAS AOS ADITIVOS ESTABILIZANTES A UTILIZAR EM PORTUGAL NAS MISTURAS SMA

No Quadro 3.20 são apresentadas as recomendações no que se refere aos valores limite a definir para as propriedades dos aditivos estabilizantes a utilizar em Portugal para o fabrico de misturas SMA. A recomendação de fibras apenas celulósicas decorre da sua ampla utilização a nível mundial.

Quadro 3.20 – Recomendações para as fibras celulósicas a utilizar no fabrico de misturas SMA em Portugal

Propriedades das fibras	Tráfego Reduzido (TMDA < 5000) SMA ≤ 8 mm	Tráfego Médio/Elevado (TMDA ≥ 5000) SMA ≥ 8 mm
Tipo de fibras	Celulósicas	
Percentagem mínima de fibras (%)	0,3	
Comprimento máximo (mm)	6,0	
Granulometria (%)	70 ± 10 % ¹⁾	
Percentagem de material não volátil (%)	18 ± 5 %	
pH	7,5 ± 1,0	
Absorção de óleo	5 ± 1 vezes ²⁾	
Percentagem máxima de água absorvida (%)	5	

Legenda: 1) Percentagem acumulada de material que passa no peneiro 0,150 mm;
2) relativamente à massa de fibras celulósicas utilizada

Apesar das recomendações apresentadas no Quadro 3.20, se limitarem apenas às fibras celulósicas, importa que no futuro exista um contributo significativo, relativo ao estudo de outros aditivos estabilizantes, como forma de possibilitar: aos donos de obra informação útil de referência para os valores limite a requerer para as diferentes propriedades e; aos projetistas e construtores 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.

4 FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS DO TIPO SMA

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O método de formulação adotado deve ter sempre em consideração o principal objetivo da formulação de uma mistura betuminosa e que consiste genericamente na determinação de uma composição ótima que permita uma adequada relação custo/benefício, garantindo que todas as exigências de qualidade são asseguradas de forma equilibrada, consoante o tipo de aplicação pretendida para a mistura betuminosa.

Neste contexto a definição apenas da percentagem ótima de betume, baseada na curva granulométrica que respeita um determinado fuso granulométrico, dificulta por si só a obtenção deste objetivo, dada a complexidade associada à obtenção/garantia de todos os requisitos requeridos para uma mistura betuminosa com determinado tipo de aplicação.

No caso das misturas SMA, a formulação tende a ser, mais recentemente, efetuada através de uma análise volumétrica de modo a facilitar a compreensão e obtenção de uma estrutura pétreia com efeito de *stone-on-stone* na mistura compactada. Esta análise é efetuada dada a elevada sensibilidade deste tipo de mistura betuminosa a variações na composição utilizada, nomeadamente, resultado da elevada descontinuidade granulométrica.

Até à década de 80 do século XX nenhuma especificação técnica relativa a misturas SMA havia sido publicada a nível mundial. A formulação de misturas SMA era comumente realizada utilizando regras genéricas e percentagens ponderais a adotar para diferentes frações de agregados na definição da composição granulométrica de uma SMA com o intuito de obter uma elevada descontinuidade, característica destas misturas. De acordo com Austroads (2009), algumas destas regras e percentagens são ainda consideradas na formulação:

- agregados grossos representarem cerca de 70 % a 80 % da massa total de agregados. Segundo a análise efetuada no ponto 3.2.4, a percentagem de agregados grossos passível de ser utilizada tende a variar entre 64 % e 85 % relativamente à massa total de agregados;
- a percentagem de partículas passivas (passadas no peneiro 4,75 mm) é habitualmente adotada como sendo inferior a 30 %. Segundo a análise efetuada no ponto 3.2.4 e Anexo I-E, o limite superior dos fusos definidos internacionalmente apenas tende a especificar uma percentagem igual ou inferior a 30 % para o peneiro 2,0 mm (2,36 mm). No caso do limite inferior dos fusos definidos internacionalmente a percentagem de material passado no peneiro 4,75 mm é geralmente próxima de 30 %. Como tal, a utilização de uma percentagem igual ou inferior a 30 % implicava que a curva granulométrica escolhida numa SMA no peneiro 4,75 mm coincidissem em grande parte dos casos com o limite inferior dos fusos granulométricos;
- na Suécia é comum a utilização da regra de 30:20:10 (correspondente a que 30 % do material deva passar no peneiro 4,75 mm; 20 % do material passe no peneiro 2,36 mm e 10 % do material passe no peneiro 0,075 mm), a qual foi inicialmente utilizada para a formulação de misturas SMA nos EUA (Brown & Haddock, 1997). Segundo a análise efetuada no ponto 3.2.4 e Anexo I-E, a regra de 30:20:10 apenas se verifica de forma aproximada se considerado o limite inferior dos fusos especificados na Suécia para as misturas SMA 8 e SMA 11;
- o módulo de deformabilidade tende a apresentar uma mudança no andamento do seu comportamento para a percentagem ótima de partículas passivas considerando o peneiro de referência com dimensão igual a 4,75 mm) permitindo otimizar a curva granulométrica da mistura betuminosa SMA.

Segundo a recente norma EN 13108-5 (2013) a formulação das misturas SMA “tem sido realizada comumente de forma empírica baseada em fusos granulométricos pré-definidos combinados com especificações para os materiais constituintes e requisitos adicionais baseados em ensaios para avaliação do desempenho, contudo dada a experiência insuficiente existente para avaliação fundamental das misturas *Stone Mastic Asphalt*, a norma europeia apenas especifica requisitos empíricos”.

Ainda assim, nas últimas duas décadas tem existido uma tentativa para o desenvolvimento de novos métodos de formulação de misturas SMA, os quais derivam em grande parte dos dois principais métodos desenvolvidos, respetivamente, na Alemanha, e nos EUA, os quais como se observou no ponto 0, constituem simultaneamente os dois países a nível mundial com maior aplicação de SMA.

É incontornável a importância destes dois métodos de formulação: no caso da Alemanha por especificação, baseado na experiência adquirida ao longo de décadas de utilização de misturas SMA; e no caso dos EUA baseado nas propriedades volumétricas, cujo intento é o de garantir o imbricamento máximo entre as partículas ativas (“agregados grossos”), o qual origina a definição de *stone-on-stone*. Porém, outros métodos têm sido desenvolvidos e que merecem ser igualmente mencionados, nomeadamente pelas particularidades que apresentam, como seja o caso do método volumétrico Holandês, ou ainda de métodos de formulação não da mistura betuminosa mas da mistura de agregados. Os últimos métodos anteriormente mencionados tentam reproduzir de forma mais conveniente o conceito desenvolvido de *stone-on-stone*, sendo disso exemplo o método do ponto de dilatação (*dilation method*), o método do ponto de imbricamento (*locking point method*) e o método de Bailey.

Adicionalmente, é ainda de referir o estudo realizado em Portugal por Gardete (2016), o qual não sendo um método específico para a formulação de misturas SMA, mas uma metodologia de formulação global de misturas betuminosas mais direcionada para as condições de serviço no pavimento, contribuiu, nomeadamente, para um maior conhecimento sobre a formulação, assim como sobre as misturas SMA.

Entre os diferentes métodos específicos para formulação de misturas SMA, a obtenção de um esqueleto pétreo com elevado imbricamento, denominado de *stone-on-stone*, constitui o principal objetivo na formulação da mistura SMA. Por esse motivo, os métodos de formulação desenvolvidos não se centram na obtenção de uma percentagem ótima de betume para determinada curva granulométrica, mas sim na obtenção de uma curva granulométrica ótima para determinada percentagem de betume a utilizar ou pré-definida. Esta assunção tem como objetivo facilitar o controlo do efeito de *stone-on-stone* nas misturas SMA.

Assim, a obtenção de um imbricamento do tipo *stone-on-stone* após a compactação da mistura SMA para os diferentes métodos de formulação resume-se, como observado no ponto 3.2.4, a garantir que a mistura SMA apresenta um volume total de mastic betuminoso (partículas passivas + fíler + aditivo estabilizante + betume + volume de vazios), menor ou igual ao volume de vazios existente no esqueleto das partículas ativas. Refira-se que, em função do método de formulação utilizado, poderão as partículas ativas e passivas dar lugar à utilização de agregados grossos e agregados finos, respetivamente.

Porém, segundo van de Ven *et al.* (2003), as misturas betuminosas do tipo SMA provavelmente não apresentam um esqueleto pétreo do tipo *stone-on-stone* imediatamente após a sua compactação.

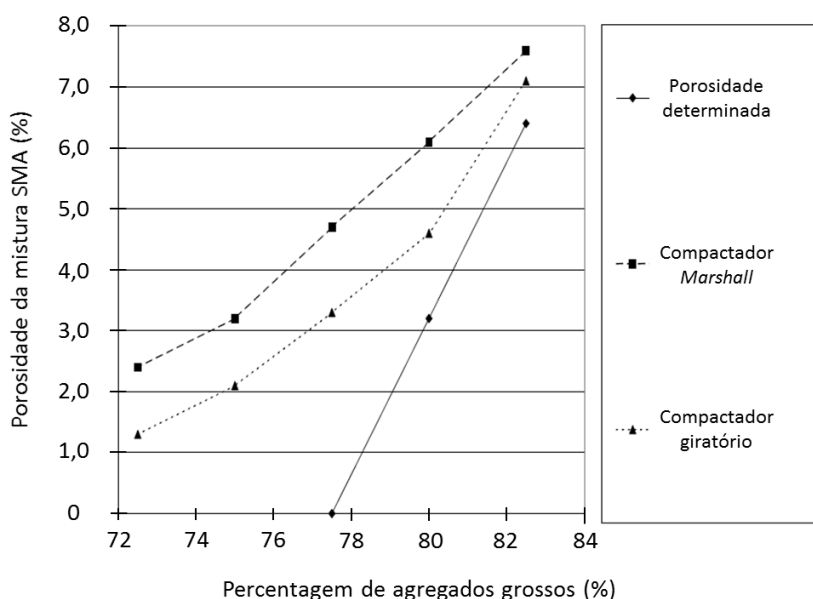


Figura 4.1 – Relação entre a porcentagem de agregados grossos e a porosidade calculada e avaliada em misturas SMA (adaptado de van de Ven *et al.*, 2003)

Na Figura 4.1 segundo van de Ven *et al.* (2003) é evidenciada a existência de um efeito de expansão (*enlarging effect*, na terminologia anglo-saxónica) dos vazios que aumenta com uma diminuição da quantidade de agregados grossos na mistura. Segundo os mesmos autores as diferenças entre as porosidades calculadas e avaliadas através de ensaios para a mistura SMA, podem ser compreendidas através da existência de agregados finos entre os agregados grossos após a compactação. De acordo com os mesmos autores, uma mistura SMA devidamente formulada tende a alcançar um esqueleto pétreo do tipo *stone-on-stone* apenas durante a sua vida em serviço resultado das ações do tráfego e das condições climáticas.

Porém, de acordo com a Figura 4.1, uma SMA teria uma porosidade teórica igual a zero para uma porcentagem de agregados grossos próximo de 78 % aumentando à medida que se adicionam agregados grossos. Segundo o que foi constatado anteriormente no ponto 3.2, a porcentagem de agregados grossos habitualmente utilizada a nível mundial ronda os 64 % a 85 %, isso significa que dificilmente se teria um efeito de *stone-on-stone* dado o efeito de expansão proposto. Ainda na Figura 4.1, apesar de compreensível o efeito de expansão, observa-se que não será espectável que uma mistura SMA apresente um adensamento durante a sua vida útil, que para cerca de 78 % de agregados grossos corresponde a uma diminuição do volume de vazios de aproximadamente 4 % para cerca de 0 % ou de cerca de 5 % para aproximadamente 3 % no caso de ser utilizado 80 % de agregados grossos.

4.2 MÉTODO DE FORMULAÇÃO DESENVOLVIDO NA ALEMANHA

Na Alemanha, a formulação de misturas SMA baseia-se na definição por especificação por vezes denominado por método de formulação “tipo receita”, a qual especifica um conjunto de misturas SMA tipo a utilizar como camada de desgaste em função do tipo e classe de tráfego que solicitará a SMA.

Apesar do método de formulação utilizado na Alemanha não ser um método de formulação relacionado ou baseado no desempenho, apresenta como mais-valia o facto de se basear na ampla experiência que foi sendo adquirida desde a década de 70 do século XX.

A experiência acumulada na análise de diversos casos de sucesso e insucesso na aplicação de misturas SMA permite que seja publicada em 1984 a primeira especificação técnica designada por ZTV bit StB-84, a qual é modificada em 1990 apesar de manter a mesma denominação.

Posteriormente à ZTV bit StB-84 modificada em 1990, foram publicadas outras especificações, como sejam segundo JRS, Rettenmaier (2012):

- em 1994, publicação da ZTV Asphalt StB-94 a qual não apresentava modificações relativamente à ZTV bit StB-84 modificada em 1990;
- em 1995, a FSGV (German Road and Transportation Research Association) publica “Recommendations for the composition, production and paving of Stone Mastic Asphalt” a qual impõe nomeadamente para a SMA 11S e para a SMA 8S a utilização de agregados com todas as faces britadas e uma resistência à fragmentação menor ou igual a 18 % (SZ≤18);
- em 1998, é publicado um suplemento/emenda à “Supplementary Technical Conditions of Contract, Specifications and Guidelines for the Construction of Roads using Asphalt”, a qual recomendava o que já havia sido publicado em 1995;
- em 2001, é publicado um suplemento/emenda à “Supplementary Technical Conditions of Contract, Specifications and Guidelines for the Construction of Roads using Asphalt”, denominada por ZTV Asphalt StB-01, a qual apresenta nomeadamente, modificações nos fusos utilizados nas misturas SMA 11S, SMA 8S e SMA 8 relativamente à ZTV Asphalt StB-94;
- em 2007 são publicadas as especificações ZTV Asphalt StB-07 “German Additional Technical Conditions of Contract and Directives for the Construction of Road Asphalt Pavements” e a TL Asphalt StB-07 “German Technical Conditions of Delivery for Asphalt Mixtures for the Construction of Road Pavements” e ZTV BEA StB-09 “German Additional Technical Conditions of Contract and Directives for the constructional maintenance of Road Asphalt Pavements” que estão em utilização desde 1 de Janeiro de 2009.

Sendo o método de formulação desenvolvido na Alemanha fundamentalmente baseado na experiência acumulada, considerou-se pertinente proceder a uma análise comparativa da ZTV bit StB-84 e da ZTV Asphalt StB-94 com a ZTV Asphalt StB-07, que se apresenta no Anexo I-J de modo evidenciar as principais modificações que foram sendo introduzidas desde a primeira especificação utilizada na Alemanha para as misturas SMA.

Segundo a informação compilada no Anexo I-J, constata-se, nomeadamente, que a percentagem de agregados grossos especificado na ZTV bit-StB 84 é de 75 % a 80 % para a SMA 11S e para a SMA 8S passando na ZTV Asphalt StB-07 para 70 % a 80 %, mantendo-se constante para as restantes misturas SMA. No caso das misturas SMA 5N e SMA 5S a percentagem de agregados grossos é de 60 % a 70 %. De acordo com Austroads (2009) a diminuição da percentagem de agregados grossos está relacionada com o facto, de se considerar na Alemanha que misturas SMA com uma maior percentagem de agregados grossos, tendem a apresentar uma maior permeabilidade. Esta conclusão corrobora o que foi indicado no ponto 3.2.4.

Adicionalmente, no Anexo I-J constata-se, desde 1984, uma diminuição da percentagem de fíler admissível na mistura betuminosa, como resultado de um menor espaço disponível para o preenchimento com mastique betuminoso. Porém, a percentagem de betume mínima admissível em 2007 é ligeiramente superior à recomendada em 1984, em cerca de 0,2 %.

É ainda especificado relativamente à ZTV bit StB-84 para as misturas SMA especiais uma diminuição do intervalo da porosidade (variável entre 3,0 % e 4,0 %) para 2,0 % a 3,0 %. Adicionalmente a ZTV Asphalt StB-07 passou também a contemplar, a avaliação do volume de vazios na mistura de

agregados preenchidos com betume (*VFB*) para as diversas SMA, sendo o valor da proporção da profundidade da rodeira especificado para a SMA 11S e SMA 8S, uma vez que se tratam de misturas a ser aplicadas para tráfegos mais elevados.

Efetuada uma análise da evolução das especificações utilizadas na Alemanha, passa-se a analisar as várias fases do método de formulação desenvolvido na Alemanha:

- seleccionar os materiais constituintes a utilizar na formulação da mistura SMA;
- definir uma curva granulométrica de acordo com os fusos recomendados;
- seleccionar cinco percentagens distintas de betume a adotar para o fabrico da mistura SMA;
- compactar três provetes cilíndricos para cada percentagem de betume escolhida;
- determinar os parâmetros volumétricos dos provetes de SMA, nomeadamente a baridade, a baridade máxima teórica, a porosidade e o volume de vazios preenchidos com betume;
- seleccionar a percentagem ótima de betume a utilizar, tendo em consideração a obtenção:
 - da porosidade especificada para a SMA;
 - de um escorrimento de material betuminoso menor do que 0,3 %;
 - do volume de vazios preenchidos com betume (valor declarado);
 - no caso da SMA 8S e da SMA 11S do valor para a proporção da profundidade de rodeira através do ensaio de pista apenas para a percentagem ótima de betume (valor declarado).

Após a definição dos materiais a utilizar de acordo com os requisitos indicados na ZTV Asphalt StB-07, procede-se à definição da curva granulométrica segundo o fuso respetivo para a mistura que se pretende formular. A definição da composição baseia-se nas massas dos materiais pétreos constituintes.

Com a composição granulométrica definida são escolhidas as cinco percentagens de betume a estudar, considerando a percentagem mínima de betume definida para a mistura SMA a utilizar, a qual varia como observado anteriormente entre 6,6 % (SMA 11S) e 7,4 % (SMA 5N).

Um conjunto de 15 amostras de mistura SMA deve ser fabricado, considerando três amostras por cada percentagem de betume. De acordo com a ZTV Asphalt StB-07, a compactação das amostras para a SMA deve ser realizada de acordo com o método de compactação *Marshall*, em que a compactação é efetuada utilizando 50 pancadas em cada topo de um provete de 100 mm de diâmetro, não sendo contemplada a compactação com o compactador giratório.

No que concerne à temperatura de compactação em laboratório, é recomendado segundo a ZTV Asphalt StB-07 que varie entre 150 °C e 190 °C para betumes convencionais e modificados, ou segundo as temperaturas recomendadas pelo fabricante.

Após a compactação e desmoldagem dos provetes, procede-se à avaliação das propriedades volumétricas, como sejam a baridade e a baridade máxima teórica. Seguidamente, de acordo com a TP-A-08-2007 determinam-se os parâmetros volumétricos dos provetes, nomeadamente, a porosidade, a qual é posteriormente utilizada para definir a percentagem ótima de betume. A percentagem ótima de betume definida deve ter em consideração a obtenção da porosidade especificada e um escorrimento de material betuminoso inferior a 0,3 % relativamente à massa da mistura betuminosa ensaiada através do ensaio de *Schellenberg*.

4.3 MÉTODO DE FORMULAÇÃO DESENVOLVIDO NOS EUA

O método de formulação desenvolvido nos EUA decorre da *European Asphalt Study Tour* (EAST) efetuada no final de 1990. Numa primeira fase, a ausência de especificações conduziu segundo Scherocman (1997) a que as misturas SMA aplicadas nos EUA fossem baseadas na utilização da regra 30:20:10 para a percentagem de material que passa nos peneiros 4,75 mm, 2,36 mm e 0,075 mm, respetivamente.

Dos resultados obtidos na aplicação de misturas SMA nos EUA e dos conhecimentos adquiridos no EAST, em 1994 é lançada a primeira publicação sobre misturas SMA a NAPA (1994). Esta especificação apresentava as primeiras orientações/diretrizes para a formulação, fabrico, transporte e aplicação de misturas SMA nos EUA.

De acordo com NAPA (1994), a formulação baseava-se na utilização do método *Marshall* e contemplava apenas um fuso granulométrico para o qual se poderia formular uma mistura SMA 12 (SMA 12,5), a qual apresentava uma percentagem de partículas ativas de dimensão igual ou superior a 4,75 mm entre 72 % e 80 %.

Para avaliar o escorrimento de material betuminoso, a especificação NAPA (1994) considera o método denominado de cesto (basket), desenvolvido no estudo Brown & Mallick (1994), o qual foi posteriormente publicado na norma ASTM D 6390. Este ensaio consiste em utilizar um cesto de arame com 100 mm de diâmetro e com malha quadrada com abertura de 6,3 mm, no qual é colocada uma amostra de mistura betuminosa não compactada a uma determinada temperatura durante uma hora. A percentagem de material escorrido é então determinada dividindo a massa de material escorrido do cesto pela massa inicial da amostra. Este método é semelhante ao método do cesto que atualmente é também contemplado na norma EN 12697-18. Porém, neste último caso o cesto é cúbico com 100 mm de lado, sendo as faces constituídas por orifícios circulares com diâmetro de 3,15 mm. As diferenças existentes nas aberturas dos cestos acabam por refletir o que foi indicado no ponto 3.2.4 e que resulta das diferentes interpretações para a dimensão de partícula ativa (“agregado grosso”).

Posteriormente à publicação da NAPA (1994), foram diversos os Estados a aplicar misturas SMA de forma habitual, apesar de não existir um método de formulação comum a todos os Estados (Brown *et al.*, 1997). Tendo por base o intento de desenvolver um método de formulação simples, claro e de fácil aplicação, assim como a definição de requisitos para as propriedades dos agregados e misturas SMA, a National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) subsidiou o estudo Brown *et al.* (1998) efetuado pelo NCAT entre 1994 e 1998.

Do estudo Brown *et al.* (1998), resultou um método de formulação de misturas SMA, assim como o desenvolvimento de ensaios a utilizar na formulação. O estudo desenvolvido considerou a compactação dos provetes em laboratório através do compactador de impacto (*Marshall*) e do compactador giratório Superpave (SGC).

No estudo realizado foram consideradas misturas SMA com dimensão máxima nominal do agregado entre 4,75 mm e 25,0 mm. O método de formulação incluía quais os requisitos a respeitar para os agregados, para o betume, a avaliação do efeito de *stone-on-stone*, os fusos granulométricos assim como os requisitos no que concerne às propriedades volumétricas da mistura SMA compactada.

O método de formulação desenvolvido nos EUA distingue-se por ter introduzido o conceito de *stone-on-stone* a obter na mistura SMA compactada, que atualmente é amplamente referido e utilizado a nível mundial e que consiste essencialmente na obtenção de contacto direto entre as partículas ativas como abordado no ponto 3.2.4. Os restantes elementos constituintes da SMA, como

sejam as partículas passivas, o fíler, os aditivos e o betume, têm como função preencher os vazios existentes entre as partículas ativas, aumentando a durabilidade da mistura SMA.

Segundo Stuart (1992), o desenvolvimento do conceito de *stone-on-stone* pretendia garantir a formulação de misturas SMA com um bom desempenho à deformação permanente ao invés do que poderia suceder com o método de formulação adotado na Alemanha. De acordo com o mesmo autor, os fusos granulométricos a utilizar na formulação das misturas SMA no método Germânico eram pouco restritivos, o que poderia permitir que misturas formuladas dentro dos limites dos fusos recomendados apresentassem um comportamento desadequado.

Como mencionado no ponto 3.2.4, para se avaliar o conceito de *stone-on-stone* foi desenvolvido no âmbito do estudo Brown *et al.* (1998) um ensaio de compactação com varão denominado *dry-rodDED unit weight apparatus*, o qual se encontra contemplado nas normas AASHTO T19 e ASTM C29. O método desenvolvido permite avaliar o volume de vazios existente entre as partículas ativas.

A importância e desenvolvimentos alcançados no Brown *et al.* (1998) fundamentaram a base das especificações AASHTO MP8 (*Standard Specification for Designing Stone Matrix Asphalt - SMA*) e AASHTO PP41 (*Standard Practice for Designing Stone Matrix Asphalt - SMA*). A formulação de SMA nos EUA encontra-se ainda descrita em diferentes publicações, como seja na NAPA (1999) e nas normas AASHTO M325 e AASHTO R46.

De acordo com os vários documentos anteriormente indicados, o método de formulação desenvolvido nos EUA pode ser definido em cinco fases:

- selecionar os materiais constituintes a utilizar na formulação da mistura SMA;
- selecionar uma curva granulométrica de acordo com os limites dos fusos granulométricos recomendados e tendo como objetivo a obtenção de um elevado imbricamento do tipo *stone-on-stone* entre as partículas ativas;
- selecionar a percentagem de betume “ótima”, tendo em consideração a obtenção do critério mínimo de vazios na mistura de agregados (*VMA*) e da porosidade pretendida nos provetes compactados;
- avaliar o escorrimento de material betuminoso na mistura SMA não compactada;
- avaliar a sensibilidade à água da mistura SMA compactada.

A formulação da mistura SMA inicia-se com a escolha dos materiais, os quais devem respeitar os requisitos definidos na norma AASHTO M325. Com os agregados define-se pelo menos três composições experimentais da mistura de agregados, sendo recomendado para as três curvas granulométricas definidas que uma esteja localizada junto ao limite superior do fuso granulométrico da mistura betuminosa a utilizar, uma localizada na gama intermédia do fuso e uma localizada junto ao limite inferior do fuso. De acordo com a AASHTO M325 e a AASHTO R46, a escolha da composição da mistura de agregados deve basear-se nas massas dos materiais pétreos utilizados, devendo ser utilizado o seu volume sempre que a massa volúmica entre frações difira mais de $0,2 \text{ Mg/m}^3$.

A definição das três curvas granulométricas é genericamente realizada através da utilização de uma massa de fíler constante, fazendo-se variar as percentagens das restantes frações, como intuito de variar a massa utilizada de partículas ativas e passivas.

Para se assegurar uma melhoria do comportamento à deformação permanente da mistura SMA é necessário adicionalmente à definição da composição da mistura de agregados a verificação do efeito

de *stone-on-stone* entre as partículas ativas. De acordo com o método de formulação desenvolvido nos EUA, para a obtenção do efeito de *stone-on-stone* é necessário determinar o volume de vazios entre as partículas ativas (VCA_{DRC}) através do ensaio de compactação com o varão. De acordo com o método de formulação, a avaliação do volume de vazios nos agregados deve ser efetuada para a fração de partículas ativas (definida de acordo com o peneiro de referência segundo indicado no Quadro 3.5 do ponto 3.2.4) de cada uma das três curvas granulométricas previamente definidas no processo de formulação.

A avaliação do volume de vazios entre as partículas ativas deve seguir a metodologia especificada na AASHTO T19 e na ASTM C9-97:

1. Utilizando um recipiente metálico com dimensão variável de acordo com a dimensão máxima nominal do agregado a avaliar, procede-se à determinação do seu volume, através do seu enchimento com água, colocando-se posteriormente no topo do recipiente uma placa de vidro de modo a garantir-se a determinação do volume total do recipiente. Posteriormente, devem ser preparadas duas amostras da fração de partículas ativas por cada uma das três curvas granulométricas previamente definidas, devendo a massa corresponder entre 125 % e 200 % da massa total passível de ser colocada no interior do recipiente sem compactação.
2. A fase seguinte consiste após determinado o volume e massa do recipiente, em preencher o mesmo com cada uma das amostras de partículas ativas, devendo o preenchimento ser realizado em três fases. Na primeira fase o recipiente deve ser preenchido até um terço da altura total, procedendo-se ao nivelamento da superfície dos agregados colocados no recipiente, sendo seguidamente aplicadas 25 pancadas com um varão na camada de agregados, tendo o cuidado de se distribuir de forma uniforme as pancadas pela superfície sem nunca se atingir a base do recipiente.
3. Na segunda fase do processo, o recipiente deve ser preenchido até dois terços da sua altura total, procedendo-se mais uma vez ao nivelamento da superfície e respetiva compactação dos agregados com 25 pancadas com um varão.
4. A terceira fase consiste em encher o recipiente até ao seu topo, sendo de novo aplicadas 25 pancadas com um varão. Posteriormente o agregado deve ser nivelado de modo a remover o excesso de agregados acima do topo do recipiente, usando para o efeito os dedos ou uma régua, não se devendo durante o processo proceder à compactação dos agregados. A baridade da mistura de partículas ativas após a compactação com o varão, assim como o volume de vazios existente na fração de partículas ativas (VCA_{DRC}) são determinados após pesagem da massa do recipiente com os agregados compactados.

O VCA_{DRC} deve ser determinado de acordo com a seguinte equação:

$$VCA_{DRC} = \frac{\rho_{pa} \cdot \rho_w - \rho_{b,s}}{\rho_{pa} \cdot \rho_w} \cdot 100 \quad (4.1)$$

sendo:

VCA_{DRC} - volume de vazios na mistura de partículas ativas após compactação com o varão (%);

ρ_{pa} - massa volúmica da mistura de partículas ativas (Mg/m^3);

$\rho_{b,s}$ - baridade da mistura de partículas ativas após compactação com o varão (Mg/m^3);

ρ_w - massa volúmica da água (Mg/m^3).

Com as três composições granulométricas definidas é escolhida uma percentagem de betume experimental, a qual de acordo com a AASHTO R46 deve ser no mínimo igual a 6,0 % para agregados com uma massa volúmica igual a 2,750 Mg/m³. Segundo a mesma norma, se a massa volúmica for superior a 2,750 Mg/m³, a percentagem de betume pode ser reduzida de 0,1 % por cada incremento de 0,050 Mg/m³ relativamente a 2,750 Mg/m³. Caso a massa volúmica seja inferior a 2,750 Mg/m³, a percentagem de betume experimental pode ser aumentada de 0,1 % por cada redução de 0,050 Mg/m³ relativamente a 2,750 Mg/m³.

Um conjunto de 12 amostras de mistura SMA deve ser fabricado com a percentagem de betume experimental, quatro por cada composição granulométrica. Das quatro amostras, apenas três são compactadas, sendo a quarta amostra utilizada para avaliar a baridade máxima teórica. A compactação pode ser efetuada com o compactador *Marshall* utilizando 50 pancadas em cada topo de um provete de 100 mm de diâmetro ou através do compactador giratório Superpave (SGC), em que a compactação é efetuada com 75 ou 100 giros em provetes de 150 mm de diâmetro e 115 ± 5 mm de altura após compactados. A utilização de 75 giros apenas deverá ser aplicada em agregados com valor de Los Angeles superior a 30. De acordo com Cooley & Hurley (2004), as misturas SMA são relativamente fáceis de compactar em laboratório pelo que a utilização de um número de giros igual a 100 poderá promover um aumento excessivo da quebra de agregado.

Para as três misturas SMA experimentais, é posteriormente avaliada a baridade e, com a baridade máxima teórica previamente avaliada, são determinadas as características volumétricas de cada provete compactado, nomeadamente o volume de vazios (V_V), o volume de vazios da mistura de agregados (VMA) e o volume de vazios das partículas ativas na mistura SMA compactada (VCA_{MIX}), os quais se determinam de acordo com as equações que seguidamente se apresentam:

$$V_V = 100 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{ba}}{\rho_{mt}}\right) \quad (4.2)$$

$$VCA_{MIX} = 100 - \left(\frac{\rho_{ba}}{\rho_{pa}} \cdot P_{CA}\right) \quad (4.3)$$

$$VMA = 100 - \left(\frac{\rho_{ba}}{\rho_a} \cdot P_s\right) \quad (4.4)$$

sendo:

V_V - volume de vazios na mistura betuminosa compactada (%);

VCA_{MIX} - volume de vazios entre as partículas ativas utilizadas na mistura SMA compactada (%);

VMA - volume de vazios na mistura de agregados (%);

ρ_{ba} - baridade da mistura betuminosa compactada (Mg/m³);

ρ_{mt} - baridade máxima teórica da mistura betuminosa (Mg/m³);

P_s - percentagem de agregados na mistura betuminosa (%);

P_{CA} - percentagem de partículas ativas retidas no peneiro de referência relativamente à massa total da mistura betuminosa (%);

ρ_a - massa volúmica da mistura de agregados utilizados na mistura betuminosa (Mg/m³);

ρ_{pa} - massa volúmica da mistura de partículas ativas utilizadas na mistura betuminosa (Mg/m³).

A percentagem de partículas ativas retidas no peneiro de referência pode ser determinada através da seguinte equação:

$$P_{CA} = P_s \cdot PA_{BP} \quad (4.5)$$

sendo:

P_{CA} - percentagem de partículas ativas retidas no peneiro de referência relativamente à massa total da mistura betuminosa (%);

P_s - percentagem de agregados utilizados na mistura betuminosa (%);

PA_{BP} - percentagem de partículas ativas retidas no peneiro de referência relativamente à massa total de agregados (%).

O VCA_{DRC} é posteriormente comparado com o VCA da SMA compactada (VCA_{MIX}). O volume de vazios preenchidos na mistura de partículas ativas (“agregados grossos”) numa mistura SMA compactada (VCA_{MIX}) deverá ser inferior ao volume de vazios na mistura de partículas ativas (VCA_{DRC}). Quando isto não se verifica, significa que a massa de mastique de betuminoso é excessiva, estando as partículas ativas a serem afastadas, devendo aumentar-se a percentagem de partículas ativas na curva granulométrica de modo a assegurar o efeito de *stone-on-stone*.

Assim, das três misturas SMA experimentais deve ser escolhida, de acordo com a AASHTO R46, a SMA que apresente a menor percentagem de partículas ativas e que assegure o VMA mínimo de 17 % assim como um $VCA_{MIX} < VCA_{DRC}$. O valor de VMA deve ser de preferência superior a 17 % de modo a permitir acomodar uma possível redução do VMA durante a fase de fabrico da mistura SMA.

Após a obtenção da composição granulométrica a adotar na mistura SMA, poderá ser necessário modificar a percentagem de betume inicialmente definida de modo a ser obtida a porosidade pretendida para a mistura SMA. Nesta fase é necessário fabricar um conjunto de 12 amostras de mistura SMA, considerando quatro por cada percentagem de betume. À semelhança do procedimento anterior também aqui a quarta amostra deverá ser utilizada para avaliar a baridade máxima teórica, sendo as restantes três amostras compactadas. A percentagem ótima de betume resulta das três percentagens de betume avaliadas, sendo adotada aquela que assegure provetes com uma porosidade igual a 4,0 %, podendo em casos em que o tráfego é reduzido ser definido um volume de vazios mínimo de 3,0 %.

Adicionalmente, para a mistura SMA selecionada com a percentagem ótima de betume deve ainda ser avaliada: a sensibilidade ao escorrimento o qual não deverá ser superior a 0,3 % relativamente à massa total da mistura betuminosa; e a sensibilidade à água para provetes compactados com um volume de vazios igual a 6,0 % \pm 1,0 %, as quais deverão ter um IRC igual ou superior a 80 %. Adicionalmente e embora não seja um requisito obrigatório, caso seja utilizado o método de *Marshall*, a estabilidade *Marshall* deverá ser maior ou igual a 6,2 kN.

4.4 MÉTODO DE FORMULAÇÃO DESENVOLVIDO NA HOLANDA

Seguidamente, apresenta-se a abordagem holandesa como relatada por Voskuilen (2000) e Jacobs & Voskuilen (2004) a qual consiste essencialmente numa variação do método de *locking point* baseado no compactador giratório segundo os procedimentos utilizados nos EUA. Este método não requer que a SMA garanta qualquer critério de desempenho, mas apenas um critério volumétrico.

Ao contrário do método de formulação utilizado nos EUA que define a dimensão das partículas ativas em função da dimensão máxima nominal dos agregados utilizados numa mistura SMA, o método Holandês assume que as partículas ativas correspondem aos agregados grossos ou seja todas as partículas com dimensão igual ou superior a 2 mm. Os agregados finos são definidos como as partículas de dimensão inferior a 2 mm até 0,063 mm, sendo as partículas menores que 0,063 mm consideradas como filer.

De acordo com Voskuilen (2000) e Jacobs & Voskuilen (2004), as várias fases do método de formulação desenvolvido na Holanda, podem ser definidas nas seguintes etapas:

- determinar todas as massas volúmicas (agregados grossos, agregados finos, filer, betume e aditivos estabilizantes);
- para a mistura experimental de agregados definida inicialmente, compactar a amostra para determinar o volume de vazios na fração de agregados grossos e a quantidade de quebra de agregado grosso (≥ 2 mm). A quantidade de agregados fraturados (< 2 mm) deve ser posteriormente adicionada à parte da equação referente ao mastique betuminoso;
- determinar o volume do mastique betuminoso para se obter um valor de -4 para o FRs (percentagem de preenchimento do esqueleto de agregados grossos com mastique betuminoso). O volume de mastique betuminoso é determinado para uma percentagem de betume pré-definida (por massa), função da dimensão máxima nominal da mistura SMA utilizada e para uma percentagem de fibras igual a 0,3 % (por massa) para o volume de mastique. O volume de agregados finos e de filer a utilizar é determinado na proporção de 65/35 (por massa). Ambos os valores são calculados para 100 % da massa de agregados e para um betume base com penetração $70/100 \times 10^{-1}$ mm;
- a partir dos volumes determinados no passo anterior, calcular a percentagem de mastique betuminoso por massa;
- repetir as etapas anteriores para duas misturas calculadas com uma percentagem de agregados grossos igual a -2,5 % e a +2,5 % relativamente à mistura SMA experimental definida inicialmente;
- fabricar as misturas SMA e determinar o ponto de imbricamento, para o qual se obtém a baridade de referência (baridade correspondente ao ponto de imbricamento ou de *locking point*), tendo em consideração as três misturas de agregados experimentais anteriormente determinadas;
- compactar com o compactador *Marshall* ou com o compactador giratório até à baridade de referência e determinar a porosidade para as três misturas experimentais;
- interpolar para obtenção da porosidade que se pretende alcançar e estimar o FRs para a SMA ótima.

O método Holandês, por se tratar de um método volumétrico, requer a determinação das massas volúmicas de todos os materiais a utilizar na mistura SMA.

Seguidamente e à semelhança do método utilizado nos EUA, o método Holandês requer a avaliação do volume de vazios na fração grossa dos agregados. Porém, neste caso a avaliação é realizada através da utilização de uma amostra de agregados grossos e não de partículas ativas a qual é compactada num provete com diâmetro de 150 mm. A compactação é efetuada com o compactador giratório utilizando 300 giros com um ângulo externo de rotação de 1°, o qual pretende simular a sobrecompactação da mistura SMA e quebra do agregado durante o processo de aplicação e durante a fase de serviço. Neste caso a compactação não é efetuada a seco como para o método de compactação com o varão, sendo antes adicionado 1,5 %, de óleo relativamente à massa de agregados a ensaiar, o qual deverá ter uma viscosidade de cerca de 0,2 Pa.s a 25 °C para permitir a compactação à temperatura ambiente.

Após determinada a baridade das partículas de agregados grossos (igual ou superior a 2 mm) e determinado o volume de vazios na mistura compactada de agregados, os agregados são extraídos do óleo para posterior determinação da granulométrica. O material compactado que seja inferior a 2 mm corresponde ao material que partiu, pelo que nos cálculos deve ser adicionado à fração do mastique betuminoso e descontado da fração dos agregados grossos. O volume de vazios nos agregados grossos compactados é expresso pela seguinte relação:

$$V_s = \frac{\rho_g - \rho_g^b}{\rho_g} \cdot 100 \quad (4.6)$$

sendo:

V_s - volume de vazios na mistura de agregados grossos compactados (%);

ρ_g - massa volúmica dos agregados grossos (Mg/m³);

ρ_g^b - baridade dos agregados grossos compactados com o compactador giratório com adição de um lubrificante (Mg/m³).

Conhecendo o volume de vazios nos agregados grossos, é possível verificar o volume de mastique betuminoso adequado para se obter um valor FR_s igual a -4 através da seguinte equação:

$$FR_s = \frac{V_m - V_s}{V_s} \cdot 100 \Leftrightarrow V_m = \left(\frac{FR_s}{100} + 1 \right) \cdot V_s \quad (4.7)$$

sendo:

FR_s - percentagem de preenchimento do esqueleto de agregados grossos com mastique betuminoso (%);

V_m - volume de mastique betuminoso (%);

V_s - volume de vazios na mistura de agregados grossos compactados (%).

No método Holandês é assumido que não existem vazios no mastique betuminoso. Como tal, quando a percentagem de preenchimento do esqueleto de agregados grossos com mastique betuminoso for inferior a zero ($FR_s < 0$), significa que os vazios não estão totalmente preenchidos com mastique betuminoso. Quando o $FR_s = 0$ corresponde à situação em que os vazios estão totalmente preenchidos com mastique betuminoso, e se $FR_s > 0$ existe excesso de mastique betuminoso na mistura SMA.

Posteriormente, retira-se da especificação CROW (2014) uma percentagem pré-definida de betume a utilizar na mistura SMA, a qual depende da dimensão máxima nominal do agregado, sendo tanto menor quanto maior a dimensão máxima nominal dos agregados utilizada na SMA.

O método Holandês ao contrário de outros métodos de formulação tem como restrições ter de se assumir apenas um tipo de betume (penetração $70/100 \times 10^{-1}$ mm) e percentagens de betume pré-definidas. Por esse motivo, qualquer alteração deverá ser efetuada na mistura de agregados de modo a permitir a percentagem de betume definida na especificação. Quando um dos requisitos a respeitar pela mistura SMA não for assegurado, apenas a mistura de agregados é passível de ser alterada durante o processo de formulação.

Com base na percentagem de betume a utilizar para a mistura SMA desejada e considerando uma percentagem de 0,3 % de fibras, determina-se o volume de agregados finos e de fíler a utilizar de modo a ser assegurado uma proporção de 65/35, respetivamente.

De acordo com Voskuilen (2000), o volume de mastique betuminoso pode ser calculado utilizando a seguinte equação, permitindo a posterior comparação com o volume de mastique betuminoso calculado na equação (4.7):

$$V_m = \frac{m_b}{\rho_b} + \frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_s}{\rho_s} + \frac{m_{ad}}{\rho_{ad}} \quad (4.8)$$

sendo:

m_b - massa de betume (kg);

ρ_b - massa volúmica do betume (Mg/m^3);

m_f - massa de fíler (kg);

ρ_f - massa volúmica do fíler (Mg/m^3);

m_s - massa dos agregados finos (kg);

ρ_s - massa volúmica dos agregados finos (Mg/m^3);

m_{ad} - massa do aditivo estabilizante (kg);

ρ_{ad} - massa volúmica do aditivo estabilizante (Mg/m^3).

Seguidamente, repete-se todo o processo para mais duas misturas de agregados experimentais as quais deverão ser calculadas com uma percentagem de agregados grossos de -2,5 % e +2,5 % relativamente à mistura de agregados experimental definida inicialmente, fazendo-se variar a percentagem de agregados grossos que deverá estar compreendida no intervalo entre 72,5 % e 82,5 %.

Posteriormente, são fabricadas misturas SMA, tendo por base as misturas experimentais com variações na percentagem de agregado grosso, as quais são compactadas através do compactador giratório com provetes de diâmetro igual a 100 mm para uma altura de cerca de 60 mm, utilizando 200 giros de modo a permitir a determinação da baridade correspondente ao ponto de

imbricamento, o qual corresponde ao ciclo final de uma sequência de dez ciclos consecutivos onde se observe uma variação da altura do provete igual ou inferior a 0,2 % relativamente à sua altura.

O passo seguinte passa pelo fabrico e compactação de 12 provetes (quatro por cada mistura betuminosa experimental utilizada na formulação da SMA), podendo-se utilizar o método de compactação *Marshall* em que a compactação é efetuada com 50 pancadas aplicadas em cada topo num provete de 100 mm de diâmetro ou através do compactador giratório com provetes de diâmetro igual a 100 mm. O número de giros a utilizar na compactação deverá ser tal que assegure uma baridade do provete similar à de referência dada pelo ponto de imbricamento.

Porém, nada garante que o número de ciclos de referência do ponto de imbricamento assegurem a energia de compactação ou de quebra de agregado que ocorre em obra. Como se observou no ponto 4.3, o número de rotações deverá variar em função do coeficiente de Los Angeles, devendo o número de rotações ser tanto menor quanto menor for a resistência à fragmentação.

Para as três misturas betuminosas experimentais são posteriormente determinadas as características volumétricas de cada provete compactado, nomeadamente a porosidade, a qual associada à percentagem de agregados grossos permite seguidamente interpolar a porosidade que se pretende alcançar e estimar o FRs para a SMA ótima.

4.5 OUTROS MÉTODOS DE FORMULAÇÃO

A formulação de misturas SMA fundamenta-se na obtenção de um esqueleto pétreo que garanta um contacto do tipo *stone-on-stone* entre as partículas ativas ou agregados grossos. Segundo Austroads (2009) grande parte da investigação desenvolvida tem sido realizada nesse âmbito, com pouca investigação relativa à formulação de misturas SMA baseada na obtenção da percentagem ótima de betume. As três principais técnicas desenvolvidas para otimizar a granulometria das misturas SMA são (Austroads, 2009):

- o método do ponto de dilatação (*dilation method*, na terminologia anglo-saxónica) consiste na adição de consecutivos incrementos na percentagem de partículas passivas, que são adicionadas à estrutura de partículas ativas até que ocorra uma dilatação da estrutura pétreo de partículas ativas da mistura. Consequentemente, aquando da formulação da mistura SMA, a percentagem de partículas passivas a adicionar deverá ser inferior à percentagem de partículas passivas para a qual ocorre a dilatação;
- o método do ponto de imbricamento (*locking point method*, na terminologia anglo-saxónica) requer para a obtenção de um esqueleto pétreo adequado, a realização de um conjunto (experimental) de misturas SMA compactadas até que a mistura assegure um “imbricamento perfeito”, após o qual se atribui um posterior adensamento da mistura SMA à quebra de agregado;
- o método de Bailey utiliza um processo empírico concebido para otimizar a granulometria de uma mistura SMA tendo em consideração dois níveis de energia definidos através da compactação das partículas ativas. Na prática, o utilizador seleciona um dos dois níveis de compactação, e seguidamente adiciona os restantes materiais (materiais pétreos), de tal modo que a composição granulométrica assegure os rácios especificados para a fração das partículas ativas, para a fração de partículas de dimensão intermédia e para as partículas “finas” a qual inclui o filer.

Seguidamente, apresentam-se os três métodos tendo por base a revisão bibliográfica efetuada por (Austroads, 2009).

4.5.1 MÉTODO DO PONTO DE DILATAÇÃO

O método do ponto de dilatação foi desenvolvido pelo NCAT tendo-se posteriormente adotado na Austrália (Stephenson & Bullen, 2002). Este método, à semelhança dos vários métodos que vão sendo desenvolvidos, assume que as partículas ativas, após compactadas, constituem o esqueleto pétreo que assegura o efeito de *stone-on-stone*. Assim, o método do ponto de dilatação pretende determinar o volume máximo de partículas passivas (ver Quadro 3.5) para que não ocorra dilatação na estrutura pétreo formada pela partículas ativas. Segundo Austroads (2009) e como observado no ponto 3.2.4, o volume de vazios entre as partículas ativas de uma mistura SMA é tipicamente elevado com valores entre 35 % e 40 %, o qual é influenciado pela percentagem de partículas passivas utilizada. Deste modo, a determinação do volume “ótimo” de partículas passivas a adicionar deverá permitir a posterior adição de filer, aditivos estabilizantes, betume assim como a obtenção de uma porosidade adequada para a mistura SMA.

O conceito de ponto de dilatação é avaliado para uma determinada curva granulométrica definida segundo um fuso granulométrico pré-definido, e para a qual se prepara uma série de amostras as quais são compactadas com o compactador giratório. As amostras são fabricadas com uma percentagem constante de partículas ativas, de filer, de betume e de aditivos estabilizantes, fazendo-se variar apenas a percentagem de partículas passivas utilizada na mistura SMA.

O incremento de partículas passivas na mistura SMA promove um crescente preenchimento dos vazios entre as partículas ativas, até ao ponto em que o volume de partículas passivas supera o volume disponível entre as partículas ativas. Quando alcançado esse ponto, o excesso de partículas passivas tende a promover um afastamento e conseqüente dilatação do esqueleto pétreo formado pelas partículas ativas.

A crescente adição de partículas passivas influencia nomeadamente a altura que se obtém no provete compactado, a qual se mantém relativamente constante até ao total preenchimento dos vazios entre as partículas ativas. O ponto de dilatação é usualmente interpretado como a intersecção de duas retas resultantes de diferentes alturas que vão sendo obtidas para os provetes com diferentes percentagens de partículas passivas.

Na Figura 4.2 é possível observar um exemplo da determinação do ponto de dilatação apresentando-se a percentagem de partículas passivas adicionada relativamente à variação que ocorre na altura dos provetes. No estudo apresentado pela Austroads (2009) foram utilizados três conjuntos de agregados distintos, fazendo-se variar a percentagem de partículas passivas utilizada. Cada amostra utilizada no estudo foi preparada utilizando a mesma energia de compactação (120 giros no compactador giratório ServoPac com uma pressão de contacto de 240 kN, um ângulo de compactação de 3°, e um ritmo de revolução de 60 rotações por minuto para provetes com 150 mm de diâmetro).

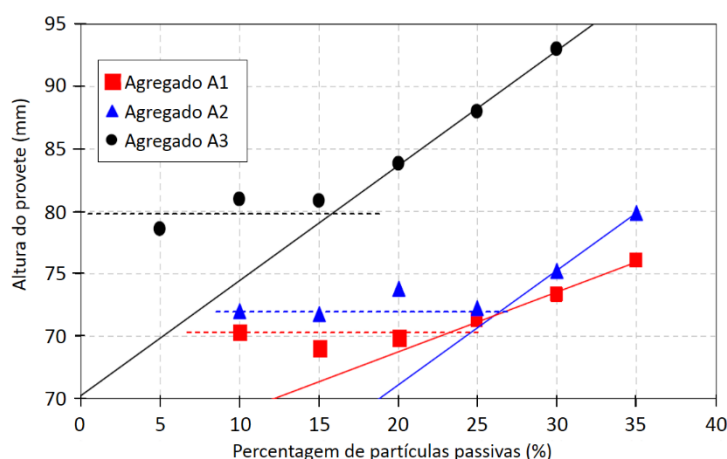


Figura 4.2 – Avaliação do ponto de dilatação baseado na variação da altura do provete em função da percentagem de partículas passivas utilizada (adaptado de Austroads, 2009)

Na Figura 4.2 é possível observar as linhas a traço interrompido correspondentes à fase prévia da dilatação da estrutura pétre de partículas ativas e as linhas a traço contínuo correspondentes ao momento em que se inicia uma crescente dilatação da estrutura pétre. O ponto de dilatação é definido como a intersecção entre as duas retas. Para o agregado A1, o ponto de dilatação ocorreu quando a proporção de partículas passivas era cerca de 23 %. Similarmente os pontos de dilatação para os agregados A2 e A3 são de 26 % e 16 %, respetivamente. Contudo, o ponto de intersecção muitas vezes não é passível de ser claramente definido, uma vez que, ao serem introduzidas as partículas passivas, estas poderão não preencher apenas os vazios, o que altera o esqueleto de partículas ativas em certa medida, mesmo para proporções muito pequenas (Austroads, 2009).

A crescente adição de partículas passivas influi igualmente na estabilidade da mistura SMA e consequentemente no seu módulo de deformabilidade, o qual tem sido estudado por Stephenson & Bullen (2001) e Meng & Yunfen (2007). No estudo realizado pela Austroads (2009), as amostras provenientes do estudo anterior (ponto de dilatação baseado na variação da altura dos provetes) foram utilizadas para avaliar o conceito do módulo de deformabilidade, tendo as amostras sido cortadas para se obter provetes com diâmetro de 100 mm. Na Figura 4.3 apresentam-se os resultados da variação do módulo de deformabilidade comparativamente à percentagem de partículas passivas adicionada. Segundo o estudo, o módulo de deformabilidade após a dilatação é relativamente constante, permitindo uma aproximação razoável para se determinar regressões com base nos dados obtidos.

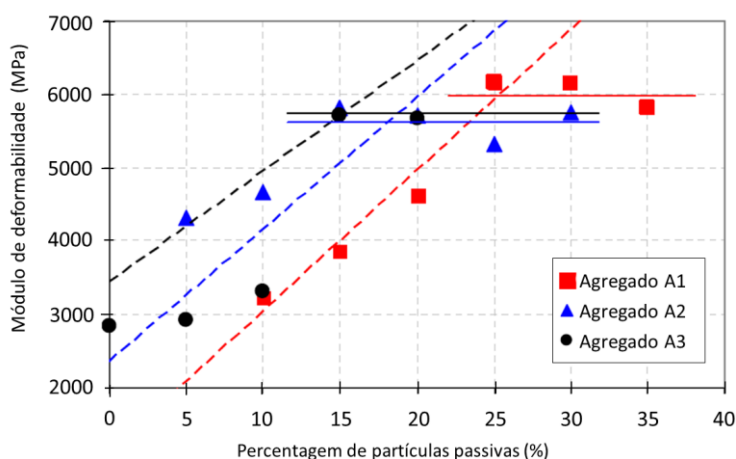


Figura 4.3 – Avaliação do ponto de dilatação baseado na variação do módulo de deformabilidade do provete em função da percentagem de partículas passivas utilizada (adaptado de Austroads, 2009)

A Figura 4.3 apresenta as regressões obtidas para o módulo de deformabilidade (sem dilatação) através de linhas a traço interrompido e as regressões obtidas para o módulo de deformabilidade após dilatação da estrutura representadas a traço contínuo. Um resumo dos resultados obtidos com os dois métodos utilizados para determinar o ponto de dilatação é apresentado no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Análise comparativa dos dois métodos para avaliação do ponto de dilatação (adaptado de Austroads, 2009)

Material	Percentagem de agregados finos		
	Agregado A1	Agregado A2	Agregado A3
Ponto de dilatação segundo a variação da altura	23	26	16
Ponto de dilatação segundo a variação do módulo	25	18	15

Segundo os dados apresentados no Quadro 4.1, verifica-se que o ponto de dilatação para o agregado A2 baseado no módulo de deformabilidade é diferente do que é baseado na variação da altura dos provetes compactados.

No estudo realizado por Austroads (2013), para avaliar o efeito de *stone-on-stone* numa mistura de agregados, o método do ponto de dilatação baseado na variação da altura dos provetes ou do módulo de deformabilidade tende a produzir as misturas de agregado com menor percentagem de partículas passivas comparativamente ao método de Bailey e ao método de compactação com varão desenvolvido pelo NCAT. O tipo de granulometria obtida poderá de acordo com o referido estudo produzir misturas SMA com uma maior porosidade e consequentemente com maior sensibilidade à água.

4.5.2 MÉTODO DO PONTO DE IMBRICAMENTO

O método do ponto de imbricamento, à semelhança do método do ponto de dilatação, assume que as partículas ativas são responsáveis por assegurar um esqueleto pétreo com efeito de *stone-on-stone*. Neste método a avaliação do imbricamento máximo é efetuada tendo por base que o efeito de *stone-on-stone* é alcançado quando o compactador é incapaz de continuar a compactar a mistura SMA sem que isso implique a quebra dos agregados.

Este método implica, para uma determinada curva granulometria definida segundo um fuso granulométrico pré-definido, o fabrico de uma série de amostras de mistura SMA para as quais se faz variar a percentagem de partículas passivas, sendo as mesmas posteriormente compactadas utilizando um compactador giratório Superpave segundo Jacobs & Voskuilen (2004).

A definição do ponto de imbricamento para cada mistura SMA avaliada consiste na situação em que a alteração da altura do provete para cada três giros consecutivos é menor do que 0,05 mm (Austroads, 2009).

Na Figura 4.4 apresenta-se um exemplo da determinação do ponto de imbricamento de acordo com o estudo realizado por Austroads (2009), onde foi utilizado um compactador giratório Australiano ServoPac segundo o procedimento Australiano AS 2891.2.

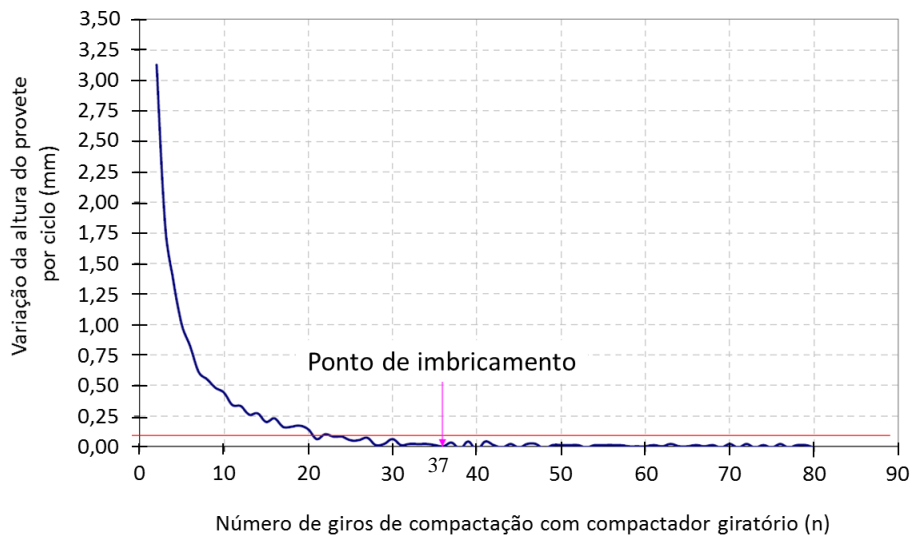


Figura 4.4 – Variação da altura de um provete para cada giro quando compactado com um compactador giratório (adaptado de Austroads, 2009)

Na Figura 4.4 é possível observar-se uma redução da altura do provete de mistura SMA em função do número de giros até um momento em que a variação da altura do provete é diminuta, verificando-se o ponto de imbricamento para 37 giros.

Na África do Sul, Louw *et al.* (1997) também desenvolveram uma versão do método do ponto de imbricamento denominado como método 3-2-2. De acordo com os autores, o ponto de imbricamento ocorre quando a altura da amostra se mantém inalterada para duas séries consecutivas de dois giros consecutivos mantendo-se posteriormente inalterada para mais três giros consecutivos, como é ilustrado na Figura 4.5 (Austroads, 2009).

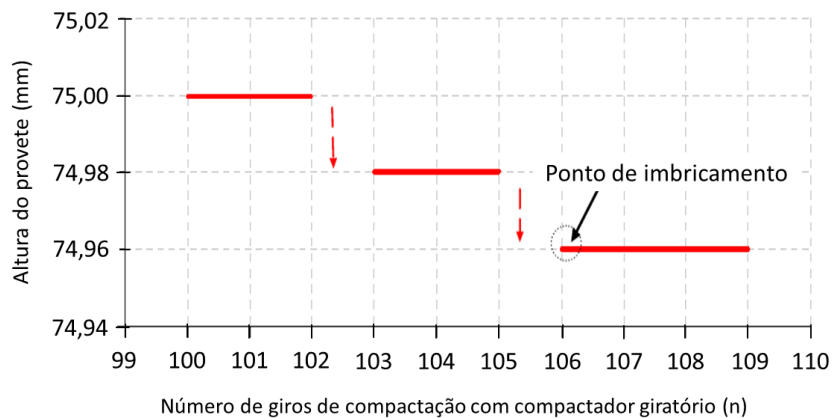


Figura 4.5 – Representação esquemática do conceito 3-2-2 para avaliação do ponto de imbricamento (adaptado de Austroads, 2009)

4.5.3 MÉTODO DE BAILEY

O método de Bailey foi originalmente desenvolvido por Robert Bailey e posteriormente alterado por Vavrik *et al.* (2001) e Vavrik *et al.* (2002) de modo a permitir o desenvolvimento de um método passível de ser utilizado para diversos tipos de misturas betuminosas, nomeadamente misturas SMA, função da dimensão máxima nominal dos agregados utilizados.

Segundo Vavrik *et al.* (2002), o método de Bailey permite a seleção da granulometria de agregados a utilizar de modo a assegurar o imbricamento entre as partículas ativas e um *VMA* adequado. Segundo os mesmos autores, o método de Bailey não constitui um método de formulação de misturas betuminosas, na medida em que permite a formulação da granulometria dos agregados e não da mistura betuminosa. O método de Bailey não indica quais as propriedades a adotar para os agregados ou para a mistura betuminosa, que permitam fabricar misturas betuminosas em que seja assegurado um desempenho adequado.

A seleção da granulometria é baseada no princípio do arranjo estrutural das partículas de agregado permitindo controlar o *VMA* através da alteração do nível de acondicionamento das partículas ativas e das partículas passivas. Para o efeito, o método assume que os vazios no esqueleto pétreo das partículas ativas é preenchido com partículas passivas, sendo esses vazios correspondentes a 22 % da dimensão máxima nominal dos agregados utilizados na mistura ($0,22 \cdot D$).

De acordo com Vavrik (2000), o valor de 22 % foi escolhido tendo por base a revisão bibliográfica efetuada que indicava que o rácio comum entre a partícula que cabe no vazio criado e a partícula que cria o vazio é de 0,22. Este valor é válido para uma análise 2D (0,155 para partículas com todas as faces arredondadas, 0,240 para partículas com uma face arredondada e duas britadas a 0,289 para partículas com todas as faces britadas) e para uma análise 3D (0,15 para um arranjo hexagonal de esferas e 0,42 para um arranjo cúbico de esferas) quando estudado o arranjo estrutural dos agregados.

Se analisado o valor de 0,22 utilizado por Vavrik *et al.* (2002) de acordo com o que foi analisado no ponto 3.2.2 para as propriedades dos agregados grossos, é possível observar uma tendência nas misturas SMA para se recomendar a utilização de pelo menos uma face britada para 100 % dos agregados grossos, sendo cada vez mais recorrente a utilização de pelo menos duas faces britadas. Sendo por esse motivo espectável que o valor para este tipo de mistura betuminosa esteja compreendido entre 0,26 e 0,29 para o rácio do diâmetro se considerado a análise 2D e 3D de forma conjunta.

O valor de 0,22 é posteriormente utilizado para definir o peneiro de referência para as partículas ativas, como se apresenta na equação seguinte:

$$PCS = 0,22 \cdot D \quad (4.9)$$

sendo:

PCS – peneiro de controlo primário (mm);

D – dimensão máxima nominal do agregado utilizado na mistura betuminosa (mm).

A primeira fase do método consiste na avaliação do volume de vazios das partículas ativas sem compactação e através de compactação com o varão seguindo a metodologia contemplada na

norma AASHTO T19 e apresentada anteriormente no ponto 4.3. No primeiro caso, a baridade sem compactação é designada por *loose unit weight* (LUW) sendo determinada através da colocação das partículas ativas no interior de um recipiente, preenchendo até ao seu topo e nivelando posteriormente a superfície. O segundo nível de compactação consiste na compactação com o varão e posterior determinação da baridade, a qual é denominada como *rodded unit weight* (RUW). De acordo com o método, a compacidade pretendida para a mistura de agregados é função do tipo de mistura betuminosa que se pretende fabricar. Para a formulação de misturas SMA, o esqueleto de agregados pretendido deve ser pelo menos tão denso quanto a condição RUW, devendo ser utilizado o valor da baridade RUW ou entre 110 % e 125 % da baridade LUW como se apresenta na Figura 4.6.

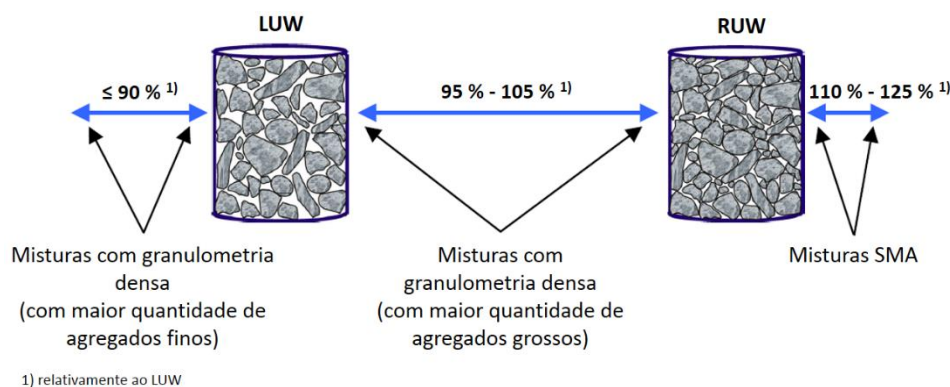


Figura 4.6 – Seleção do nível de compacidade pretendida função do tipo de mistura betuminosa a fabricar (adaptado de Vavrik *et al.*, 2002)

É assumido que as granulometrias que produzem menor volume de vazios no esqueleto das partículas ativas são obtidas para a condição RUW a que corresponde um contacto do tipo *stone-on-stone* que é o requisito primordial para uma mistura SMA (Austroads, 2009).

Posteriormente, o método determina uma série de intervalos dentro do fuso granulométrico que controlam a compacidade da mistura de agregados. Com base no peneiro de controlo primário (PCS) que define a fração de partículas ativas é determinado um peneiro secundário de controlo (SCS) e um peneiro terciário de controlo (TCS) que determinam a fração de partículas intermédia e a fração das partículas “finas”, respetivamente. O peneiro secundário de controlo é determinado através da multiplicação do peneiro de controlo primário por 0,22, o mesmo processo deverá ser realizado para determinar o peneiro de controlo terciário, neste caso multiplicando 0,22 pelo peneiro de controlo secundário.

Adicionalmente, de acordo com Vavrik *et al.* (2002), o método implica o cálculo dos rácios da fração das partículas ativas (CA), da fração intermédia de partículas (FA_c) e das partículas “finas” a qual inclui o fíler (FA_f). No Quadro 4.2 são apresentados os valores recomendados a utilizar para os rácios.

Quadro 4.2 – Intervalo dos valores recomendados para o rácio de agregados grossos (CA), da fração intermédia (FA_c), dos agregados finos (FA_f) (Vavrik *et al.*, 2002)

Rácio	Dimensão máxima nominal do agregado utilizado na mistura (D)		
	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm
CA	0,35 - 0,50	0,25 - 0,40	0,15 - 0,30
FA _c	0,60 - 0,85	0,60 - 0,85	0,60 - 0,85
FA _f	0,65 - 0,90	0,60 - 0,85	0,60 - 0,85

Segundo o método, a utilização de rácios permite garantir a existência de vazios suficientes para as diferentes dimensões de agregados utilizadas na mistura. De acordo com Gierhart (2007), apesar do método de Bailey ser um método interessante, este requer que seja adaptado para os materiais utilizados em cada país, nomeadamente no que concerne aos valores dos rácios utilizados.

4.6 ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES EXIGIDAS PARA AS MISTURAS SMA

De acordo com a análise efetuada no capítulo 4 e no Anexo I-K, apresenta-se no Quadro 4.3 uma compilação das propriedades e respetivos valores recomendados internacionalmente para as misturas SMA formuladas em laboratório.

Quadro 4.3 – Propriedades recomendadas para as misturas SMA formuladas em laboratório

Propriedades das misturas betuminosas		Tráfego Reduzido (TMDA < 5000) SMA ≤ 8 mm	Tráfego Médio/Elevado (TMDA ≥ 5000) SMA ≥ 8 mm
Propriedades volumétricas	Método de compactação	Marshall ¹⁾ ; Giratório ²⁾	
	VCA _{MIX}	< VCA _{DRC}	
	Porosidade (%)	V _{Vmin1,5} - V _{Vmáx 5,0}	V _{Vmin1,5} - V _{Vmáx 6,0}
	Volume de vazios na mistura de agregados (%)	VMA _{min15,0}	
	Volume de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume (%)	VFB _{min70} - VFB _{máx92}	
Propriedades mecânicas	Estabilidade Marshall (kN)	≥ 6,0	
Propriedades relacionadas com o desempenho	Deformação permanente		WTS _{AIR 0,3} - WTS _{AIR 5,0} PRD _{AIR Declarado} - PRD _{AIR 50,0}
	Sensibilidade à água, ITS _R (%)	ITS _{RDeclarado} - ITS _{R90}	
	Sensibilidade à água, IRC (%)	IRC ≥ 75	
	Escorrimento (%)	D _{Declarado} - D _{0,3}	

Legenda: 1) compactação com 50 pancadas por topo; 2) compactação entre 75 e 100 giros para obtenção de baridades semelhantes às obtidas através do compactador Marshall com 50 pancadas por topo

Segundo a informação compilada no Anexo I-K é possível observar que o compactador *Marshall* é indicado em todos os países analisados incluindo os que especificam a utilização do compactador giratório como seja o caso dos EUA, Holanda, Nova Zelândia e Austrália. A utilização do compactador *Marshall* é comumente efetuada utilizando 50 pancadas em cada topo do provete. As exceções são a Bulgária e Hong-Kong onde é especificado 75 pancadas em cada topo, sendo ainda recomendada na Nova Zelândia e Austrália essa energia de compactação, mas apenas para misturas SMA que sejam aplicadas em condições de tráfego elevado. 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*.

Ainda segundo a informação apresentada no Anexo I-K é possível observar que, apesar de comum a utilização do método de compactação *Marshall*, não é habitual a recomendação de valores mínimos para a estabilidade ou para a deformação *Marshall*. Ainda assim existem países que procedem à sua especificação. No caso da estabilidade, esta é especificada como devendo ser superior a um valor que pode variar de 6,0 kN (República Checa e Hong-Kong) a 9,0 kN (Singapura), sendo o valor de 6,0 kN a 7,0 kN o intervalo preferencialmente utilizado. A utilização de valores tão reduzidos para a estabilidade foi constatada no estudo efetuada por Brown & Manflorkar (1993), o qual concluiu que a

reduzida estabilidade obtida não se deve a uma reduzida estabilidade das misturas SMA, mas sim a uma reduzida capacidade do ensaio da estabilidade *Marshall* para avaliar a estabilidade das misturas SMA. Relativamente à deformação *Marshall* o intervalo especificado varia entre 0 mm e 16 mm. De acordo com o estudo efetuado por Brown & Manflorkar (1993) constatou-se que a variação da percentagem de betume apresenta um efeito muito reduzido na deformação *Marshall* das misturas SMA, o que indica que as misturas SMA são pouco sensíveis a variações na percentagem de betume. Os mesmos autores concluíram que as misturas SMA tendem a apresentar uma deformação *Marshall* superior às misturas betuminosas convencionais, o que poderá indicar que as misturas SMA são mais flexíveis.

No que concerne à compactação com o compactador giratório é habitualmente utilizada na Austrália. Segundo West *et al.* (2007) o compactador giratório Superpave está igualmente a ganhar uma maior aceitação nos EUA para a formulação de misturas SMA apesar da maioria dos estudos efetuados e aplicações se basearem na formulação através do método *Marshall*. De acordo com (CAPA, 2002), o método Superpave é um método de formulação, enquanto uma mistura SMA é um conceito de formulação e de produto.

Na Austrália são utilizados habitualmente 120 giros (Austroads, 2009), enquanto nos EUA vários estudos (Brown & Cooley, 1999, Brown *et al.*, 1998, Prowell *et al.*, 2002 e West & James, 2005), recomendam a utilização de 70 a 100 giros como sendo representativo da baridade obtida para uma mistura SMA compactada com 50 pancadas em cada topo através do compactador *Marshall*.

No que concerne à porosidade a adotar para as misturas SMA é possível observar que na grande generalidade dos países, o valor tende a manter-se constante independentemente da dimensão máxima nominal do agregado utilizada nas SMA. Porém, exceções existem, como seja o caso da Alemanha, onde o aumento da dimensão do agregado resulta num aumento do limite inferior do intervalo da porosidade, noutros países é o limite superior que diminui. Apesar das variações que possam ocorrer na porosidade, o limite inferior do intervalo pode variar entre 1,5 % a 5,0 %, sendo comumente utilizado um valor entre 2,0 % e 3,0 %. O valor de 2,0 % é habitualmente utilizado pelos países nórdicos. Relativamente ao limite superior do intervalo, é comum a utilização de um valor de 4,0 %, apesar do intervalo para o limite superior da porosidade das misturas SMA nos vários países analisados variar entre 3,0 % e 6,0 %.

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 %, podendo o intervalo de valores especificados variar entre 15 % e 20 %.

De acordo com o estudo McGhee *et al.* (2005) verifica-se uma diminuição do VMA nas misturas SMA para um aumento da dimensão máxima nominal do agregado. Nos EUA é recomendada a utilização de um valor de VMA superior a 17 % na formulação, dada a possibilidade de uma redução significativa do seu valor, resultante da quebra de agregado durante o fabrico, aplicação e durante a fase de serviço da mistura SMA. Na Europa não é comum especificar o valor de VMA a respeitar, o qual, caso fosse especificado deveria ser inferior a 17 %, uma vez que segundo os fusos granulométricos utilizados na Europa, como abordado no ponto 3.2.4, e de acordo com a influência da percentagem de finos, segundo o que foi mencionado no ponto 3.3.1 (Figura 3.11), é expectável que o valor do VMA a respeitar seja ligeiramente inferior entre 15 % e 16 %.

No que concerne ao VFB, este valor tende a ser especificado para valores que variam entre 70 % e 92 %. Para o limite inferior do intervalo o valor comumente utilizado varia entre 70 % e 75 %, sendo o limite superior do intervalo comumente especificado de 85 %.

No Anexo I-K são igualmente apresentadas as propriedades relacionadas com o desempenho das misturas SMA, como seja o caso da avaliação da resistência à deformação permanente, da sensibilidade à água e do escorrimento de material betuminoso.

Apesar da forte ênfase que existe em torno das misturas SMA relativamente ao seu desempenho, no que concerne à resistência à deformação permanente, poucos são os países que especificam valores limite para a média da profundidade de rodeira a 10000 ciclos (RD_{AIR}), ou para a média da taxa de deformação (WTS_{AIR}), ou mesmo para a média da percentagem da profundidade de rodeira a 10000 ciclos (PRD_{AIR}). As exceções são a Escócia, a Suíça, o Reino Unido, a República Checa, a Polónia e a Roménia. As propriedades habitualmente recomendadas não são tanto a RD_{AIR} , como especificado apenas na República Checa e que deverá ser igual ou inferior a 1,6 mm para uma temperatura de ensaio de 50 °C, mas a WTS_{AIR} e a PRD_{AIR} . Para a WTS_{AIR} são especificados valores que podem variar entre $\leq 0,30 \text{ mm}/10^3$ e $\leq 5,00 \text{ mm}/10^3$ no caso do Reino Unido para misturas SMA a aplicar em aeroportos. No caso da norma EN 13108-5 é indicado um intervalo espectável entre $0,03 \text{ mm}/10^3$ e $1,00 \text{ mm}/10^3$. Relativamente à PRD_{AIR} os valores especificados variam num caso mais restritivo entre $\leq 5 \%$ até $\leq 50 \%$ no caso da Escócia. Segundo a norma EN 13108-5 o valor do PRD_{AIR} deverá estar num intervalo espectável entre 1,0 % e 16,0 %.

Relativamente à sensibilidade à água, é comum ser especificada a sua avaliação através da resistência conservada em tração indireta ($ITSR$) contemplada na norma EN 12697-12 ou através do índice de resistência conservada (IRC) segundo a norma MIL-STD-620A – método 104. Em ambos os casos é possível observar uma variedade de valores mínimos especificados os quais variam entre 70 % e 90 %. Todavia no caso do IRC o valor especificado tende a estar entre 70 % e 85 %. No estudo realizado por Stuart & Mogawer (1995) foi sugerido a adoção de um IRC mínimo de 80 %. No caso dos EUA, segundo a norma AASHTO M325 os provetes a utilizar na avaliação da sensibilidade à água devem ser compactados para um volume de vazios de $6,0 \% \pm 1,0 \%$. Segundo o NCAT, a permeabilidade é considerada significativa, caso o volume de vazios seja superior a 6 %, pelo que a percentagem de betume deverá ser mantida num nível máximo (Austroads, 2009).

Ao contrário da avaliação da resistência à deformação permanente e da sensibilidade à água, no caso da avaliação do escorrimento é quase unânime a consideração de um valor igual ou inferior a 0,3 % relativamente à massa total da mistura betuminosa, sendo as exceções a Suíça a especificar um valor de 0,6 % e a Roménia de 0,2 %.

No que concerne à avaliação do volume de vazios existente entre as partículas ativas, como forma de permitir aferir o nível de *stone-on-stone* que é obtido apenas é especificado nos EUA, China, Brasil e Índia. Tal constatação evidencia mais uma vez, o longo caminho que existe ainda por percorrer no desenvolvimento de um método que seja amplamente aceite a nível internacional para a formulação das misturas SMA com uma estrutura *stone-on-stone* adequada, situação igualmente referida pela norma EN 13108-5.

4.7 RECOMENDAÇÕES PARA AS PROPRIEDADES EXIGIDAS ÀS MISTURAS SMA A UTILIZAR EM PORTUGAL

A partir da análise efetuada no ponto 4.6 e tendo em consideração a informação compilada do Anexo I-K, no Quadro 4.4 são apresentadas as recomendações no que refere aos valores limite a definir para as propriedades das misturas SMA a utilizar em Portugal.

Quadro 4.4 – Recomendações para as propriedades das misturas SMA a utilizar em Portugal

Propriedades das misturas betuminosas		Tráfego Reduzido (TMDA < 5000) SMA ≤ 8 mm	Tráfego Médio/Elevado (TMDA ≥ 5000) SMA ≥ 8 mm
Propriedades volumétricas	Método de compactação	Marshall ²⁾ ; Giratório ³⁾	
	VCA _{MIX} (%)	≤ VCA _{PC} ⁴⁾	
	Porosidade (%)	$V_{V\ min2,5} - V_{V\ máx\ 4,0}$	
	Volume de vazios na mistura de agregados (%)	VMA _{min17,0}	
	Volume de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume (%)	VFB _{min70} - VFB _{máx92}	
Propriedades relacionadas com o desempenho	Deformação permanente ¹⁾	RD _{AIR 4,0}	
		WTS _{AIR 0,15}	
		PRD _{AIR 8,0}	
	ITSR (%)	ITSR ₉₀	
Escorrimento (%)	D _{0,3}		

Legenda: 1) valores máximos admissíveis; 2) compactação com 50 pancadas por topo; 3) compactação entre 75 e 100 giros para obtenção de baridades semelhantes às obtidas através do compactador *Marshall* com 50 pancadas por topo; 4) volume de vazios na mistura de partículas ativas compactadas com o compactador Proctor (ver capítulo 7)

Apesar de ser comum a recomendação de VMA igual ou superior a 17 %, segundo a conclusão obtida no ponto 3.3.1, considera-se, que de acordo com os fusos granulométricos definidos a nível europeu é espectável a obtenção de valores de VMA entre 15 % e 16 %. Ainda assim, no presente trabalho sendo objetivo maximizar a quantidade de betume utilizada nas misturas SMA, recomenda-se de igual modo a utilização de um valor mínimo de 17 %, preferencialmente superior a 18 % para se 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 4.4 as misturas SMA segundo a norma EN 13108-5 podem ter ainda 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.

5 ESTUDO DE PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS A ADOTAR PARA CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS SMA (FASE 1)

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Tendo presente a incipiente utilização de misturas SMA em Portugal e com o objetivo de contribuir para uma melhor compreensão dos aspetos particulares relativos ao fabrico e avaliação em laboratório de misturas SMA, procedeu-se nesta primeira fase do estudo experimental (Fase 1) a uma avaliação prévia das condições de fabrico em laboratório, da energia de compactação a adotar, assim como do estudo dos métodos mais adequados para a avaliação do escoamento de material betuminoso e para a determinação da percentagem de betume/ligante betuminoso e granulometria.

5.2 MATERIAIS ESTUDADOS

Nos estudos realizados na presente fase do estudo experimental foram utilizadas diferentes misturas do tipo SMA 12 e SMA 14, consoante o tipo de avaliação realizada cujos materiais constituintes são seguidamente descritos.

Para fabrico das misturas SMA 12 (SMA 12 surf 45/80-55) foram fornecidos pela JAOP – Sociedade de Empreitadas, S.A. os seguintes materiais:

- agregados (fração 6/10 mm) de natureza granodiorítica, provenientes da Pedreira da Herdade de Benafessim propriedade da Mota Engil Engenharia e Construção, S.A., localizada em Montemor-o-Novo;
- agregados (fração 0/4 mm) de natureza granodiorítica, provenientes da Pedreira de Sobrissul, localizada em Sesimbra;
- filer comercial de origem calcária provenientes da Omya, localizada em Fátima;
- betume modificado com elastómeros da categoria PmB 45/80-55 fabricado pela CEPSA;
- fibras celulósicas aglomeradas com adição de betume (Viatop® Premium, de acordo com a designação comercial do fabricante JRS, Rettenmaier Ibérica), as quais apresentam uma composição de 10/90 (% de betume / % de fibras) relativamente à massa total do aglomerado.

Para fabrico das misturas SMA 14-1 (SMA 14 surf 45/80-65) foram utilizados os seguintes materiais, gentilmente cedidos pelas empresas indicadas:

- agregados (frações 10/16 mm e 4/12 mm) de natureza basáltica, provenientes da Pedreira Moita da Ladra, propriedade da Alves Ribeiro, S.A., localizada em Vialonga;
- agregados (fração 0/4 mm) de natureza calcária, provenientes da Pedreira Calbrita, propriedade da Sociedade de Britas Ricardo Pereira & Filhos Lda., localizada em Alenquer;
- filer comercial de origem calcária provenientes da Omya, localizada em Fátima;
- betume modificado com elastómeros da categoria PmB 45/80-65 fabricado pela REPSOL;
- fibras celulósicas aglomeradas com adição de betume (Viatop® Premium), como aditivo estabilizante.

Relativamente à mistura SMA 14-2 (SMA 14 surf 45/80-65) foram utilizados os seguintes materiais fornecidos pela JRS, Rettenmaier Ibérica:

- agregados (frações 6/16 mm e 0/5 mm) de natureza granítica, provenientes da Pedreira Quinta da Caçôa, propriedade da J. Bartolomeu Exploração de Pedreiras, Lda., localizada no Fundão;
- fíler comercial de origem calcária, proveniente da Omya, localizada em Fátima;
- betume modificado com elastómeros da categoria PmB 45/80-65 fabricado pela Probigalp, S.A.;
- fibras celulósicas aglomeradas com adição de betume (Viatop® Premium).

De acordo com os estudos de formulação efetuados e que posteriormente se pormenorizam, na segunda fase do estudo experimental (Fase 2) foram utilizadas as seguintes fórmulas de trabalho para as misturas do tipo SMA 12 e SMA 14 que se apresentam seguidamente no Quadro 5.1 e cujas curvas granulométricas se representam na Figura 5.1 e Figura 5.2.

Para cada tipo de mistura SMA, foram realizadas variações no que concerne à composição utilizada, tendo-se referenciado as misturas com as seguintes designações: SMA 12.O, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.O, SMA 14-1.E e SMA 14-2.

Quadro 5.1 – Fórmulas de trabalho definidas para as misturas SMA estudadas na primeira fase do estudo experimental

Fração / material utilizado	Identificação das misturas SMA e natureza dos agregados					
	SMA 12			SMA 14-1		SMA 14-2
	O	B	C	O	E	
	Granodioritos			Basaltos		Granitos
10/16 mm (%)	-	-	-	30,8	¹⁾	-
6/16 mm (%)	-	-	-	-	-	74,8
4/12 mm (%)	-	-	-	38,3	¹⁾	-
6/10 mm (%)	60,7	74,5	76,3	-	-	-
0/5 mm (%)	-	-	-	-	-	9,4
0/4 mm (%)	28,7	8,4	5,6	15,0	8,4	-
Fíler comercial (%)	4,7	10,2	11,2	9,4	10,2	9,4
Fibras celulósicas (%)	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,4
Betume modificado (%)	5,5	6,5	6,5	6,0	6,5	6,0

Legenda: 1) o conjunto da fração 4/12 e 10/16 corresponde a 74,3 %

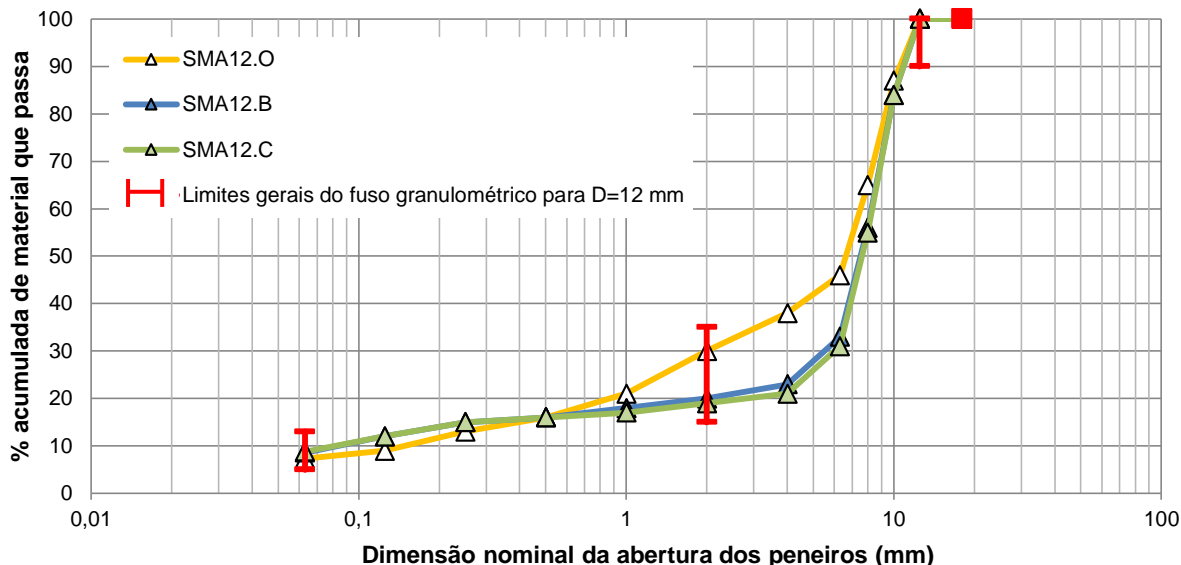


Figura 5.1 – Curvas granulométricas definidas para cada mistura do tipo SMA 12

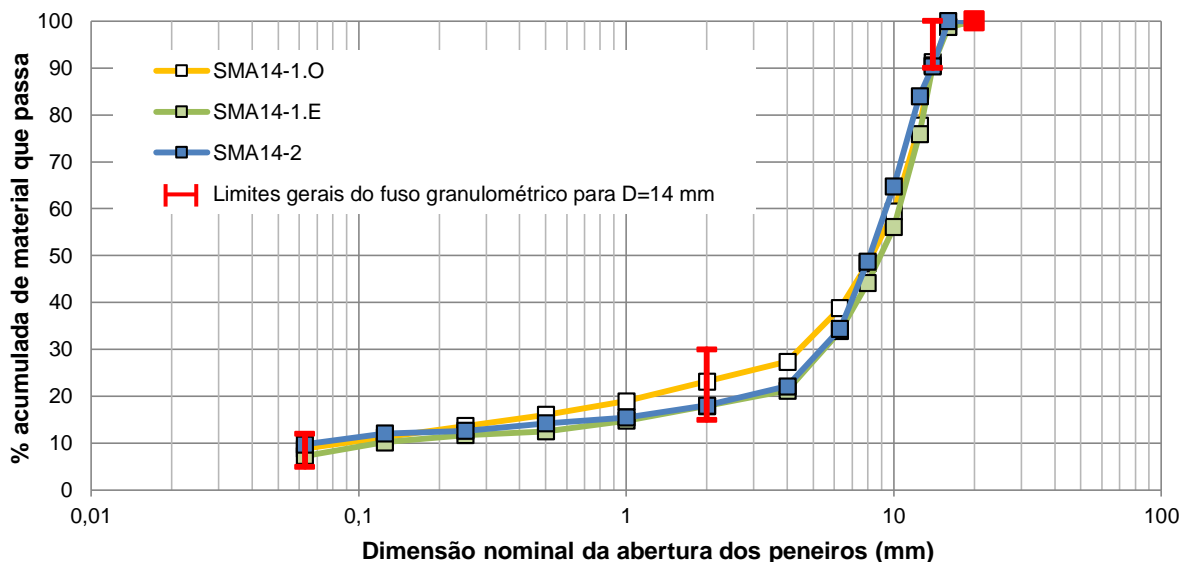


Figura 5.2 – Curvas granulométricas definidas para cada mistura do tipo SMA 14

5.3 AVALIAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE FABRICO EM LABORATÓRIO

Durante a fase de formulação e fabrico das misturas SMA em laboratório, por vezes a utilização de aditivos estabilizantes parece não ser necessária. Contudo, as condições em obra e a variabilidade decorrente do processo de fabrico, transporte e aplicação, promove por vezes o escorrimento de material betuminoso, sendo por essa razão fundamental a utilização de aditivos estabilizantes (CAPA, 2002).

O processo de fabrico de misturas SMA em laboratório, assim como na central de misturas betuminosas é em tudo semelhante ao que se realiza com as misturas betuminosas convencionais (para maior detalhe consultar o ponto 2.2), diferindo essencialmente no facto de se adicionar um aditivo estabilizante.

No presente estudo como aditivo estabilizante foram utilizadas fibras celulósicas aglomeradas com betume, as quais requerem durante o fabrico, que seja assegurada a sua completa dispersão na mistura betuminosa. Sendo o fabrico e a aplicação de misturas SMA uma técnica ainda recente em Portugal considera-se importante contribuir para a validação de um procedimento a utilizar para a adição de fibras celulósicas em laboratório.

Como contributo, no presente estudo foram avaliados dois procedimentos laboratoriais para a adição de fibras celulósicas nas misturas SMA:

- adição a quente (adição com aquecimento das fibras celulósicas), recomendado pelo fabricante de fibras celulósicas JRS, Rettenmaier Ibérica;
- adição a frio (adição sem aquecimento das fibras celulósicas), proposto para avaliação no presente estudo.

No procedimento por adição a quente, para o fabrico das misturas SMA, procede-se inicialmente à preparação das quantidades necessárias de agregados, de fíler, de betume e de fibras para o fabrico da mistura betuminosa.

O passo seguinte consiste em aquecer o betume e os agregados/fíler para a temperatura de mistura definida de acordo com o tipo de betume. Relativamente às fibras celulósicas aglomeradas com adição de betume devem ser igualmente aquecidas para permitir uma melhor dispersão das fibras de acordo com o fabricante. Para tal, as fibras celulósicas aglomeradas devem ser misturadas antes do aquecimento dos agregados com a fração de agregados de menor dimensão, segundo a ordem que se apresenta na Figura 5.3.

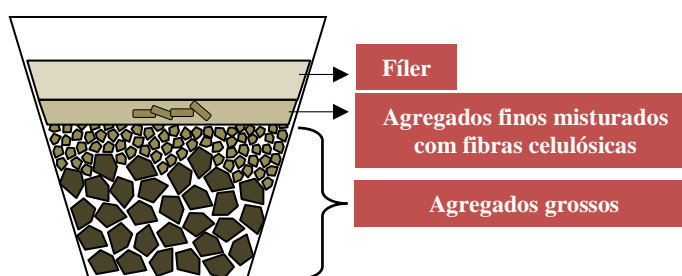


Figura 5.3 – Disposição dos materiais a utilizar no fabrico das misturas SMA considerando o aquecimento das fibras de acordo com o fabricante

A mistura das fibras com os agregados como representado na Figura 5.3 permite que as fibras sejam aquecidas sem estar em contacto directo com o ar evitando assim a sua possível destruição.

Após aquecido o conjunto de agregados/fíler e fibras e assegurada a homogeneização da temperatura de mistura, procede-se à sua colocação no recipiente da misturadora, misturando-o manualmente com o auxílio de uma pá para melhor distribuição da mistura de agregados/fíler com as fibras (à esquerda

na Figura 5.4). Seguidamente procede-se à adição do betume (à direita na Figura 5.4) na quantidade pré-definida e realiza-se a “amassadura” durante cerca de três minutos.



Figura 5.4 – Mistura do conjunto aquecido de agregados/filer e fibras no recipiente da misturadora (à esquerda) e adição de betume (à direita)

A mistura betuminosa fabricada é posteriormente colocada num molde de aço e compactada através da utilização de um compactador, como exemplo o compactador *Marshall*.

O procedimento por adição a frio, proposto para avaliação, é semelhante ao procedimento por adição a quente, porém as fibras celulósicas quando adicionadas estão à temperatura ambiente e a sua adição é realizada aquando da “amassadura” dos agregados/filer com o betume. A fase da “amassadura” dos agregados/filer com o betume é realizada durante um minuto, após o qual são adicionadas as fibras celulósicas, retomando-se a “amassadura” durante mais dois minutos, como se observa na Figura 5.5.



Figura 5.5 – Adição das fibras à temperatura ambiente à mistura betuminosa após “amassadura” durante um minuto

Para os dois métodos foi fabricada mistura SMA 12.0 e compactada através da utilização do compactador de impacto (50 pancadas em cada topo do provete), contemplado na norma EN 12697-30.

Para cada SMA foram utilizados três provetes considerando um percentagem de betume igual a 6,0 %. Os provetes foram posteriormente caracterizados relativamente à sua baridade, segundo a norma EN 12697-6 procedimento B (*bulk density – SSD*), e à baridade máxima teórica, segundo o procedimento indicado na norma EN 12697-5. Neste último caso, a determinação foi realizada depois dos ensaios segundo o método *Marshall*.

— Apresentação e análise de resultados —

No Quadro 5.2 são apresentados os resultados do ensaio *Marshall* e as características volumétricas dos provetes.

Quadro 5.2 – Resultados do ensaio *Marshall* e características volumétricas dos provetes (SMA 12.0) para os métodos de adição de fibras celulósicas a quente e a frio

Propriedade		Identificação da mistura betuminosa	
		SMA 12.0 6,0 %	
		Procedimento para adição das fibras celulósicas	
		A quente	A frio
Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)		2,440	2,442
Ensaio <i>Marshall</i>	Estabilidade, <i>S</i> (kN)	13,5	13,5
	Deformação, <i>F</i> (mm)	6,4	6,6
	Quociente <i>Marshall</i> , <i>Q</i> (kN/m)	2,2	2,1
Baridade máxima teórica, ρ_{mt} (Mg/m ³)		2,491	2,491
Porosidade, V_v (%)		2,0	2,0
Percentagem de vazios na mistura de agregados, <i>VMA</i> (%)		16,3	16,2
Percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume, <i>VFB</i> (%)		87,4	87,8

Da análise do Quadro 5.2 é possível observar que os provetes compactados segundo ambos os procedimentos (a quente e a frio) apresentaram um comportamento semelhante em termos do ensaio *Marshall*, assim como das características volumétricas dos provetes compactados, demonstrando que ambos os métodos permitem uma correta dispersão das fibras celulósicas aglomeradas com adição de betume na mistura SMA.

Porém, casos podem existir no método de adição a quente, em que as fibras se depositam no fundo do recipiente da misturadora durante a fase da “amassadura”. Tal situação promove uma redução da dispersão das fibras celulósicas na mistura SMA compactada, como se observa na Figura 5.6, onde são visíveis aglomerados de fibras por dispersar.



Figura 5.6 – Provette com aglomerados de fibras não dispersos na mistura SMA

A dispersão incompleta das fibras celulósicas aglomeradas que se observa na Figura 5.6, pode contribuir para uma diminuição da porosidade obtida, uma vez que as fibras ao não se dispersarem por completo, tendem a absorver uma menor percentagem de betume. Tal situação é evidente na Figura 5.6, onde é possível verificar vários aglomerados de fibras sem constatação de betume no seu interior, contribuindo, nomeadamente para:

- uma diminuição do efeito inibidor de escorrimento de material betuminoso promovido pelas fibras celulósicas e consequentemente a necessidade de se utilizar uma maior percentagem de fibras para mitigar o escorrimento e;
- uma provável diminuição da porosidade das misturas SMA resultante de um aumento da percentagem de “betume livre”.

Para evitar uma reduzida dispersão das fibras pode-se aumentar a duração da “amassadura” até um máximo de 5 minutos (limite definido na norma EN 12697-35). Em alternativa é possível proceder previamente à desagregação manual dos aglomerados de fibras celulósicas, nomeadamente com recurso a um almofariz, devendo as fibras desagregadas ser misturadas de acordo com os procedimentos indicados anteriormente.

No presente estudo adotou-se o procedimento proposto de adição a frio das fibras celulósicas, por se tratar em termos técnicos de um método mais simples de executar e que permite obter resultados semelhantes, em termos das características volumétricas dos provetes, comparativamente aos resultados obtidos com o método de adição a quente recomendado pelo fabricante de fibras celulósicas.

5.4 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO *MARSHALL*

A formulação de uma mistura betuminosa segundo o método *Marshall*, indicado na norma EN 12697-34, contempla a possibilidade de se utilizar diferentes energias de compactação, traduzidas através da variação do número de pancadas aplicadas em cada topo dos provetes que se compactam.

De acordo com a análise realizada no ponto 4.6 e compilada no Anexo I-K é possível observar que a compactação com o compactador *Marshall* é comumente efetuada utilizando 50 pancadas em cada topo do provete. As exceções são a Roménia, a Bulgária e Hong-Kong onde é especificado 75 pancadas em cada topo, sendo ainda recomendada na Nova Zelândia e Austrália essa energia de compactação, mas apenas para misturas SMA que sejam aplicadas em condições de tráfego elevado.

Apesar do número de pancadas aplicadas em cada topo do provete estar intimamente ligado com o nível de tráfego que é espectável que solicite a mistura betuminosa, no caso da República Checa e, como indicado no ponto 4.6, a utilização de uma maior energia de compactação poderá também dar uma boa indicação sobre qual o nível de *stone-on-stone* que a estrutura pétreia da mistura SMA formulada apresenta. Essa análise é realizada considerando a maior ou menor variação que ocorra na porosidade dos provetes compactados com 50 pancadas em cada topo, comparativamente aos provetes compactados com 100 pancadas em cada topo.

Com o intuito de compreender e contribuir para um aumento do conhecimento na formulação deste tipo de misturas betuminosas procedeu-se à avaliação da influência da energia de compactação nos provetes compactados segundo o método *Marshall*, nas propriedades *Marshall*, nas baridades e nas

características volumétricas da mistura SMA 12.O. A avaliação foi realizada para dois conjuntos de 20 provetes (quatro provetes por cada percentagem de betume) e utilizando 50 e 75 pancadas em cada topo dos provetes, respetivamente.

— Apresentação e análise de resultados —

Os provetes fabricados foram posteriormente avaliados, obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 5.3 e representados graficamente na Figura 5.7.

Quadro 5.3 – Resultados do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 12.O compactados com 50 e 75 pancadas

Propriedade		Identificação das misturas betuminosas									
		SMA 12.O 5,0 %		SMA 12.O 5,5 %		SMA 12.O 6,0 %		SMA12.O 6,5 %		SMA12.O 7,0 %	
		Número de pancadas									
		50	75	50	75	50	75	50	75	50	75
Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)		2,441	2,447	2,451	2,454	2,445	2,436	2,430	2,435	2,414	2,411
Ensaio <i>Marshall</i>	Estabilidade, <i>S</i> (kN)	17,9	17,7	15,9	18,5	12,8	14,6	13,0	14,2	12,7	12,2
	Deformação, <i>F</i> (mm)	7,0	4,0	5,1	5,0	5,8	5,3	6,2	5,2	9,5	5,4
	Quociente <i>Marshall</i> , <i>Q</i> (kN/m)	2,6	4,4	3,1	3,7	2,2	2,8	2,1	2,8	1,3	2,3
Baridade máxima teórica, ρ_{mt} (Mg/m ³)		2,539	2,544	2,531	2,474	2,491	2,450	2,475	2,445	2,479	2,428
Porosidade, V_v (%)		3,9	3,8	3,1	0,8	1,9	0,6	1,8	0,4	2,6	0,7
Percentagem de vazios na mistura de agregados, <i>VMA</i> (%)		15,7	15,7	16,2	13,9	16,1	14,8	17,1	15,8	19,0	17,1
Percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume, <i>VFB</i> (%)		75,5	75,7	80,6	94,1	88,5	96,1	89,5	97,3	86,3	95,8

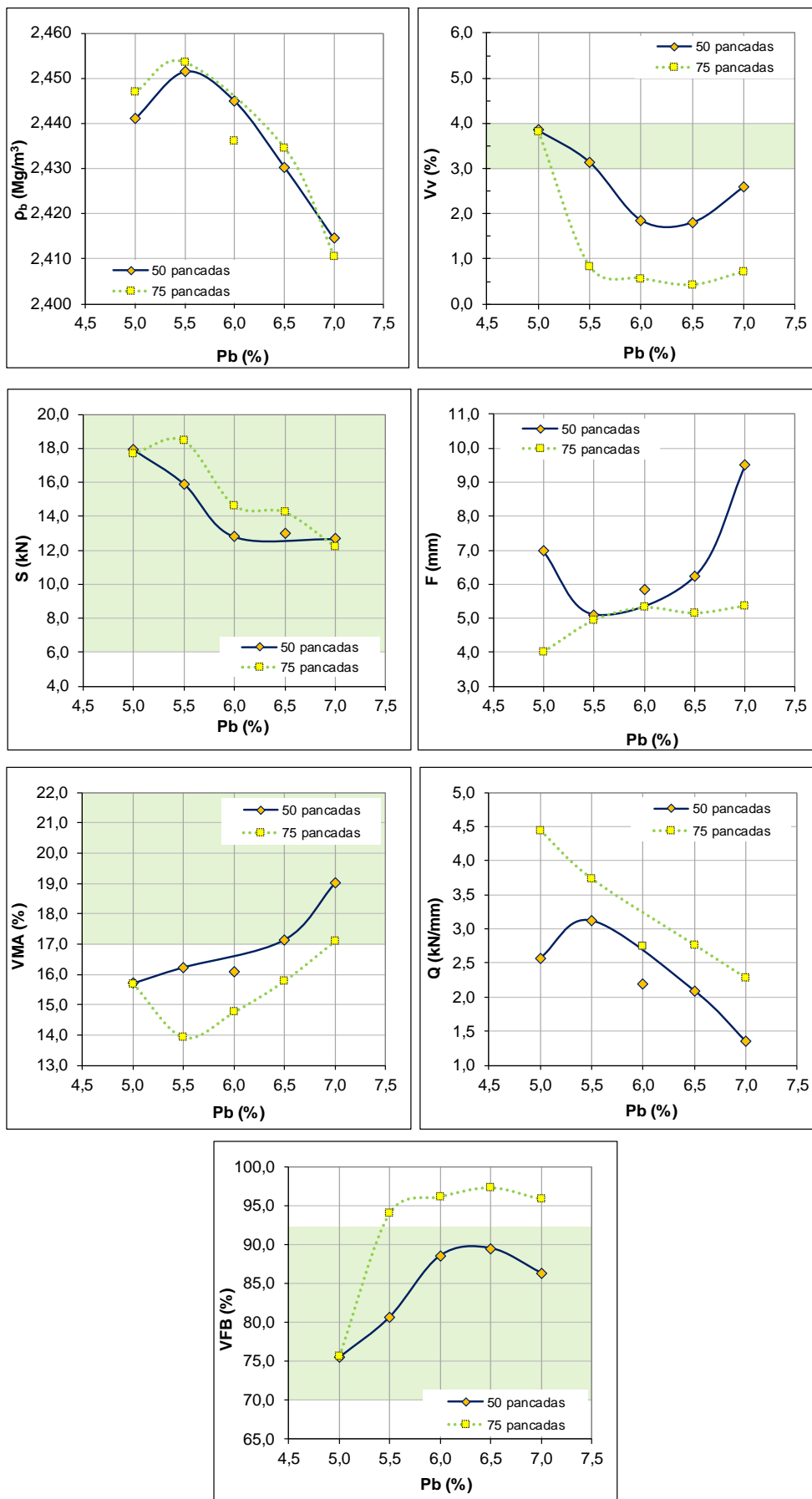


Figura 5.7 – Representação gráfica dos resultados do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 12.O compactados com 50 e 75 pancadas

A análise dos resultados relativos à influência da energia de compactação (Quadro 5.3 e Figura 5.7) evidencia um comportamento muito similar relativamente às baridades observadas nos provetes compactados para as duas energias de compactação (50 e 75 pancadas em cada topo do provete), evidenciando um adequado efeito de *stone-on-stone*.

Para a porosidade (V_v) e percentagem de vazios na mistura de agregados (VMA) observa-se para ambas as energias de compactação um valor semelhante para a percentagem de betume igual a 5,0 %, diminuindo os valores da V_v e da VMA de forma aproximadamente paralela para um aumento da energia de compactação dos provetes. Da mesma forma a percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume (VFB) aumenta de forma aproximadamente paralela, para um aumento da energia de compactação. Tais resultados estão intimamente relacionados com o facto de se ter observado uma diminuição da baridade máxima teórica com o aumento da energia de compactação, evidenciando o expectável adensamento da estrutura da mistura SMA resultante de uma maior quebra de agregado, que minimiza os vazios existentes na mistura betuminosa.

Ainda segundo os resultados obtidos é possível verificar um aumento geral da estabilidade e conseqüentemente uma diminuição da deformação dos provetes, o que conduz a um aumento do quociente *Marshall* para um aumento da energia de compactação.

Em suma, os resultados principalmente no que concerne à baridade parecem evidenciar a importância de se avaliar a baridade máxima teórica em amostras provenientes de provetes compactados, ao invés da utilização de misturas betuminosas não compactadas como indicado na norma EN 12697-5.

Para aferir a conclusão anterior, no Quadro 5.4 e na Figura 5.8 é apresentada a mesma análise anteriormente realizada, porém utilizando para ambos os casos (provetes compactados com 50 e 75 pancadas em cada topo do provete) a baridade máxima teórica obtida para os provetes compactados com 50 pancadas em cada topo do provete.

Quadro 5.4 – Resultados do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 12.O compactados com 50 e 75 pancadas considerando a mesma baridade máxima teórica

Propriedade		Identificação das misturas betuminosas									
		SMA 12.O 5,0 %		SMA 12.O 5,5 %		SMA 12.O 6,0 %		SMA12.O 6,5 %		SMA12.O 7,0 %	
		Número de pancadas									
		50	75	50	75	50	75	50	75	50	75
Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)		2,441	2,447	2,451	2,454	2,445	2,436	2,430	2,435	2,414	2,411
Ensaio <i>Marshall</i>	Estabilidade, S (kN)	17,9	17,7	15,9	18,5	12,8	14,6	13,0	14,2	12,7	12,2
	Deformação, F (mm)	7,0	4,0	5,1	5,0	5,8	5,3	6,2	5,2	9,5	5,4
	Quociente <i>Marshall</i> , Q (kN/m)	2,6	4,4	3,1	3,7	2,2	2,8	2,1	2,8	1,3	2,3
Baridade máxima teórica, ρ_{mt} (Mg/m ³)		2,539		2,531		2,491		2,475		2,479	
Porosidade, V_v (%)		3,9	3,6	3,1	3,1	1,9	2,2	1,8	1,6	2,6	2,8
Percentagem de vazios na mistura de agregados, VMA (%)		15,7	15,5	16,2	16,2	16,1	16,4	17,1	17,0	19,0	19,1
Percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume, VFB (%)		75,5	76,6	80,6	81,1	88,5	86,6	89,5	90,4	86,3	85,6

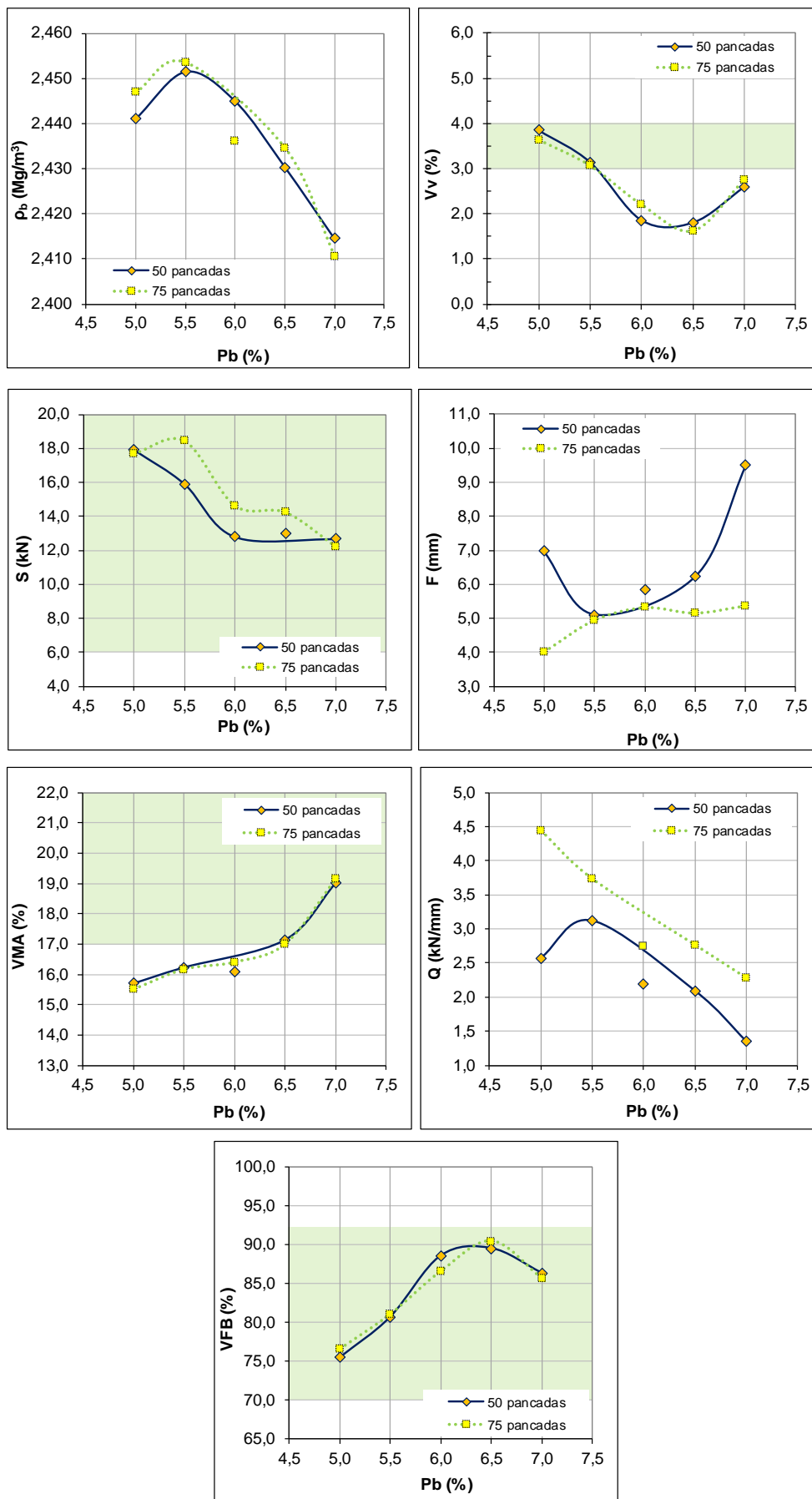


Figura 5.8 – Representação gráfica dos resultados do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 12.0 compactados com 50 e 75 pancadas considerando a mesma baridade máxima teórica

Segundo o Quadro 5.4 e Figura 5.8, verifica-se uma grande similaridade entre os resultados obtidos para os provetes compactados com 50 e 75 pancadas em cada topo do provete. Tais resultados parecem evidenciar:

- a eventual avaliação do efeito de *stone-on-stone*, com base na comparação da porosidade obtida nos provetes para diferentes energias de compactação, como adotado na República Checa poderá eventualmente fazer mais sentido se efetuada a análise comparativa das baridades para diferentes energias de compactação. De acordo com o Quadro 5.3 se considerada a utilização de diferentes baridades máximas teóricas, a SMA 12.O evidenciou um adensamento muito significativo para uma percentagem de betume igual ou superior a 5,5 %, traduzido por uma redução da porosidade. Porém, se apenas tivermos em consideração as baridades, observamos pequenas variações entre as duas energias de compactação, evidenciando uma estrutura pétreia com um efeito de *stone-on-stone*. Esta conclusão será posteriormente aferida no ponto 6.7, aquando da avaliação da resistência à deformação permanente da SMA 12.O.

5.5 AVALIAÇÃO DO ESCORRIMENTO DE MATERIAL BETUMINOSO

No presente ponto é abordada a avaliação do escorrimento de material betuminoso, tendo como base os métodos contemplados na norma EN 12697-18, com o objetivo não só de adquirir uma maior sensibilidade sobre o comportamento ao escorrimento nas misturas SMA, mas também de aferir qual o método de ensaio mais adequado para avaliar o escorrimento em misturas SMA com adição de fibras celulósicas. Posteriormente, será apresentada e proposta uma metodologia para avaliar o potencial de inibição do escorrimento de material betuminoso nas misturas SMA com aditivos estabilizantes.

O facto das misturas betuminosas habitualmente utilizadas em Portugal, não requererem a avaliação do escorrimento e, a ainda incipiente utilização de misturas SMA, conduz a que o conhecimento existente em Portugal sobre a aplicação da norma EN 12697-18 seja ainda relativamente reduzido. Nesse sentido, a avaliação do escorrimento de material betuminoso realizada no presente estudo, contempla a utilização dos dois métodos de ensaio apresentados na norma EN 12697-18, a saber: método do cesto (denominado na terminologia anglo-saxónica de *Basket method*) e o método do copo (denominado por *Schellenberg method*). A utilização dos dois métodos de ensaio preconizados na norma EN 12697-18 tem por base os seguintes pressupostos:

- a norma de produto EN 13108-5, que estabelece os requisitos a que as misturas SMA devem obedecer, remete para a norma EN 13108-20 no que concerne ao método a utilizar para a avaliação do escorrimento;
- a norma EN 13108-20, referente a ensaios tipo para validação das misturas betuminosas destinadas, nomeadamente, a estradas, remete por sua vez para a norma EN 12697-18, sem especificar qual o método de ensaio mais adequado para a avaliação do escorrimento em misturas SMA;
- a norma EN 12697-18, indica que o método do copo não se aplica a misturas betuminosas drenantes, não especificando, contudo, de forma concreta qual o método mais adequado para a avaliação do escorrimento em misturas SMA.

Assim apresenta-se no Quadro 5.5 uma análise comparativa dos dois métodos preconizados na norma EN 12697-18 para avaliação do escorrimento de material betuminoso nas misturas betuminosas, em termos de caracterização das amostras, condições e procedimento de ensaio.

Quadro 5.5 – Análise comparativa dos métodos de ensaio preconizados na norma EN 12697-18 para avaliação do escoamento de material betuminoso

Itens em comparação		Método do cesto (<i>Basket method</i>)	Método do copo (<i>Schellenberg method</i>)
Amostras	Tipo de amostras utilizadas	Amostras fabricadas em laboratório Amostras recolhidas em central	
	Tipo de mistura betuminosa a que se aplica o método	Sem restrições ¹⁾	Não se aplica a misturas betuminosas drenantes sem fibras
	Número de amostras necessárias para determinação do escoamento de material betuminoso	2 (mínimo)	
	Massa da amostra	1100 g de agregados + percentagem de betume e fibras pretendida	1000 g de agregados + percentagem de betume e fibras pretendida
	Tipo de amostra	Não compactada	
Condições de ensaio	Recipiente de ensaio	Cesto de forma cúbica, com lado de dimensão igual a 100 ± 2 mm, em rede metálica com aberturas circulares de diâmetro igual a 3,15 mm	Recipiente de vidro (copo) com capacidade de 800 ml e diâmetro de 100 mm
	Temperatura de ensaio	Betume convencional: temperatura de referência indicada na norma EN 12697-35 + 25 °C [i.e.: penetração $35/50 \times 10^{-1}$ mm (165 °C) e $50/70 \times 10^{-1}$ mm (150 °C)] Betume modificado: temperatura de "amassadura" recomendada pelo fabricante do betume + 15 °C	
	Duração do ensaio	3 horas \pm 15 minutos	60 minutos \pm 1 minuto
	Peneiração de material escoado após concluído o ensaio	Não	Sim, caso o material retido no copo seja > 0,5 % da massa inicial da amostra
	Percentagem de escoamento	Massa de ligante e/ou de mastique betuminoso depositada no tabuleiro	Massa de ligante e/ou de mastique betuminoso retida no copo, após ser virado com a base para cima durante 10 segundos

Legenda: 1) No caso de misturas betuminosas incorporando fibras ou no caso de misturas betuminosas cuja quantidade de mastique betuminoso seja superior ao habitualmente utilizado em misturas betuminosas drenantes poderá ocorrer o preenchimento das aberturas dos cestos, limitando o escoamento de material betuminoso

Da análise do Quadro 5.5 observam-se semelhanças entre ambos os métodos considerados na norma EN 12697-18 diferindo entre si, nos seguintes aspetos:

- o método do cesto é aplicável a qualquer tipo de mistura betuminosa, ao contrário do método do copo que não é aplicável a misturas betuminosas drenantes;
- no que concerne à quantidade de material necessário para proceder ao ensaio para avaliação do escoamento de material betuminoso, o método do cesto necessita de uma quantidade de massa ligeiramente superior (cerca de 100 g) para cada amostra relativamente ao método do copo;
- quanto à duração do ensaio ("tempo de escoamento"), a sua realização através do método do cesto é substancialmente superior, cerca de 2 horas, comparativamente ao método do copo, situação que poderá constituir uma desvantagem traduzida numa maior morosidade para obtenção dos resultados de ensaio, assim como num maior consumo energético para

realização do ensaio, uma vez que as temperaturas de ensaio (“temperatura de escoamento”) a utilizar são iguais para ambos os métodos preconizados na norma EN 12697-18;

- após submeter as amostras a um determinado “tempo de escoamento” em estufa, apenas para o método do copo é recomendada a realização de peneiração do material escoado nos casos em que se verifique que a massa de material retida no interior do copo, após ser virado com a base para cima durante 10 segundos, é superior a 0,5 % da massa inicial da amostra;
- segundo a norma EN 12697-18 o método do copo pretende avaliar o escoamento “apenas” de ligante, minimizando a existência de mastic betuminoso e/ou de partículas de agregado através da peneiração do material escoado. Porém, para os casos em que a massa de material retida no copo é inferior a 0,5 % da massa inicial da amostra, é igualmente possível a existência de mastic betuminoso e/ou de pequenas partículas de agregado no material escoado;
- no caso do método do cesto, de acordo com a norma EN 12697-18 é subentendido que se considera como material escoado todo o material de dimensão inferior a 3,15 mm. Deste modo o material escoado poderá ser constituído por ligante, filer, agregados finos e agregados grossos (agregados de dimensão superior a 2 mm);
- apesar da designação de *binder drainage* utilizada na norma EN 12697-18 para a avaliação do escoamento, recomenda-se a nível nacional a utilização da designação de ensaio para avaliação do escoamento de material betuminoso.

— Materiais utilizados e procedimentos de ensaio —

Para avaliação do escoamento foram utilizadas seis misturas SMA cujas principais características se apresentam no Quadro 5.6.

Quadro 5.6 – Misturas SMA utilizadas no presente estudo experimental e tipo de avaliação realizada

Percentagem de betume	Método de ensaio	Percentagem de fibras	Identificação das misturas SMA e natureza dos agregados						
			SMA 12			SMA 14-1			SMA 14-2
			O	B	C	O	D	E	
			Granodioritos			Basaltos			Granitos
5,5 ¹⁾	Cesto (Basket)	0,0	■						
		0,2	■						
		0,3	■						
		0,4	■						
	Copo (Schellenberg)	0,0	■						
		0,2	■						
		0,3	■						
		0,4	■						
5,8	Cesto (Basket)	0,4	■						
	Copo (Schellenberg)	0,0	■						
		0,2	■						
		0,3	■						
		0,4	■						
6,0 ²⁾	Cesto (Basket)	0,0							■
		0,2							■
		0,3							■
		0,4	■						■
	Copo (Schellenberg)	0,0				■			■
		0,2							■
		0,3							■
		0,4							■
		0,5				■			
6,5 ³⁾	Copo (Schellenberg)	0,0		■	■			■	
		0,4		■	■				
		0,5		■	■			■	
		0,6						■	
7,0	Copo (Schellenberg)	0,0					■		
		0,5					■		
		0,6					■		

Legenda: 1) Percentagem ótima de betume da SMA 12.O; 2) Percentagem ótima de betume da SMA 14-1.O e SMA 14-2; 3) Percentagem ótima de betume da SMA 12.B, SMA 12.C e SMA 14-1.E

A avaliação do escoamento das misturas SMA foi, como referido anteriormente, baseada no ensaio do cesto (*basket method*) e no ensaio do copo (*Schellenberg method*), de acordo com o procedimento indicado na norma EN 12697-18. Os ensaios foram realizados para três misturas SMA 12 e três misturas SMA 14 a uma temperatura constante de 180 °C no caso das SMA 12 e de 185 °C no caso das misturas SMA 14.

Como apresentado no Quadro 5.6, para além de se terem realizado ensaios de escoamento sobre misturas SMA fabricadas com a percentagem ótima em betume, optou-se por se realizarem ensaios sobre misturas SMA com um acréscimo em betume relativamente à percentagem ótima de 0,3 % e de 0,5 %, valores estes correspondentes, respetivamente, à tolerância em percentagem absoluta para a avaliação da conformidade da produção indicada na norma EN 13108-21 para o desvio médio permitido em relação ao valor teórico da percentagem ótima de betume e à variação da percentagem de betume usualmente considerada nos estudos de formulação.

No presente estudo é, adicionalmente, proposto o conceito de *inibição do escorrimento* que pretende avaliar o potencial de escorrimento numa SMA, o qual é determinado através da equação (5.1):

$$I_e = \frac{D_n}{D_i} \quad (5.1)$$

sendo:

I_e – inibição do escorrimento de material betuminoso (%);

D_n – material escorrido no copo para determinada percentagem de aditivo estabilizante na SMA (%);

D_i – material escorrimento no copo sem utilização de aditivos estabilizantes na SMA (%).

O conceito *inibição do escorrimento* pretende contribuir para estimar o intervalo espectável para a percentagem de aditivo estabilizante a utilizar numa mistura SMA, em função do tipo de aditivo utilizado. Este conceito apresenta as seguintes vantagens:

- disponibilizar aos donos de obra informação útil de referência quanto ao intervalo espectável de percentagem a utilizar de determinado tipo de aditivo estabilizante, para mitigar o escorrimento de material betuminoso nas misturas SMA, procurando equilibrar o binómio “bom desempenho ao escorrimento nas misturas SMA, onde os aditivos estabilizantes são utilizados e o real custo de fornecimento dos materiais”, otimizando os custos das obras e minimizando os impactes ambientais decorrentes do potencial incremento de degradação prematura das SMA;
- disponibilizar aos projetistas e construtores informação útil para a seleção dos aditivos estabilizantes a especificar e a utilizar em obra.

A avaliação do conceito de inibição de escorrimento será efetuada apenas para o aditivo utilizado no presente estudo (fibras celulósicas aglomeradas com betume). Porém, considera-se que o conceito proposto deve ser alvo de estudos adicionais para aplicação a diferentes tipos de aditivos estabilizantes. Tal terá como intuito permitir a nível nacional um leque mais abrangente de aditivos disponíveis para mitigar o escorrimento nas misturas SMA. No presente estudo para avaliar o conceito de *inibição do escorrimento*, foram realizados ensaios sobre misturas SMA de controlo, fabricadas com diversas percentagens de betume, mas sem qualquer adição de fibras celulósicas.

— Apresentação e análise dos resultados —

O resultado da avaliação do escorrimento consiste na percentagem de material betuminoso escorrido da mistura betuminosa para o tabuleiro (método de cesto) ou retido no copo, consoante o método de ensaio utilizado. No Quadro 5.7 são apresentados os resultados dos ensaios, assim como uma análise da inibição do escorrimento com a adição de fibras celulósicas.

No Quadro 5.7 são apresentados os resultados decorrentes da avaliação do escorrimento de material betuminoso para misturas do tipo SMA 12 e SMA 14. Para efeitos comparativos, na Figura 5.9 e Figura 5.10 é efetuada uma representação gráfica dos resultados dos ensaios através do método do copo e do cesto (SMA 12.O e SMA 14-2). A Figura 5.9 é complementada com os resultados do

escorrimento obtidos para um acréscimo de 0,3 % e de 0,5 % de betume relativamente à percentagem ótima de betume aplicada na mistura SMA 12 para o método do copo e do cesto, respetivamente.

Quadro 5.7 – Resultados do escorrimento de material betuminoso (misturas do tipo SMA 12 e SMA 14)

Identificação das misturas ensaiadas	Tipo de mistura SMA	P _b (%)	Método de ensaio	% de fibras	Material escorrido (%)	P _{fibras} mínima necessário para garantir ¹⁾		Inibição do escorrimento (%)	
						D ≤ 0,3	D ≤ 0,2		
SMA12.O-B5,5-MC	SMA 12	5,5 (P _{b,ótima})	Cesto (Basket)	0	0	0	0	n.a.	
				0,2	0			-	
				0,3	0			-	
				0,4	0			-	
SMA12.O-B5,5-MS		Copo (Schellenberg)	0	0,59	0,13	0,17	n.a.		
			0,2	0,14			76		
			0,3	0,11			81		
SMA12.O-B5,8-MC		5,8 (P _{b,ótima} + 0,3%)	Cesto (Basket)	0,4	0	-	-	-	
				0	0,80	0,18	0,28	n.a.	
				0,2	0,25			69	
				0,3	0,19			76	
SMA12.O-B5,8-MS		Copo (Schellenberg)	0,4	0,12	-	-	85		
	0,4		0	-	-	-			
	0		2,03	0,47	0,51	n.a.			
0,4	0,46	77							
0,5	0,22	89							
SMA12.O-B6,0-MC	6,0 (P _{b,ótima} + 0,5%)	Cesto (Basket)	0,4	0	-	-	-		
			0	2,71	0,47	0,52	n.a.		
			0,4	0,46			83		
0,5	0,24	91							
SMA12.B-B6,5-MS	6,5 (P _{b,ótima})	Copo (Schellenberg)	0	2,03	0,47	0,51	n.a.		
			0,4	0,46			77		
SMA12.C-B6,5-MS		Copo (Schellenberg)	0	2,71	0,47	0,52	n.a.		
			0,4	0,46			83		
			0,5	0,24			91		
SMA14-1.O-B6,0-MS		SMA 14	6,0 (P _{b,ótima})	Copo (Schellenberg)	0	4,05	0,48	0,49	n.a.
					0,5	0,14			97
SMA14-1.E-B6,5-MS			6,5 (P _{b,ótima})	Copo (Schellenberg)	0	2,20	0,55	0,60	n.a.
					0,5	0,40			82
					0,6	0,20			91
SMA14-1.D-B7,0-MS			7,0 (P _{b,ótima} + 0,5%)	Copo (Schellenberg)	0,0	5,54	0,61	0,66	n.a.
					0,5	0,55			90
	0,6				0,33	94			
SMA14-2-B6,0-MC	6,0 (P _{b,ótima})		Cesto (Basket)	0	3,80	0,18	0,19	n.a.	
				0,2	0			100	
				0,3	0			100	
				0,4	0			100	
SMA14-2-B6,0-MS	Copo (Schellenberg)	0	3,23	0,33	0,39	n.a.			
		0,2	0,76			76			
		0,3	0,36			89			
		0,4	0,18			94			

Legenda: 1) Valor estimado; P_b – Percentagem de betume; P_{b,ótima} – Percentagem ótima de betume; P_{fibras} – Percentagem de fibras; D – Escorrimento, em percentagem; n.a. – não aplicável

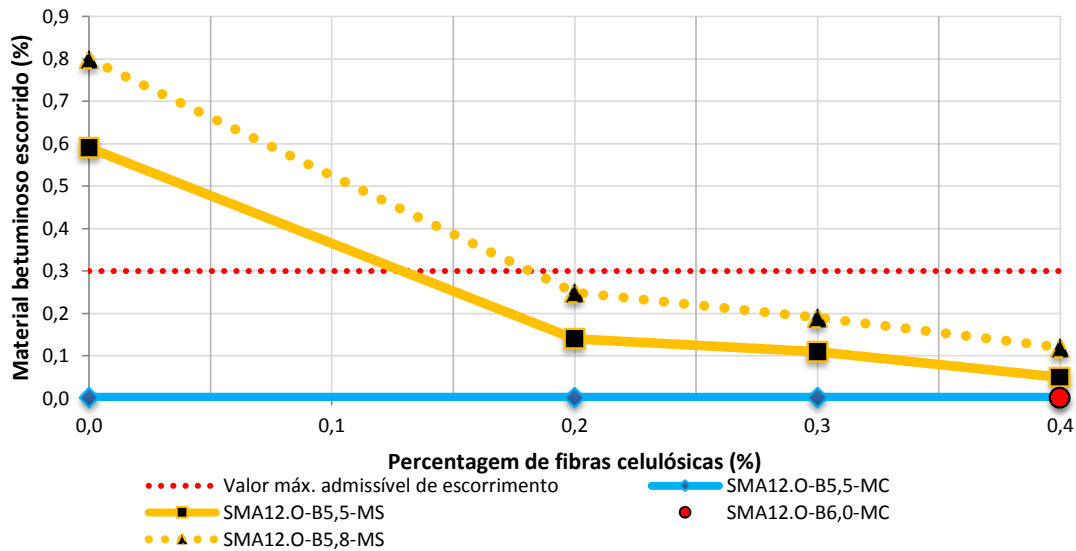


Figura 5.9 – Percentagem de material escorrido em função da percentagem de fibras celulósicas utilizada (SMA 12.O)

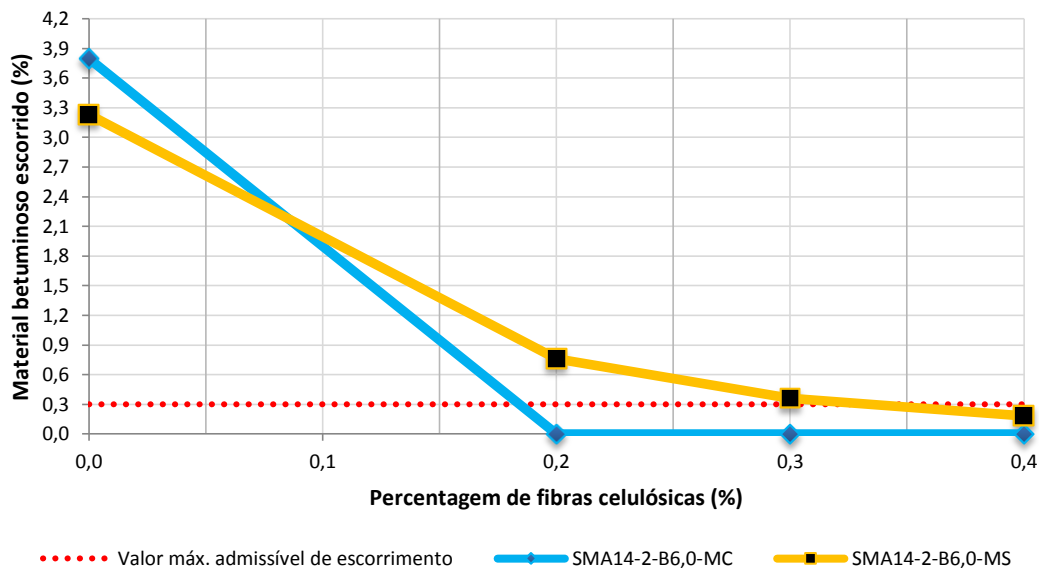


Figura 5.10 – Percentagem de material escorrido em função da percentagem de fibras celulósicas utilizada (SMA 14-2)

De acordo com a Figura 5.9 e Figura 5.10 é possível constatar, que o método do copo (*Schellenberg*) tende a apresentar, para a SMA 12.O e SMA 14-2, uma diminuição gradual do escorrimento em função da utilização de uma maior percentagem de fibras celulósicas. No caso do método do cesto, para ambas as misturas SMA, não é possível concluir de forma evidente uma tendência na variação da percentagem de escorrimento, uma vez que, nos ensaios efetuados sobre a mistura SMA 12.O, o escorrimento é nulo independentemente da percentagem de fibras celulósicas utilizada. Para a SMA 14-2, a variação da percentagem de material escorrido tende a ser semelhante à que é observada com o método do copo.

Ainda segundo a Figura 5.9 e Figura 5.10, o método do copo tende a apresentar valores de escorrimento superiores aos obtidos através do método do cesto, à exceção da mistura SMA 14-2 com 0 % de fibras onde o valor de escorrimento é superior ao observado pelo método do copo.

Quando considerada a percentagem mínima de fibras celulósicas necessária para garantir que as misturas SMA 12.O e SMA 14-2 apresentaram um escorrimento igual ou inferior a 0,3 %, relativamente à massa total da mistura betuminosa (valor usualmente utilizado a nível internacional, como constatado no ponto 4.6), é aferido no Quadro 5.7 que o método do copo requer a utilização de uma maior percentagem de fibras comparativamente ao método do cesto.

Adicionalmente, na Figura 5.9 é possível constatar uma elevada sensibilidade do método do copo ao escorrimento. Quando acrescido 0,3 % de betume à percentagem ótima de betume para a mistura SMA 12.O com 0 % de fibras, obtém-se um acréscimo de 0,21 % do escorrimento relativamente ao escorrimento observado para a mesma SMA com 0 % de fibras e percentagem ótima de betume.

No que concerne ao método do cesto, segundo o Quadro 5.7 e Figura 5.9, para a mistura a SMA 12.O com 0,4 % de fibras, verificou-se que mesmo após acrescentado 0,3 % e 0,5 % de betume relativamente à percentagem ótima de betume, o escorrimento observado manteve-se inalterado com 0 % de escorrimento. Tal poderá indicar que os orifícios do cesto poderão ficar colmatados com as fibras existentes no mastique betuminoso e/ou por agregados grossos impossibilitando o adequado escorrimento de material betuminoso nas misturas SMA.

Dos dois métodos de ensaio analisados, o método do copo comparativamente ao método do cesto, tende a ser: mais condicionante, requerendo uma maior percentagem de fibras celulósicas para o fabrico das misturas SMA analisadas; e a ser mais sensível à variação da percentagem de betume e/ou de fibras celulósicas utilizadas.

Assim, representam-se na Figura 5.11 os resultados apresentados no Quadro 5.7 referentes ao escorrimento de material betuminoso para as diversas misturas SMA segundo o método do copo.

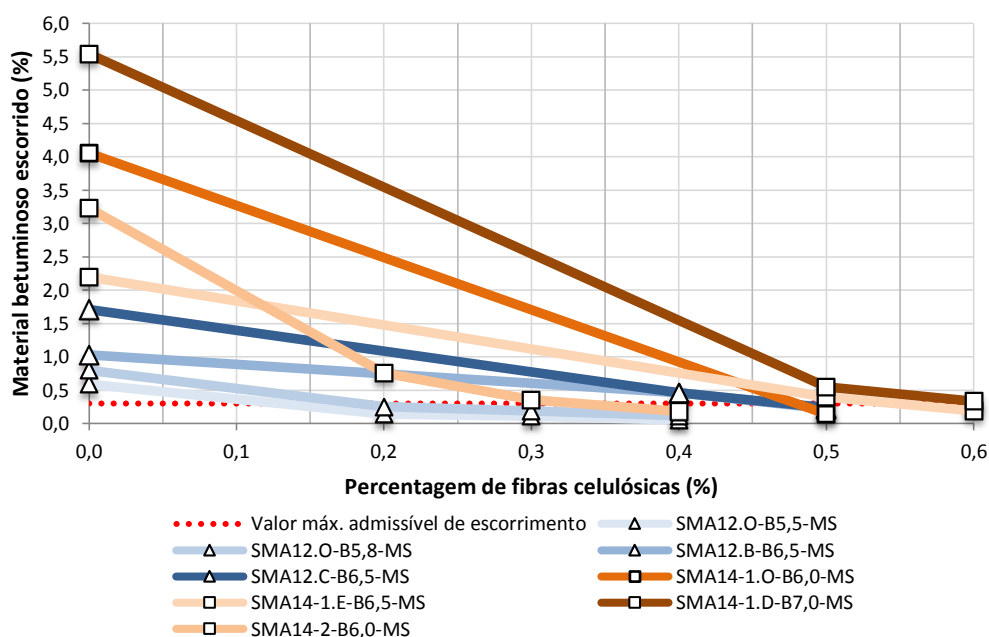


Figura 5.11 – Percentagem de material escorrido em função da percentagem de fibras celulósicas utilizada segundo o método do copo

Tendo em consideração a Figura 5.11 observa-se que o escorrimento de material betuminoso para 0 % de fibras tende a ser superior para as misturas do tipo SMA 14 comparativamente às misturas do tipo SMA 12, independentemente da percentagem de betume ou granulometria definida. Tal poderá ser resultante, nomeadamente, da utilização de agregados com maior dimensão nominal (menor superfície específica). Não é evidente segundo a Figura 5.11 que a utilização de uma curva granulométrica mais descontínua ou a utilização de uma maior percentagem de betume corresponda a um maior escorrimento de material betuminoso, para 0 % de fibras pelo menos para o caso das misturas do tipo SMA 14.

Quando considera a adição de fibras celulósicas, verifica-se que no Quadro 5.7, assim como na Figura 5.11, independentemente do tipo de SMA analisada, um aumento da percentagem de fibras celulósicas utilizadas nas misturas SMA tende a promover uma diminuição do material betuminoso escorrido. Essa diminuição pode ser traduzida numa inibição do escorrimento promovida pelas fibras celulósicas (Figura 5.12). O conceito de *inibição do escorrimento* é proposto no presente estudo de acordo com a equação (5.1), como sendo a redução percentual do escorrimento relativamente ao valor de escorrimento observado inicialmente sem utilização de aditivos estabilizantes.

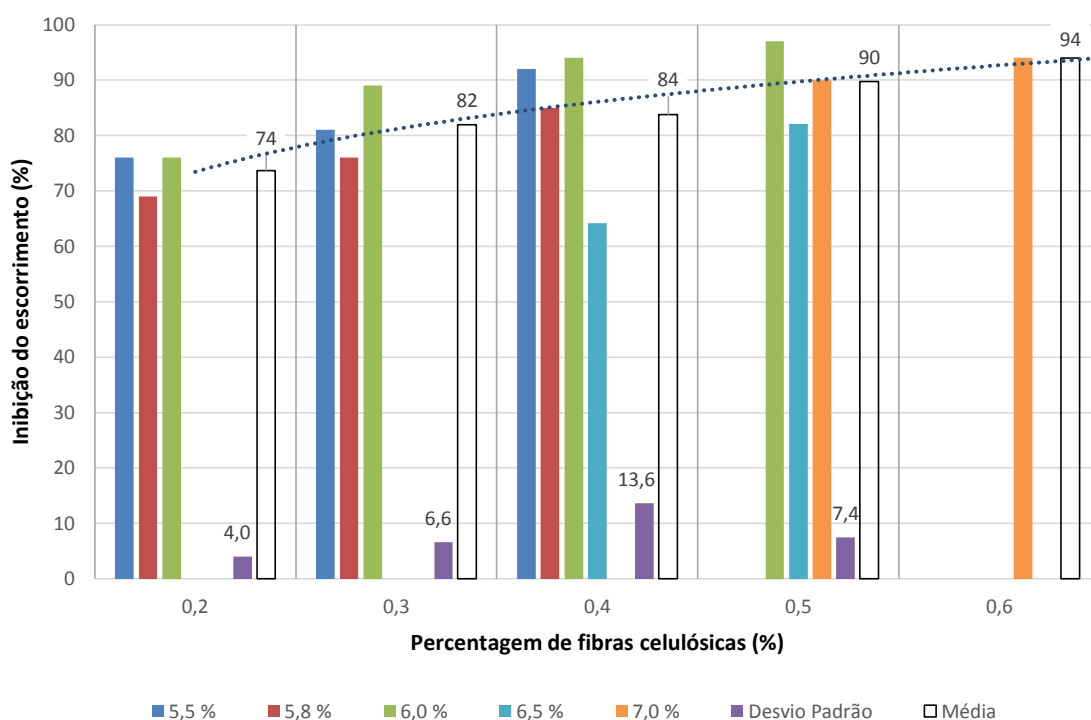


Figura 5.12 – Inibição do escorrimento nas misturas SMA com fibras celulósicas segundo o método do copo

De acordo com a Figura 5.12 é possível observar um aumento da inibição do escorrimento para um aumento da percentagem de fibras celulósicas. É ainda possível constatar a existência de diferentes patamares de inibição do escorrimento os quais são relativamente constantes, função da percentagem de fibras utilizada, independentemente da percentagem de betume utilizada e do tipo de mistura SMA escolhida.

Simultaneamente, verifica-se que a inibição do escorrimento ocorre em grande parte até uma percentagem de 0,2 % de fibras celulósicas (cerca de 74 % do material escorrido inicialmente), aumentando posteriormente cerca de 5 % para cada incremento de 0,1 % de fibras celulósicas.

Os resultados apresentados na Figura 5.12 permitem uma melhor compreensão do motivo pelo qual é habitualmente recomendada uma percentagem mínima de fibras celulósicas igual a 0,3 % (como constatado no ponto 3.6.3), percentagem para a qual se verificou uma inibição do escorrimento de aproximadamente 80 %. De igual forma os resultados obtidos evidenciaram uma inibição do escorrimento em média igual ou superior a 90 % para uma percentagem de fibras igual ou superior a 0,5 %. Por esse motivo é espectável que:

- o objetivo de mitigar o escorrimento seja alcançado habitualmente para uma percentagem de fibras celulósicas compreendida entre 0,3 % e 0,6 % à semelhança do que é especificado na Finlândia e na Rússia (0,3 % a 0,5 %, ver ponto 3.6.3);
- a obtenção de uma percentagem ótima de fibras celulósicas referida no ponto 3.6.2 que vise a melhoria do comportamento da SMA adicionalmente à mitigação do escorrimento deverá ocorrer tendencialmente para uma percentagem de fibras superior a 0,6 %.

Analisando as conclusões obtidas verifica-se que numa fase inicial sem utilização de aditivos estabilizantes, a magnitude do escorrimento numa SMA depende como espectável da percentagem de betume utilizada, sendo também influenciado pela dimensão máxima nominal do agregado e pela granulometria da utilizada na SMA. No Quadro 5.7 são apresentados os valores estimados para a percentagem mínima de fibras celulósicas a utilizar, de modo a se assegurar um escorrimento igual ou inferior a 0,2 % e a 0,3 %, sendo efetuada na Figura 5.13 a sua representação, função da percentagem de betume utilizada na mistura SMA. Adicionalmente na Figura 5.13 representa-se a verde o intervalo da percentagem de betume considerando a percentagem mínima de betume recomendada (5,5 %) no Quadro 3.15.

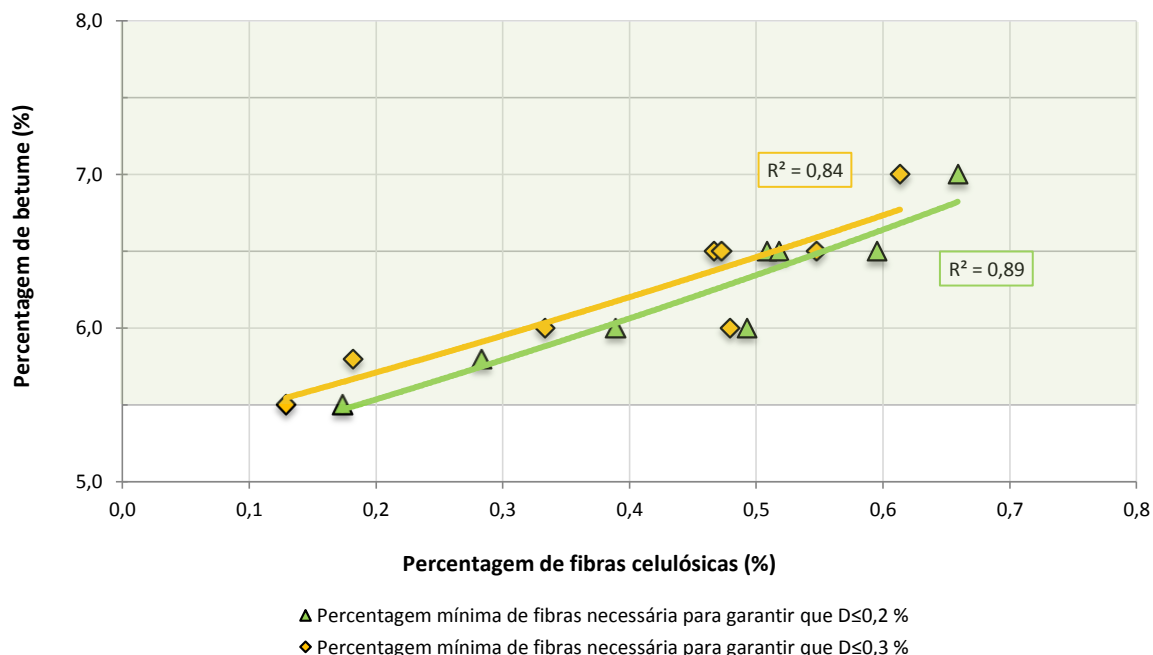


Figura 5.13 – Percentagem mínima de fibras celulósicas a utilizar para se assegurar um $D \leq 0,2\%$ e $D \leq 0,3\%$

De acordo com a Figura 5.13 é possível observar um comportamento com um coeficiente de correlação de cerca de 89 % e 84 %, para a percentagem mínima de fibras celulósicas a utilizar, para assegurar um escorrimento de $D \leq 0,2\%$ e $D \leq 0,3\%$, respetivamente, relativamente à percentagem de betume utilizada numa mistura SMA. Notar que, se não fosse considerada a mistura SMA14-1.0-B6,0-MS os

coeficientes de correlação seriam de 97 % e 96 %, para a percentagem mínima de fibras celulósicas a utilizar, para assegurar um escorrimento de $D \leq 0,2 \%$ e $D \leq 0,3 \%$, respetivamente. Todavia, a consideração dos resultados obtidos para a mistura SMA14-1.O-B6,0-MS, permite obter valores mais conservativos para a percentagem de fibras celulósicas a adotar na mistura SMA.

As conclusões anteriormente obtidas permitem propor a seguinte equação para estimar a percentagem mínima de fibras celulósicas a utilizar numa mistura SMA:

$$P_{fibras} = a \cdot [\ln(P_b) - b] \quad (5.2)$$

sendo:

P_{fibras} - percentagem mínima de fibras celulósicas a utilizar para assegurar um escorrimento de material betuminoso $\leq 0,3 \%$ (%);

a - igual a 2,4278 (para escorrimento $\leq 0,3 \%$) e 2,1993 (para escorrimento $\leq 0,2 \%$);

b - igual a 1,6599 (para escorrimento $\leq 0,3 \%$) e 1,6202 (para escorrimento $\leq 0,2 \%$);

P_b - percentagem de betume a utilizar na mistura SMA (%).

5.6 AVALIAÇÃO DA PERCENTAGEM DE BETUME/LIGANTE BETUMINOSO E GRANULOMETRIA

O método de avaliação da percentagem de betume carece de particular importância no âmbito do estudo das misturas SMA, uma vez que as mesmas incorporam frequentemente fibras celulósicas na sua composição, as quais não se dissolvem no betume durante o fabrico da mistura betuminosa. Como tal, é possível que a utilização de fibras celulósicas requeira que, a determinação com precisão da percentagem de betume/ligante betuminoso seja realizada através do método de incineração, à semelhança do que sucede para as misturas com betumes modificados com borracha proveniente da reciclagem de pneus. Esta situação ocorre, uma vez que as partículas de borracha por um lado absorvem betume que não é possível de extrair e, por outro lado permanecem junto dos agregados após a lavagem da mistura betuminosa com um solvente utilizado no método de extração do betume por centrifugação.

Assim no presente estudo, para se avaliar qual o método de ensaio mais adequado para a determinação da percentagem de betume/ligante betuminoso foram utilizados os métodos de avaliação por centrifugação e por incineração segundo as normas EN 12697-1 e EN 12697-39, respetivamente.

Para a presente avaliação foram utilizadas amostras de mistura betuminosa não compactada e compactada recolhidas no trecho experimental realizado no LNEC (para maior detalhe ver ponto 6.4) e do parque industrial da TEXSA (ver ponto 6.5), assim como amostras provenientes de provetes fabricados e compactados em laboratório. As misturas que foram utilizadas correspondem à SMA12.O e à SMA14-1.O, para as quais se utilizou diferentes percentagens de betume e de fibras.

— Apresentação e análise de resultados —

No Quadro 5.8 são apresentados os resultados obtidos para a determinação da percentagem de betume/ligante betuminoso nas amostras de SMA, segundo o método de avaliação por centrifugação e por incineração, respetivamente.

Quadro 5.8 – Resultados da percentagem de betume/ligante betuminoso das amostras (SMA 12.O e SMA 14-1.O)

Identificação das amostras	Proveniência	Método de ensaio	Percentagem de fibras celulósicas utilizada, (%)	Percentagem de betume, P_b (%)	Percentagem de material incinerado (ligante betuminoso) ou de betume por centrifugação (%)
SMA12.O-P1 ¹⁾	Trecho experimental	Incineração	0,4	5,5	6,0
SMA12.O-P2		Incineração	0,4	5,5	5,2
SMA12.O-P3		Incineração	0,4	5,5	5,6
SMA 14-1.O-P1	TEXSA	Incineração	0,5	6,0	7,6
SMA 12.O-P5	Laboratório	Incineração	0,0	5,5	5,5
SMA 12.O-P6		Incineração	0,0	5,5	5,5
SMA 12.O-P7		Incineração	0,4	5,5	5,9
SMA 12.O-P8		Incineração	0,4	6,0	6,3
SMA 12.O-P9		Incineração	0,4	5,5	5,9
SMA 12.O-P10		Centrifugação	0,0	5,5	5,5
SMA 12.O-P11		Centrifugação	0,4	5,5	5,4
SMA 14-1.O-P2		Incineração	0,5	6,0	5,9

Legenda: 1) amostra de SMA não compactada recolhida diretamente da pavimentadora

Da análise dos resultados do Quadro 5.8 verifica-se que a percentagem de betume/ligante betuminoso determinada nas amostras aponta valores na ordem de grandeza do que foi utilizado para cada amostra para a mistura SMA 12.O. No caso específico da SMA14-1.O observou-se alguma discrepância entre os valores aplicados no fabrico das misturas e os obtidos através do método de incineração.

Ao contrário do que ocorre com os betumes modificados com borracha, não se observou para o método de extração por centrifugação, uma diminuição significativa da percentagem de betume, como resultado da absorção de betume pelas fibras celulósicas que permanecem junto com os agregados após lavagem da mistura betuminosa com um solvente.

Na Figura 5.14 é possível observar uma aparente ausência de betume em torno das fibras celulósicas após a centrifugação, perceptível na sua fácil desagregação quando manipuladas com as mãos.



Figura 5.14 – Exemplos do aspeto das fibras celulósicas após extração do betume por centrifugação

De acordo com a Figura 5.14, verifica-se ser mais fácil a extração do betume nas fibras celulósicas comparativamente à borracha proveniente da reciclagem de pneus, onde segundo Mathias *et al.* (2003) as partículas de borracha podem absorver até cinco vezes o seu tamanho original quando misturadas com betume.

Assim, de acordo com os resultados obtidos no Quadro 5.8, é possível constatar ser possível a determinação da percentagem de betume em misturas SMA com fibras celulósicas através do método por centrifugação e de ligante betuminoso por incineração. Contudo, se posteriormente se pretender determinar a granulometria por peneiração, é recomendável que seja utilizado o método por incineração de modo a evitar a existência de fibras retidas nos peneiros durante a peneiração e consequente alteração dos resultados obtidos. Outra possibilidade pode passar pelo desenvolvimento de um sistema de peneiração por jato de ar à semelhança do que é utilizado nos betões de cimento para se remover as fibras existentes na mistura de agregados resultantes da centrifugação.

Se se pretender determinar individualmente a percentagem de betume e de fibras, recomenda-se que seja utilizado o método de extração por centrifugação para determinação da percentagem de betume, em complemento do método por incineração que apenas permite a obtenção da percentagem de ligante betuminoso (betume e fibras celulósicas).

— Avaliação da granulometria e quebra das partículas ativas —

As misturas de agregados (P1, P2) obtidas após incineração das amostras de mistura SMA 12.O recolhidas no trecho experimental e da SMA 14-1.O-P1 recolhida na TEXSA foram submetidas à avaliação da granulometria de acordo com a norma EN 933-1. As curvas granulométricas obtidas para cada uma das amostras de SMA (mistura betuminosa não compactada e compactada), bem como o

fuso granulométrico preconizado nas especificações aplicadas para cada obra apresentam-se no Quadro 5.9 e na Figura 5.15 para a SMA 12.O e no Quadro 5.10 e Figura 5.16 para a SMA 14-1.O.

No caso das amostras de SMA compactadas e recolhidas do trecho experimental (efetuado no LNEC) e na TEXSA, utilizou-se somente os núcleos das lajetas sem que os topos das mesmas tenham sido utilizados para minimizar alterações da granulometria resultante do corte dos provetes prismáticos aquando da recolha do pavimento.

Quadro 5.9 – Composição granulométrica das amostras de mistura SMA 12.O e respetivo fuso e curva granulométrica especificados no estudo de formulação

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (série "base+2") (mm)	Percentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)			
	Fuso granulométrico SMA 12.O	Curva granulométrica SMA 12.O	Após incineração	
			SMA12.O-P1 ¹⁾	SMA12.O-P2 ²⁾
18	100	100	100	100
12,5	90 – 100	100	100	100
10	75 – 97	87	93	93
8	-	65	75	71
6,3	-	46	55	51
4	24 – 38	38	41	40
2	20 – 32	30	31	32
1	-	21	22	23
0,500	11 – 23	16	15	16
0,250	-	13	11	11
0,125	-	9	7	7
0,063	7,0 – 9,0	7,3	4,3	4,3
Acréscimo de partículas passadas no peneiro de referência 4 mm (%)		0	3,2	2,3
Acréscimo estimado de partículas passadas no peneiro de referência 4,75 mm (%)		0	5,0	3,0

Legenda: 1) amostra de mistura SMA 12.O não compactada recolhida diretamente da pavimentadora;
2) amostra de mistura SMA 12.O compactada recolhida do trecho experimental

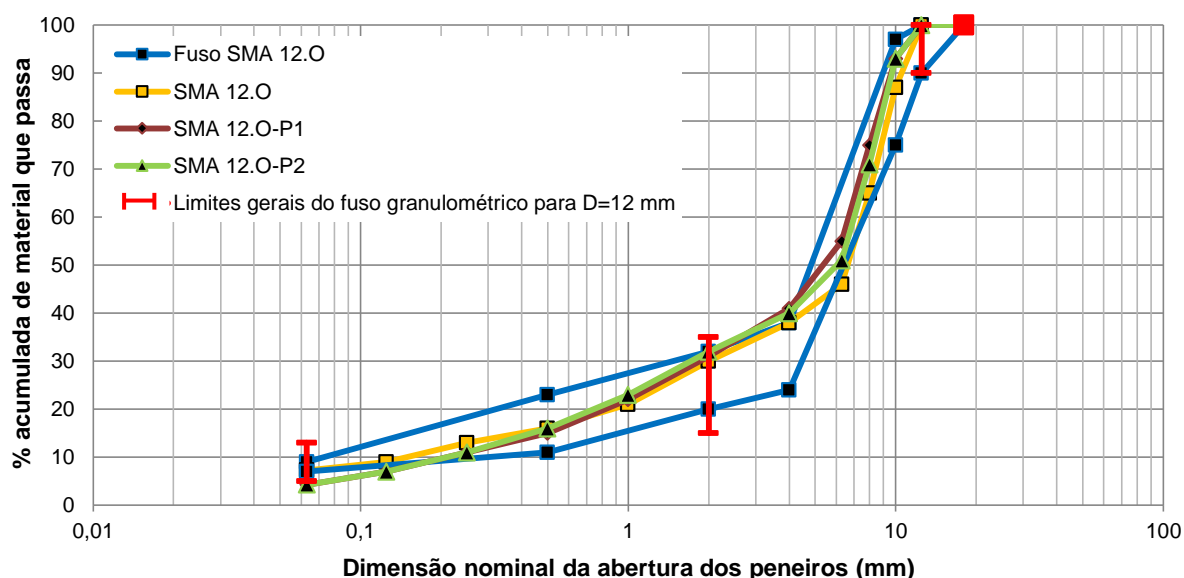


Figura 5.15 – Curvas granulométricas das amostras de mistura SMA 12.O recolhida na pavimentadora e no trecho experimental e respetivo fuso granulométrico especificado

Da análise do Quadro 5.9 e da Figura 5.15, verifica-se que as curvas granulométricas de agregados se enquadram de forma adequada no fuso granulométrico definido, exceto para a abertura dos peneiros de dimensão nominal de 4 mm e 0,063 mm. Para estes peneiros verifica-se um aumento e uma diminuição, respetivamente, da percentagem de material passado, traduzindo um decréscimo da percentagem de partículas ativas e de filer. Tal contribui para uma diminuição da descontinuidade da mistura betuminosa (redução do volume de vazios entre as partículas ativas) e para um possível aumento da porosidade resultante da combinação de uma menor percentagem de filer e uma maior percentagem de partículas passivas.

Quadro 5.10 – Composição granulométrica da amostra de mistura SMA 14-1.O e respetivo fuso e curva granulométrica especificados no estudo de formulação

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (série “base+2”) (mm)	Percentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)		
	Fuso granulométrico SMA 14-1.O	Curva granulométrica SMA 14-1.O	Após incineração
			SMA 14-1.O-P1 ¹⁾
20	100	100	100
16	-	99	99
14	90 - 100	91	92
12,5	-	78	81
10	40 - 65	59	63
8	-	48	54
6,3	20 - 40	39	41
4	-	27	31
2	15 - 30	23	23
1	-	19	18
0,500	-	16	15
0,250	-	14	13
0,125	-	11	12
0,063	8,0 - 12,0	8,9	9,2
Acréscimo de partículas passadas no peneiro de referência 4 mm (%)		0	4,0
Acréscimo estimado de partículas passadas no peneiro de referência 4,75 mm (%)		0	3,0

Legenda: 1) amostra de mistura SMA 14-1.O compactada recolhida na TEXSA

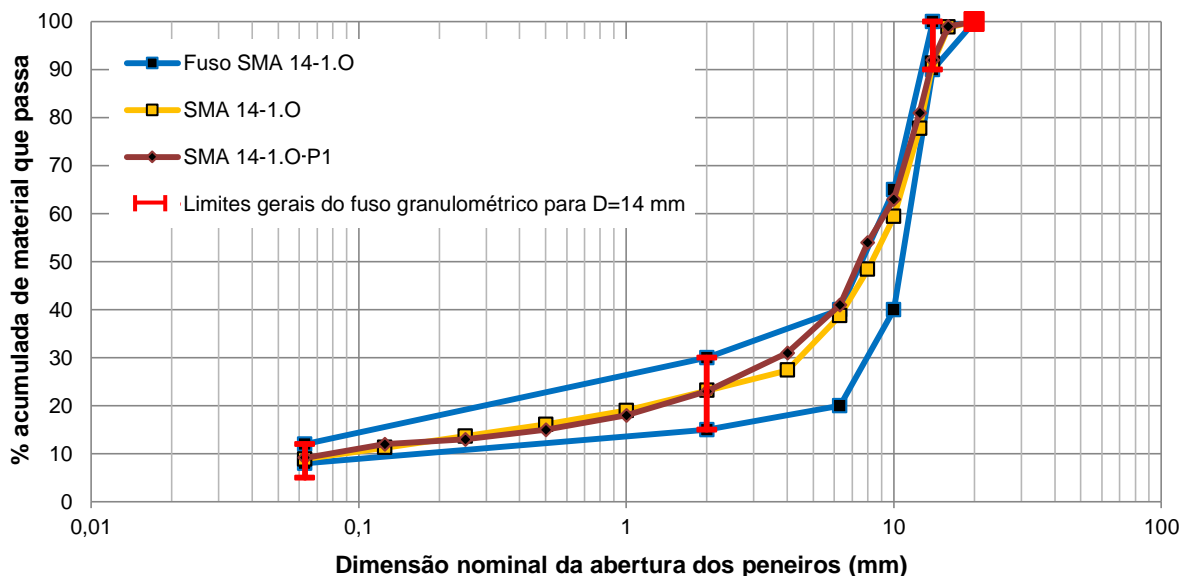


Figura 5.16 – Curvas granulométricas da amostra de mistura SMA 14-1.O recolhida na TEXSA e respetivo fuso granulométrico especificado

Da análise do Quadro 5.10 e da Figura 5.16, verifica-se que a curva granulométrica de agregados se enquadra de uma forma geral no fuso granulométrico definido, à exceção dos peneiros 6,3 e 10 mm. Para estes peneiros verifica-se um aumento da percentagem de material passado contribuindo para uma diminuição da descontinuidade da mistura betuminosa e conseqüente redução do volume de vazios entre as partículas ativas. Tal situação poderá resultar da quebra de agregado decorrente do processo de fabrico, transporte e aplicação da SMA em obra.

5.7 AVALIAÇÃO DA AFINIDADE ENTRE OS AGREGADOS E O BETUME

A utilização de um aditivo estabilizante numa SMA, cujo constituinte principal consiste em celulose, pode por vezes suscitar algumas questões quanto a uma maior sensibilidade desse aditivo à água e conseqüentemente ser encarada como passível de criar uma desadequada estrutura/película de betume com fibras com propensão para a desintegração/desagregação aquando da interligação com o agregado ou em contacto com água. Nesse sentido no presente estudo, considerou-se pertinente realizar a avaliação da afinidade entre os agregados e o conjunto betume e fibras celulósicas.

A avaliação foi realizada segundo a EN 12697-11, de acordo com o método A. Os ensaios foram realizados para duas combinações, na primeira combinação apenas se utilizou betume do tipo PmB 45/80-55 e agregados do tipo granodioritos, tendo-se na segunda combinação utilizado adicionalmente à primeira combinação uma percentagem de 1 % de fibras celulósicas. A percentagem de fibras celulósicas utilizada na segunda combinação pretende representar um caso desfavorável relativamente à percentagem de fibras habitualmente utilizada numa SMA, de acordo com o ponto 3.6.3 e como constatado no ponto 5.5.

Na Figura 5.17 é possível observar no tabuleiro da esquerda os agregados revestidos com betume e 1 % de fibras celulósicas (aspeto opaco e texturado) e no tabuleiro da direita os agregados revestidos apenas com betume (aspeto brilhante e liso).



Figura 5.17 – Aspeto dos agregados revestidos com betume com e sem fibras celulósicas (0% e 1% de fibras celulósicas)

O ensaio foi realizado para um total de seis amostras para a duração máxima contemplada na norma EN 12697-11. Complementarmente, a avaliação foi efetuada simultaneamente por dois técnicos distintos para assegurar uma maior coerência na avaliação da adesividade. O registo da evolução da perda de adesividade entre o betume e os agregados foi realizada para 6, 24, 48, 72, 96, 120, 144 e 168 horas, sendo os resultados apresentados na Figura 5.18.

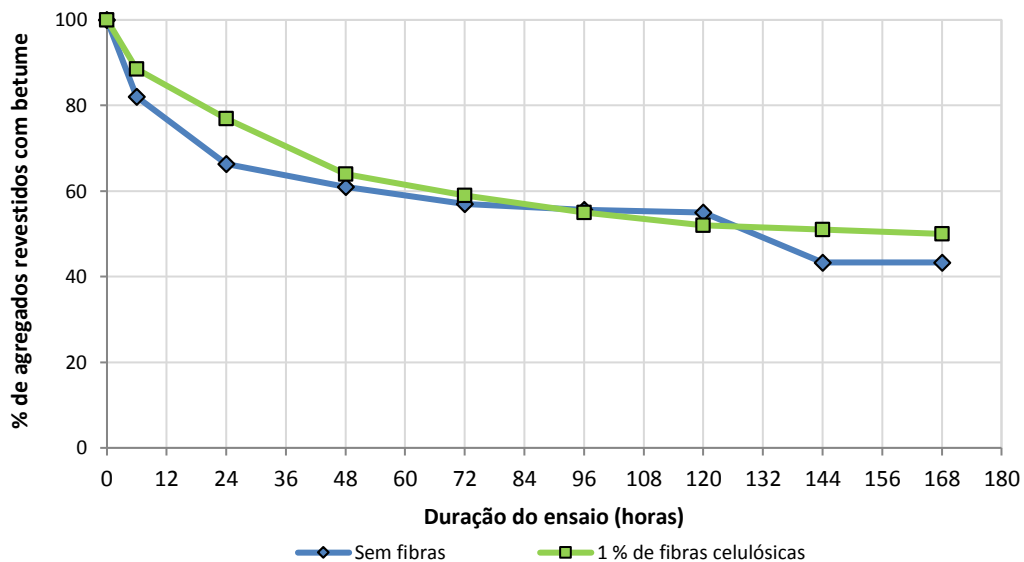


Figura 5.18 – Resultados da afinidade entre os agregados e o betume (com 0% e 1% de fibras celulósicas)

A avaliação da afinidade permitiu aferir, segundo a Figura 5.18, que mesmo após um período de 168 horas, a utilização de uma percentagem de 1 % de fibras celulósicas, tende a apresentar um comportamento semelhante ou melhor que o obtido para a combinação sem adição de fibras celulósicas. Os resultados obtidos permitem aferir que a adição de fibras celulósicas não tende a contribuir para um comportamento hidrófilo passível de reduzir a adesividade entre agregados e betume. A conclusão obtida vai ao encontro da conclusão que havia sido obtida por Cooley (2000) como observado no ponto 3.6 para a sensibilidade à água.

5.8 CONCLUSÕES

Apresentam-se seguidamente as principais conclusões obtidas na primeira fase do estudo experimental (Fase 1), sobre misturas SMA com fibras celulósicas, relativas à avaliação do procedimento de fabrico em laboratório, avaliação da influência da energia de compactação com o *Marshall*, avaliação do escorrimento de material betuminoso, avaliação da percentagem de betume/ligante betuminoso e granulometria, assim como relativamente à avaliação da afinidade entre os agregados e o betume.

A avaliação do procedimento de fabrico em laboratório de misturas SMA com fibras celulósicas permitiu obter as seguintes conclusões principais:

- ambos os métodos de adição de fibras celulósicas (a quente e a frio) no fabrico em laboratório permitem obter provetes compactados com um comportamento semelhante em termos da avaliação *Marshall*, assim como das características volumétricas dos provetes compactados, sendo o método de adição a frio mais simples de executar;
- verificou-se em alguns casos, para os provetes fabricados segundo o método de adição de fibras a quente, uma reduzida dispersão das fibras celulósicas na mistura betuminosa compactada, podendo contribuir para a necessidade de se utilizar uma maior percentagem de fibras para mitigar o escorrimento e uma provável diminuição da porosidade das misturas SMA;
- independentemente do método utilizado, para se evitar uma reduzida dispersão das fibras pode-se aumentar a duração da “amassadura” até um máximo de 5 minutos. Em alternativa pode-se proceder previamente à desagregação manual dos aglomerados de fibras celulósicas, nomeadamente com recurso a um almofariz.

Relativamente à avaliação da influência da energia de compactação com o *Marshall* nas misturas SMA com fibras celulósicas, obteve-se a seguinte conclusão principal:

- a utilização de diferentes energias de compactação para aferir o efeito de *stone-on-stone* obtido numa mistura SMA, deve basear-se, preferencialmente, na análise comparativa das baridades dos provetes ao invés da porosidade dos provetes como especificado na República Checa.

No que concerne à avaliação do escorrimento de material betuminoso nas misturas SMA com fibras celulósicas, obtiveram-se as seguintes conclusões principais:

- observa-se um maior escorrimento para as misturas do tipo SMA 14, relativamente às misturas do tipo SMA 12, independentemente da percentagem de betume ou granulometria definida.

Tal poderá ser resultante, nomeadamente, da utilização de agregados com maior dimensão nominal (menor superfície específica);

- ao contrário das misturas do tipo SMA 12, para as misturas do tipo SMA 14 não é evidente que a utilização de uma curva granulométrica mais descontínua ou a utilização de uma maior percentagem de betume corresponda a um maior escorrimento inicial de material betuminoso;
- o método do copo (*Schellenberg*) tende a apresentar uma maior sensibilidade à percentagem de fibras (ao escorrimento) comparativamente ao método do cesto. Tal poderá indiciar que os orifícios do cesto poderão ficar colmatados com mastique betuminoso e/ou agregados grossos impossibilitando o adequado escorrimento de material betuminoso nas misturas SMA. Da mesma forma, o método do copo, comparativamente ao método do cesto, tende a ser mais condicionante, requerendo a adição de maiores percentagens de fibras celulósicas para a obtenção do mesmo nível de escorrimento nas misturas SMA analisadas; e a ser mais sensível à variação da percentagem de fibras celulósicas utilizadas;
- constata-se a existência de diferentes patamares de inibição do escorrimento os quais são relativamente constantes, função da percentagem de fibras utilizada, independentemente da percentagem de betume utilizada e do tipo de mistura SMA escolhida. Verifica-se que a inibição do escorrimento ocorre em grande parte até uma percentagem de 0,2 % de fibras celulósicas (cerca de 74 % do material escorrido inicialmente), aumentando posteriormente cerca de 5 % para cada incremento de 0,1 % de fibras celulósicas;
- o conceito de *inibição do escorrimento* proposto neste estudo [equação (5.1)] permite ao utilizador uma melhor compreensão do efeito inibidor de um determinado aditivo estabilizante e definição do respetivo intervalo espectável para a percentagem a utilizar. Tal permite uma análise comparativa do custo/benefício na mitigação do escorrimento entre diferentes tipos de aditivo estabilizante. Dada a utilização incipiente de SMA em Portugal considera-se importante a avaliação de diferentes aditivos considerando o conceito proposto, complementado com a avaliação do desempenho do conjunto betume e aditivo para a definição da percentagem ótima de aditivo estabilizante, que vise maximizar a mitigação do escorrimento e a melhoria do desempenho da mistura SMA. No caso das fibras celulósicas aglomeradas com betume é espectável que o objetivo de mitigar o escorrimento seja alcançado habitualmente para uma percentagem de fibras celulósicas compreendida entre 0,3 % e 0,6 % à semelhança do que é especificado na Finlândia e na Rússia (0,3 % a 0,5 %);
- a obtenção de uma percentagem ótima de fibras celulósicas referida no ponto 3.6.2 que vise a melhoria do comportamento da SMA adicionalmente à mitigação do escorrimento deverá ocorrer tendencialmente para uma percentagem de fibras superior a 0,6 %;
- o estudo efetuado possibilitou a proposta da equação (5.2) para estimar a percentagem mínima de fibras celulósicas a utilizar em função da percentagem de betume utilizada na mistura SMA.

Relativamente à avaliação da percentagem de betume/ligante betuminoso e granulometria, foram obtidas as seguintes conclusões principais:

- a adição de fibras celulósicas ao contrário do que ocorre com os betumes modificados com borracha, não promove uma redução significativa da percentagem de betume obtido pelo método de extração por centrifugação. A utilização de um solvente é suficiente para a extração do betume que impregna as fibras celulósicas, comparativamente à borracha proveniente da reciclagem de pneus;

- se requerida a posterior avaliação da granulometria por peneiração, recomenda-se, a utilização do método de incineração, de modo a evitar a existência de fibras retidas nos peneiros durante a peneiração;
- a determinação com precisão da percentagem de betume em misturas SMA com fibras celulósicas pode ser realizada através do método por centrifugação e a percentagem de ligante betuminoso (conjunto betume e fibras) por incineração;
- se requerida a determinação de forma individual da percentagem de betume e de fibras, recomenda-se que seja utilizado o método de extração por centrifugação em complemento do método por incineração que apenas permite a obtenção da percentagem total do conjunto, betume e fibras celulósicas;
- de acordo com a análise granulométrica realizada observar-se para as SMA avaliadas uma quebra de partículas ativas (peneiro de referência igual a 4 mm) variável entre 2 % e 3 % no caso dos granodioritos e igual a 4 % para os basaltos. Se considerado o peneiro de referência igual a 4,75 mm a quebra de partículas ativas varia entre 3 % e 5 % no caso dos granodioritos e igual a 3 % no caso dos basaltos.

A avaliação da afinidade entre os agregados e o betume permitiu a seguinte conclusão principal:

- a adição de fibras celulósicas até uma percentagem de 1 % não contribui de forma evidente para um aumento do comportamento hidrófilo passível de reduzir a adesividade entre os agregados e betume.

6 AVALIAÇÃO INICIAL DAS MISTURAS SMA (FASE 2)

6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O presente capítulo referente à segunda fase do estudo experimental aborda a caracterização dos materiais constituintes, a formulação e a avaliação do desempenho de misturas SMA, as quais servirão de referência para as posteriores fases do estudo experimental.

6.2 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Na presente fase do estudo experimental a avaliação decorreu para misturas SMA do tipo SMA 11, SMA 12 e SMA 14, utilizando-se amostras fabricadas em laboratório e amostras recolhidas em obra. Das misturas SMA avaliadas, apenas a SMA 11 não foi avaliada aquando da primeira fase do estudo experimental (Fase 1).

No fabrico das diversas misturas SMA avaliadas no presente estudo, foram utilizados aglomerados de fibras celulósicas com adição de betume do tipo Viatop® Premium (Figura 6.1), fornecidas pela JRS, Rettenmaier Ibérica.



Figura 6.1 – Pormenor dos aglomerados de fibras celulósicas com adição de betume (Viatop® Premium) utilizadas no fabrico das SMA

Este tipo de fibras deriva das fibras celulósicas, mundialmente conhecidas como Viatop® 66 (denominação comercial), diferindo das mesmas por apresentarem apenas 10 % de betume a envolver as fibras que constituem 90 % da massa total das fibras com a denominação comercial Viatop® Premium.

No Quadro 6.1 são apresentadas as misturas SMA estudadas, assim como o respetivo tipo de avaliação realizada.

Quadro 6.1 – Misturas SMA utilizadas na segunda fase do estudo experimental e respetivo tipo de avaliação realizada

Fase do estudo experimental		Avaliação realizada	Tipo de misturas SMA e sua proveniência			
			SMA 11	SMA 12.O	SMA 14-1.O	SMA 14-2
			Aeroporto	Avenida do Brasil	TEXSA	Autoestrada
2. ^a	2.1	Caracterização dos materiais constituintes da mistura SMA	■	■	■	■
	2.2	Formulação da mistura		■		■
	2.3	Escorrimento de material betuminoso		■	■	■
	2.4	Deformação permanente	■	■	■	■
	2.5	Sensibilidade à água (<i>IRC</i>)		■	■	■
	2.6	Sensibilidade à água (<i>ITSR</i>)	■	■	■	■
	2.7	Fadiga	■	■	■	

A formulação das misturas SMA foi efetuada segundo o método *Marshall*, indicado na norma EN 12697-34, tendo a compactação dos provetes sido realizada através do compactador de impacto, contemplado na norma EN 12697-30.

Relativamente à avaliação do escorrimento de material betuminoso, segundo o estudo realizado previamente no ponto 5.5 irá ser realizado segundo o método do copo preconizado na norma EN 12697-18. No que concerne à avaliação do comportamento das SMA à deformação permanente, o mesmo foi aferido com um equipamento de simulação em pista de “pequenas dimensões”, mundialmente conhecido por *wheel-tracking*, segundo o método de acondicionamento dos provetes ao ar (método B), preconizado na norma EN 12697-22.

O ensaio inicia-se após 5 dias de cura das lajetas, e posterior acondicionamento na câmara de temperatura controlada, ao ar a uma temperatura de 60 °C, segundo a norma EN 12697-22. Decorrido o tempo para homogeneização da temperatura de ensaio, procede-se à simulação do tráfego onde se efetua a medição do valor do cavado de rodéira para diversos ciclos de carga até 10000 ciclos.

Na Figura 6.2 pode-se observar o equipamento do ensaio de simulação para avaliação do desempenho à deformação permanente e o aspeto das duas lajetas após terminado o ensaio.



Figura 6.2 – Equipamento de ensaio de simulação para avaliação da deformação permanente e aspeto das lajetas durante o ensaio

No caso específico da avaliação da sensibilidade à água foram avaliadas as condições de aplicação da norma EN 12697-12, comparativamente à norma militar americana MIL-STD-620A, que era tradicionalmente utilizada em Portugal.

No que concerne à avaliação do comportamento à fadiga e módulo de deformabilidade foram aferidos com um equipamento de flexão em quatro pontos a extensão controlada, de acordo com o procedimento preconizado nas normas EN 12697-24 e EN 12697-26, respetivamente.

Os ensaios inicia-se com o acondicionamento na câmara de temperatura controlada, ao ar a uma temperatura de ensaio de 20 °C, por um período de 2 horas. Decorrido o tempo para homogeneização da temperatura de ensaio, procedeu-se à avaliação do módulo de deformabilidade e posteriormente à avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga, ambos à temperatura constante de 20 °C.

Os ensaios para determinação do módulo de deformabilidade foram realizados com uma extensão constante de 50×10^{-6} , para o conjunto de frequências de 1, 4, 8, 10 e 30 Hz. Para cada frequência foram aplicados 50 ciclos de carga, à exceção da frequência de 30 Hz onde se aplicou 99 ciclos de carga para assegurar a estabilização do módulo de deformabilidade determinado.

Relativamente aos ensaios para a avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga das misturas SMA foram realizados em extensão controlada, aplicando um carregamento sinusoidal com uma frequência de 10 Hz. Os valores da extensão imposta nos ensaios variaram em função do tipo de SMA.

Uma vez que a avaliação do comportamento à fadiga das misturas SMA foi realizada a extensão controlada, os provetes foram ensaiados até ao seu ponto e rutura, ou seja ponto a partir do qual existe uma redução igual ou superior a 50 % do módulo de deformabilidade inicial, tal como indicado na norma EN 12697-24.

No que concerne ao fabrico em laboratório e caracterização das misturas SMA foram realizados nas instalações do Núcleo de Infraestruturas Rodoviárias e Aeroportuárias do Departamento de Transportes do LNEC. No que concerne à avaliação da resistência à fadiga da mistura SMA 11, os mesmos foram concretizados nas instalações do Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico.

A possibilidade de utilizar neste estudo misturas SMA recolhidas de obra, proporcionou o aprofundamento dos conhecimentos relativos a este tipo de misturas betuminosas. As amostras recolhidas de obra pertencem ao trecho experimental do LNEC, ao parque da empresa TEXSA e a um Aeroporto. No que concerne ao trecho experimental foi possível a recolha de amostras não compactadas junto à pavimentadora, assim como compactadas. Relativamente ao parque da empresa TEXSA foi possível a recolha de amostras compactadas, tendo-se no caso do aeroporto recolhido amostras não compactadas junto à pavimentadora.

6.3 MISTURA SMA 11

6.3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

No âmbito de um projeto de reabilitação de pavimentos aeroportuários, foi preconizada uma solução de reabilitação que consistiu na aplicação de uma camada de desgaste em mistura SMA 11 com fibras celulósicas e betume PmB 45/80-65, numa espessura de 5 cm, após fresagem e regularização do pavimento existente com uma mistura de regularização.

O presente estudo experimental, tem por base a mistura SMA 11 (SMA 11 surf 45/80-65) aplicada como camada de desgaste no âmbito da reabilitação realizada e pretende avaliar o seu desempenho, nomeadamente no que concerne, à sua sensibilidade à água, à resistência à deformação permanente e ao fendilhamento por fadiga.

Para a avaliação do desempenho, foram utilizados provetes de mistura SMA 11, fabricados com amostras de mistura SMA não compactada, recolhidas na obra aquando dos trabalhos de pavimentação.

6.3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Neste ponto apresentam-se os materiais constituintes da mistura SMA 11 utilizados no âmbito do presente estudo e que correspondem aos que foram aplicados como camada de desgaste num pavimento de um aeroporto.

A mistura SMA 11 em estudo é constituída pelos seguintes materiais:

- agregados (frações 6/12 mm) de natureza basáltica, provenientes da Pedreira Moita da Ladra, propriedade da Alves Ribeiro, S.A., localizada em Vialonga;
- agregados (fração 0/4 mm) de natureza calcária, provenientes da Pedreira Calbrita, propriedade da Sociedade de Britas Ricardo Pereira & Filhos Lda., localizada em Alenquer;
- fíler comercial de origem calcária proveniente da empresa Vitaliano Adrião Casinhas, localizada em Rio Maior;
- betume modificado com elastómeros da categoria PmB 45/80-65 fabricado pela CEPESA;
- fibras celulósicas aglomeradas com adição de betume (Viatop® Premium), utilizadas como aditivo estabilizante da mistura betuminosa.

— Agregados e fíler —

De acordo com o estudo de formulação realizado pela Alves Ribeiro, S.A. a mistura de agregados utilizada no fabrico da SMA 11 foi obtida a partir de duas frações granulométricas distintas (6/12 mm, 0/4 mm) e de fíler comercial de natureza calcária. As granulometrias dos materiais granulares foram determinadas de acordo com a norma NP EN 933-1, pelo procedimento com lavagem e peneiração, obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 6.2, os quais se representam graficamente na Figura 6.3.

Quadro 6.2 – Granulometria das frações de agregados e fíler utilizados no fabrico da mistura SMA 11

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (série "base+1") (mm)	Percentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)		
	Fração 6/12 mm	Fração 0/4 mm	Fíler comercial
16	100	-	-
11,2	84	-	-
8	34	-	-
4	1	100	-
2	1	72	-
1	1	47	-
0,500	1	34	-
0,250	1	21	100
0,125	1	13	90
0,063	0,3	9,2	79,5

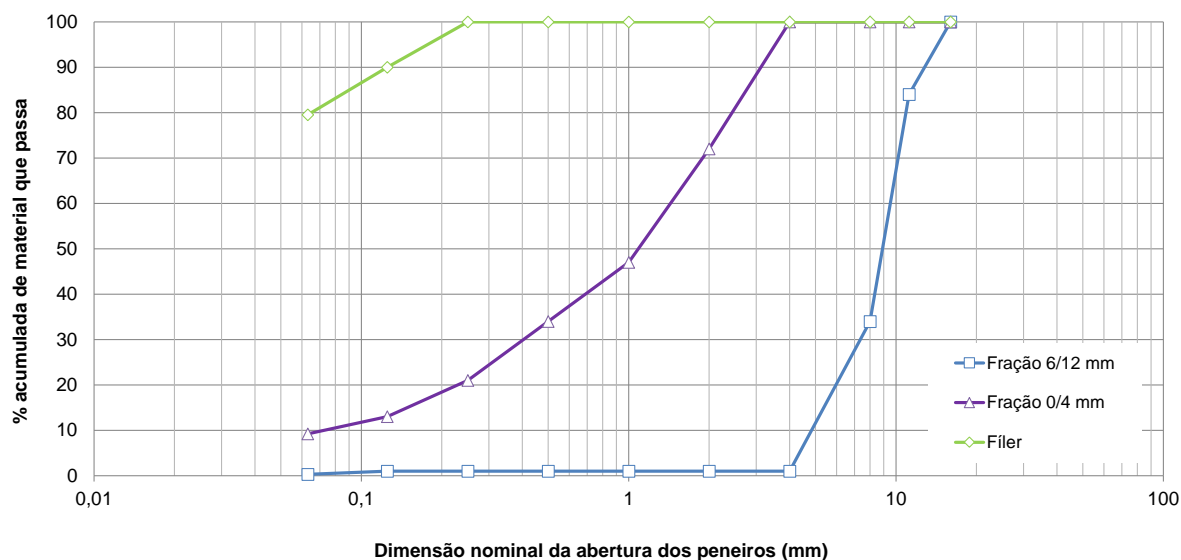


Figura 6.3 – Curvas granulométricas das frações de agregados e do fíler utilizados no fabrico da mistura SMA 11

Para avaliação do fuso definido no estudo de formulação realizado pela Alves Ribeiro, S.A. é presentemente avaliado o cumprimento dos requisitos preconizados na norma de produto EN 13108-5, considerando, nomeadamente, os fusos granulométricos utilizados noutros países em que a aplicação deste tipo de mistura betuminosa é frequente.

No Quadro 6.3 apresentam-se de acordo com a norma EN 13108-5 os valores preconizados para os limites gerais do fuso granulométrico para misturas de agregados com $D = 11$ mm, por corresponder ao valor de D passível de ser utilizado no presente caso.

Quadro 6.3– Requisitos para os limites gerais do fuso granulométrico de misturas SMA com D = 11 mm (EN 13108-5)

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (série “base+1”) (mm)	Percentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)
	D = 11 (11,2) mm
16	100
11 (11,2)	90 – 100
2	15 – 35
0,063	5,0 – 13,0

A norma EN 13108-5 preconiza ainda em relação ao fuso granulométrico da mistura de agregados, um intervalo de variação entre os valores máximo e mínimo especificados para um dado peneiro, tal como se apresenta no Quadro 6.4.

Quadro 6.4– Requisitos para a gama de variação do fuso granulométrico de misturas SMA com D = 11 mm (EN 13108-5)

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (série “base+1”) (mm)	Diferença entre os valores máximo e mínimo de percentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)
	D = 11 (11,2) mm
Um peneiro obrigatório de entre os seguintes: 8; 5,6; 4	10 - 25
Um peneiro opcional de entre os seguintes ¹⁾ : 8; 5,6; 4	10 – 25
2	5 – 15
Um peneiro obrigatório entre os seguintes: 1; 0,500; 0,250 e 0,125	4 - 15
Um peneiro opcional entre os seguintes ²⁾ : 1; 0,500; 0,250 e 0,125	4 - 15
0,063	2,0 – 6,0

Legenda: 1) Retirar da lista o peneiro obrigatório selecionado anteriormente

Para avaliar o fuso granulométrico definido no estudo de formulação da Alves Ribeiro S.A., teve-se em consideração a revisão bibliográfica apresentada no ponto 3.2.4 relativa aos fusos utilizados em países onde existe experiência na utilização de misturas SMA. Entre os fusos para misturas SMA com valor de D igual a 11 mm foram selecionados dois fusos granulométricos para análise: O fuso da SMA 11 utilizado na Alemanha (SMA 11S-AL) e o fuso da SMA 11 utilizado na Suécia (SMA 11-SE). Os dois fusos referidos encontram-se representados na Figura 6.4, adicionalmente ao fuso proposto pela Alves Ribeiro, S.A., sendo também apresentados os limites gerais preconizados na norma EN 13108-5, para o fuso de uma SMA com D = 11 mm.

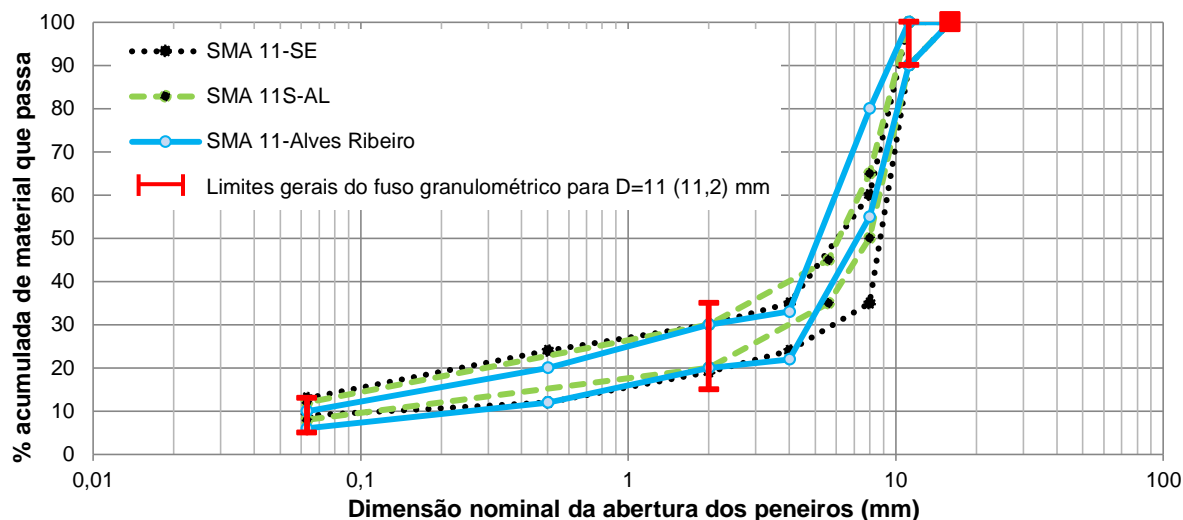


Figura 6.4 – Fusos granulométricos analisados para a mistura SMA 11, e limites gerais do fuso granulométrico de misturas SMA com D = 11 mm (EN 13108-5)

Da comparação entre os fusos da SMA 11-Alves Ribeiro, SMA 11S-AL e SMA 11-SE e dos requisitos especificados pela norma EN 13108-5 (Quadro 6.3 e Quadro 6.4), verifica-se que os três fusos se enquadram de uma forma geral nos requisitos preconizados na referida norma. Da análise dos três fusos verifica-se que o fuso proposto pela Alves Ribeiro, S.A. tende a permitir menores percentagens de fíler e a ser menos restritiva na fração grossa da SMA, comparativamente ao fuso utilizado na Alemanha e na Suécia para a SMA 11.

Para o fuso especificado, a Alves Ribeiro, S.A. adotou a seguinte composição granulométrica para a mistura SMA 11, para a qual se indicam seguidamente as percentagens utilizadas por fração:

- fração 6/12 mm 78,0 %;
- fração 0/4 mm 16,0 %;
- fíler comercial 6,0 %.

No Quadro 6.5 e na Figura 6.5 apresenta-se adicionalmente ao fuso granulométrico a curva granulométrica da mistura de agregados definida para o fabrico da SMA 11 aplicada num aeroporto.

Quadro 6.5 – Fuso e curva granulométrica da mistura de agregados definidos no fabrico da SMA 11

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (série "base+1") (mm)	Percentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)	
	Fuso granulométrico SMA 11	Curva granulométrica SMA 11
16	100	100
11,2	90 – 100	88
8	55 – 80	48
4	22 – 33	23
2	20 – 30	18
0,500	12 – 20	12
0,063	6,0 – 10,0	7,0

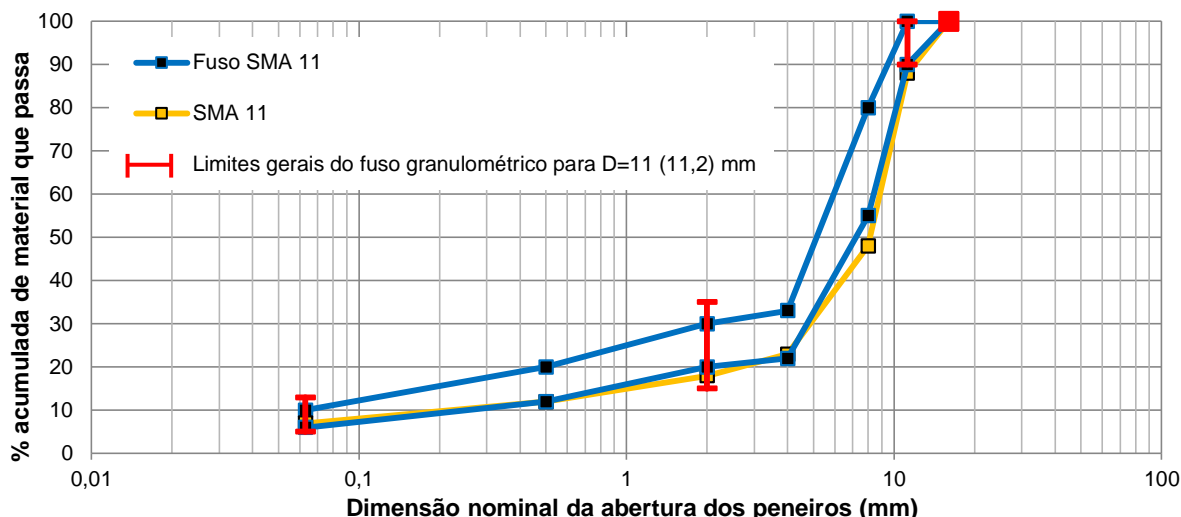


Figura 6.5 – Fuso e curva granulométrica da mistura de agregados utilizados no fabrico da SMA 11

Relativamente às propriedades adotar para os agregados, dada a reduzida experiência nacional na utilização de misturas SMA e, não estando contemplada a sua utilização no CETO (2009), consideraram-se como referência para as categorias das propriedades dos agregados e do fíler recomendadas no ponto 3.2.3 (Quadro 3.3), no ponto 3.3.3 (Quadro 3.11) e no ponto 3.4.3 (Quadro 3.13).

No Quadro 6.6 são apresentadas as propriedades dos agregados e do fíler recomendadas para as SMA de dimensão igual ou superior a 8 mm e que foram consideradas como referência para a análise do estudo da SMA 11 efetuado pela Alves Ribeiro, S.A..

Quadro 6.6 – Categorias admissíveis recomendadas para as propriedades dos agregados a utilizar nas misturas SMA D ≥ 8 mm e respetivas características dos agregados utilizados na SMA 11

Requisitos/Propriedades	Categorias admissíveis	Fração 6/12 mm	Fração 0/4 mm	Fíler comercial
Qualidade dos finos	MB _F 10	-	MB _F 10 (1,7)	-
Forma do agregado grosso – Índice de achatamento	FI ₁₅	FI ₁₅	-	-
Forma do agregado grosso – Índice de forma	-	-	-	-
Percentagens de superfícies esmagadas e partidas nos agregados grossos	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	-
Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente de Los Angeles	LA ₂₀	LA ₁₅	-	-
Resistência ao desgaste por atrito do agregado grosso, coeficiente de micro-Deval	M _{DE} 15	M _{DE} 10	-	-
Resistência ao polimento do agregado grosso para camadas de desgaste	PSV ₅₀	PSV ₅₀ (55)	-	-
Massa volúmica das partículas	A declarar	2,950	2,620	2,620
Absorção de água	WA ₂₄ 1	WA ₂₄ 1 (0,6)	WA ₂₄ 2 (1,3)	-
Baridade (sem compactação, Mg/m ³)	A declarar	1,578 ¹⁾	-	-
Volume de vazios (sem compactação, %)	-	47,0 ¹⁾	-	-
Resistência ao choque térmico	A declarar	V _{LA} 2	-	-
Afinidade dos agregados grossos aos ligantes betuminosos (%)	A declarar	-	-	-

Legenda: 1) Valor estimado dos materiais utilizados na SMA 14-1.0

Os agregados da fração 6/12 mm e 0/4 mm, assim como o fíler, apresentaram resultados dentro da gama de categorias admissíveis propostas no presente estudo.

— Aditivo estabilizante —

De acordo com a caracterização das fibras celulósicas fornecida para a amostra, proveniente das instalações da JRS, Rettenmaier Ibérica em Espanha, no Anexo II são apresentadas as suas propriedades de acordo com os métodos de ensaio assim como os valores limites das propriedades das fibras celulósicas utilizadas de acordo com a proposta apresentada no Quadro 3.20 do ponto 3.6.4. De acordo com a análise dos resultados providenciados, observa-se que as propriedades da amostra avaliada se encontram de acordo com as categorias admissíveis propostas.

— Ligante betuminoso —

De acordo com o que foi observado no ponto 3.5.1, é comum a recomendação de betumes modificados para misturas com dimensão igual ou superior a 8 mm, as quais são habitualmente utilizadas para volume e cargas por eixo mais elevadas. Para a SMA 11, foi utilizado um betume modificado com a categoria PmB 45/80-65, de acordo com a norma EN 14023, (Elaster 14/60, denominação comercial).

De acordo com a caracterização fornecida para o betume, proveniente das instalações da CEPESA em Matosinhos, no Quadro 6.7 são apresentadas as suas propriedades de acordo com os métodos de ensaio, assim como os valores limite das propriedades dos betumes modicados de acordo com a proposta apresentada no Quadro 3.15 do ponto 3.5.3.

Quadro 6.7 – Propriedades declaradas da amostra de betume utilizado na SMA 11

Requisitos do betume	Propriedades do betume	Categorias admissíveis	Valores determinados e declarados PmB 45/80-65
Consistência a temperatura de serviço intermédia	Penetração a 25 °C (0,1 mm)	Classe 4 (45 - 80)	52
Consistência à temperatura de serviço elevada	Temperatura de amolecimento (°C)	Classe 7 (≥ 55)	66,2
Coesão	Força de ductilidade (tração baixa velocidade) (J/cm ²)	Classe 2 (≥ 3) (5 °C) Classe 6 (≥ 2) (10 °C)	(≥ 3) (5 °C)
Durabilidade, Resistência ao envelhecimento, (RTFOT) a 163 °C	Variação de massa, máxima (%)	Classe 2 (≤ 0,3)	≤ 1
	Aumento da temp. de amolecimento (°C)	Classe 2 (≤ 8)	≤ 10
	Penetração retida, 25°C, 1/10 mm (0,1 mm)	Classe 7 (≥ 60)	≥ 60
	Ponto de fragilidade de Fraass (°C)	Classe 5 (≤ -10)	≤ -15
	Recuperação elástica a 25 °C (%)	Classe 3 (≥ 70)	> 70

Da análise dos resultados providenciados, observa-se que as propriedades da amostra avaliada se encontram de acordo com as categorias admissíveis propostas.

6.3.3 ESTUDO DE FORMULAÇÃO DA SMA 11

A formulação da mistura SMA 11 (SMA 11 surf PmB 45/80-65) realizada pela Alves Ribeiro, S.A. foi efetuada através do método *Marshall*. O estudo da percentagem de betume a utilizar na mistura SMA 11 teve em consideração a composição granulométrica previamente indicada no ponto 6.3.2 (ver Quadro 6.5).

De acordo com o estudo para a composição granulométrica definida foram escolhidas cinco percentagens diferentes de betume para um intervalo entre 4,5 % e 6,5 %, variando as percentagens entre si de 0,5 %. O intervalo definido permite avaliar a validade da percentagem mínima de betume recomendada no Quadro 3.15 para uma mistura SMA 11 ($\geq 5,5$ %). Para cada percentagem de betume foram compactados quatro provetes com um diâmetro de cerca de 100 mm através do compactador de impacto, utilizando 50 pancadas em cada topo dos provetes.

Segundo o estudo de formulação da Alves Ribeiro, S.A., para se mitigar o escorrimento de material betuminoso durante o fabrico e compactação dos provetes em laboratório foi utilizada uma percentagem de 0,5 % de fibras celulósicas relativamente à massa total da mistura betuminosa.

Os resultados obtidos do estudo *Marshall* realizado pelo Alves Ribeiro S.A. são apresentados no Quadro 6.8 e representados graficamente na Figura 6.6.

Quadro 6.8 – Resultados do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 11 compactados com 50 pancadas

Propriedade		Identificação das misturas betuminosas				
		SMA 11 4,5 %	SMA 11 5,0 %	SMA 11 5,5 %	SMA11 6,0 %	SMA11 6,5 %
		Número de pancadas				
		50	50	50	50	50
Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)		2,501	2,519	2,527	2,529	2,519
Ensaio <i>Marshall</i>	Estabilidade, <i>S</i> (kN)	9,3	10,9	13,1	12,6	12,0
	Deformação, <i>F</i> (mm)	2,1	2,3	3,0	3,5	4,0
	Quociente <i>Marshall</i> , <i>Q</i> (kN/m)	4,4	4,7	4,4	3,6	3,0
Baridade máxima teórica, ρ_{mt} (Mg/m ³)		2,673	2,651	2,629	2,607	2,586
Porosidade, V_V (%)		6,4	5,0	3,9	3,0	2,6
Percentagem de vazios na mistura de agregados, <i>VMA</i> (%)		17,4	17,2	17,4	17,7	18,5
Percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume, <i>VFB</i> (%)		62,9	71,1	77,7	83,1	86,0

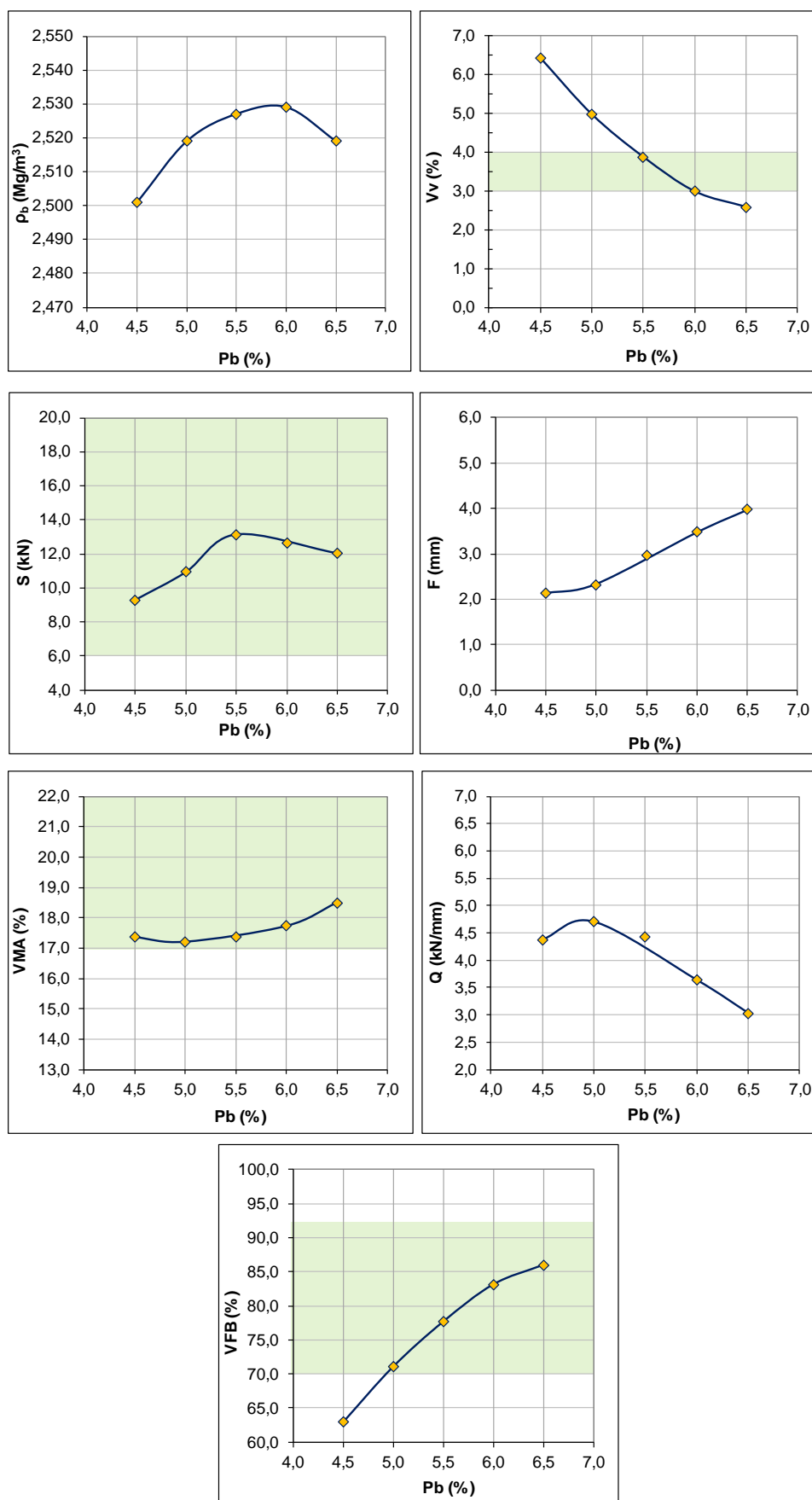


Figura 6.6 – Representação gráfica dos resultados do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 11 compactados com 50 pancadas

De acordo com o estudo de formulação efetuado pela Alves Ribeiro S.A., obteve-se a fórmula de trabalho para a mistura SMA 11 surf PmB 45/80-65, que se apresenta seguidamente por material:

- fração 6/12 mm 73,1 %;
- fração 0/4 mm 15,0 %;
- fíler comercial 5,6 %;
- fibras celulósicas 0,5 %;
- betume modificado 5,8 %.

Da análise do estudo de formulação realizado pela Alves Ribeiro, S.A., a fórmula de trabalho definida respeita as recomendações efetuadas no Quadro 4.4 para as propriedades das misturas SMA a utilizar em Portugal, no que concerne às propriedades volumétricas e mecânicas (estabilidade *Marshall*). Seguidamente são abordadas as propriedades relacionadas com o desempenho para validação da fórmula de trabalho.

6.4 MISTURA SMA 12.O

6.4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A pedido da JRS, Rettenmaier Ibérica, o Núcleo de Infraestruturas Rodoviárias e Aeroportuárias (NIRA) do Departamento de Transportes (DT) do LNEC, realizou o estudo de formulação da mistura SMA 12 (denominada no presente estudo por SMA 12.O), a aplicar na cidade de Lisboa, no troço entre o Campo Grande e a Avenida Rio de Janeiro referente à primeira fase da reabilitação do pavimento.

A reabilitação do pavimento da Avenida do Brasil foi efetuada na sua totalidade entre o Campo Grande e a Praça do Aeroporto (Rotunda do Relógio), numa extensão aproximada de 2100 metros, entre Março e Junho de 2010.

A obra foi adjudicada à empresa JAOP - Sociedade de Empreitadas, S.A., tendo a fiscalização ficado a cargo da Divisão de Construção e Reconstrução de Infraestruturas e Saneamento da Câmara Municipal de Lisboa.

O pavimento da Avenida do Brasil a reabilitar consistia num pavimento flexível e apresentava de acordo com a inspeção visual realizada, no mês de Março de 2010, como principais patologias por ordem de ocorrência:

- fendilhamento do tipo “pele de crocodilo” da camada de desgaste na zona dos rodados, essencialmente na via direita e junto de elementos de drenagem;
- cavados de rodeira;
- fendas longitudinais em alguns casos ramificadas;
- fendas transversais em alguns casos ramificadas;
- ninhos;
- e remendos em mau estado de conservação;
- desagregação.

A obra foi efetuada de forma faseada, dado o elevado tráfego que utiliza a Avenida e que impossibilita a interdição total da circulação de tráfego em toda a sua extensão. Como tal, e com o objetivo de mitigar os inconvenientes resultantes da obra para os utentes, os trabalhos de reabilitação foram divididos em três fases como se pode observar na Figura 6.7.



Figura 6.7 – Fases de intervenção na Avenida do Brasil

A primeira fase apresentava uma extensão de cerca de 1000 metros, correspondendo ao troço entre o Campo Grande e a Avenida Rio de Janeiro. A segunda fase contava com uma extensão de cerca de 400 metros, a que correspondeu o troço entre a Avenida Rio de Janeiro e a Rua Reinaldo Ferreira. Ambas as fases contemplam duas soluções de reabilitação distintas na faixa de rodagem:

- na via direita (ambos os sentidos) que apresentavam uma maior degradação, procedeu-se à fresagem das camadas betuminosas numa profundidade média de 8 cm, com posterior reposição média de 4 cm em mistura betuminosa de regularização e 4 cm em mistura SMA 12 com adição de fibras celulósicas como camada de desgaste;
- na via esquerda (ambos os sentidos), foi realizada a fresagem da camada de desgaste, numa profundidade de 4 cm, com reposição em mistura SMA 12 com adição de fibras celulósicas.

A terceira fase era constituída pelo troço entre a Rua Reinaldo Ferreira e a Praça do Aeroporto, com uma extensão aproximada de 700 metros e previa:

- em toda a largura da faixa de rodagem, a fresagem da camada de desgaste, numa profundidade de 4 cm, com reposição em mistura SMA 12 com adição de fibras celulósicas.

— Fabrico da mistura SMA 12 da Avenida do Brasil —

O fabrico da mistura SMA 12 com fibras celulósicas foi realizado na central de misturas betuminosas da JAOP na zona de Palmela. A central utilizada é do tipo descontínua, sendo apresentado na Figura 6.8 uma vista geral da central.

Para o fabrico da mistura SMA teve-se em consideração a capacidade máxima da central para produção de uma “amassadura”, sendo a mesma correspondente a 1500 kg. Para o efeito no fabrico a adição das fibras celulósicas foi realizada na proporção de 6 kg, correspondente a dois sacos (cada saco com 3 kg) por cada “amassadura” de mistura SMA fabricada.



Figura 6.8 – Vista geral da central descontínua utilizada no fabrico da mistura SMA 12 com fibras celulósicas

Considerando os procedimentos indicados no ponto 2.2, a adição das fibras celulósicas foi realizada de forma manual dada a reduzida dimensão da obra em estudo. A adição foi efetuada através de um operador que procede à colocação de sacos termo fundíveis diretamente no misturador durante a fase seca do processo de fabrico da mistura SMA, seguindo o procedimento já explanado anteriormente na Figura 2.5.

No que concerne à temperatura de fabrico e ao tempo de mistura das fibras foi definida uma temperatura de 175 °C e uma duração de cerca de 65 segundos dada a utilização de sacos termo fundíveis. Esta duração está em consonância com o que foi recomendado na Figura 2.4 em que o tempo de mistura deve ser igual ou superior a 58 segundos. Dos 65 segundos cerca de 50 segundos corresponderam à fase húmida.

— Aplicação da mistura SMA 12 no trecho experimental —

No âmbito da obra da Avenida do Brasil foi realizado um trecho experimental localizado no campus do LNEC como se apresenta na Figura 6.9.



Figura 6.9 – Localização e vista geral do trecho experimental realizado no LNEC com a mistura SMA 12 com fibras celulósicas

O trecho experimental apresentava uma extensão de cerca de 30 metros. No trecho experimental foi aplicada uma camada de desgaste com cerca de 4 cm, à semelhança da espessura aplicada posteriormente na Avenida do Brasil, como forma de aferir a formulação e desempenho avaliados em laboratório, assim como a energia de compactação através do número de passagens dos compactadores a utilizar na obra.

Para facilitar a posterior recolha de amostras do pavimento para a avaliação em laboratório, não foi aplicada rega de colagem numa extensão de cerca de 1,5 metros como se apresenta na Figura 6.10.



Figura 6.10 – Zona do trecho experimental sem aplicação de rega de colagem

— Aplicação da mistura SMA 12 na Avenida do Brasil —

As obras de reabilitação do pavimento da Avenida do Brasil entre o Campo Grande e a Avenida Rio de Janeiro tiveram início em Junho de 2010, tendo-se durante esse período realizado o acompanhamento dos trabalhos de pavimentação.

Na Figura 6.11 é apresentada uma sequência dos trabalhos referentes à aplicação da camada de desgaste em mistura SMA 12 com fibras celulósicas na Avenida do Brasil.



Figura 6.11 – Aplicação e compactação da mistura SMA 12 com fibras celulósicas na Avenida do Brasil

Na Figura 6.11 é ainda possível observar o aspeto da mistura não compactada e após compactada. Os trabalhos de pavimentação referentes à aplicação da mistura SMA 12 foram realizados utilizando uma pavimentadora convencional (Vögele Super 1600) e um cilindro de rasto liso com cerca de 7 toneladas (HAMM HD70).

Durante os trabalhos foi realizado o registo da temperatura de aplicação e de compactação da mistura SMA 12. Verificou-se que a mistura betuminosa foi aplicada a uma temperatura média de 160 °C, sendo compactada maioritariamente até uma temperatura de 140 °C, sendo a temperatura de aplicação de referência para o tipo de betume utilizado segundo recomendação do fabricante entre 150 °C e 160 °C.

— Estudo experimental —

O presente estudo experimental, tem por base os materiais e a mistura SMA 12 aplicada como camada de desgaste na Avenida do Brasil na primeira fase da reabilitação do pavimento, com o objetivo de descrever as características dos materiais utilizados no âmbito desse trabalho e avaliar o desempenho da mistura SMA, nomeadamente no que concerne, ao escorrimento de material betuminoso, à sua sensibilidade à água, à resistência à deformação permanente e ao fendilhamento por fadiga.

Adicionalmente foram também avaliadas as características superficiais da camada de desgaste, nomeadamente, o índice de irregularidade longitudinal (IRI), assim como a resistência à derrapagem através do equipamento *Grip-tester*, do pêndulo britânico e da macrotextura através do método volumétrico da mancha. O acompanhamento da obra teve como objetivo contribuir para um maior conhecimento e experiência na utilização deste tipo de misturas betuminosas (para maior detalhe ver ponto 8.4).

No presente estudo, para caracterização da mistura SMA 12 e avaliação do seu desempenho, foram utilizados provetes fabricados com amostras de mistura betuminosa recolhida na obra (Avenida do Brasil e trecho experimental) e fabricada em laboratório.

As amostras recolhidas na Avenida do Brasil consistiram num tabuleiro de mistura betuminosa não compactada e de mistura betuminosa compactada através de sonda rotativa sob a forma de provetes cilíndricos como se apresentam na Figura 6.12. Estas amostras foram utilizadas nomeadamente para avaliar a granulometria e a quantidade de betume/ligante betuminoso como descrito anteriormente no ponto 5.6.



Figura 6.12 – Amostras de mistura SMA 12 com fibras celulósicas recolhidas na Avenida do Brasil

No que concerne às amostras provenientes do trecho experimental, foram recolhidas:

- amostras de mistura betuminosa não compactada diretamente da pavimentadora como se apresenta na Figura 6.13, correspondente a três tabuleiros de mistura betuminosa. Estas amostras foram utilizadas para avaliar a granulometria e a quantidade de betume residual. Adicionalmente, as amostras foram ainda utilizadas para o fabrico de provetes cilíndricos para a avaliação da sensibilidade à água;
- amostras da camada de desgaste compactada (Figura 6.13). Foram recolhidas amostras sob a forma de lajetas para a avaliação, nomeadamente, da quebra do agregado decorrente da compactação e da resistência ao fendilhamento por fadiga. As lajetas foram recolhidas cerca de seis meses após a execução do trecho experimental.



Figura 6.13 – Amostras recolhidas no trecho experimental

A compactação em laboratório e avaliação da mistura SMA 12 foram realizadas nas instalações do Núcleo de Infraestruturas Rodoviárias e Aeroportuárias do Departamento de Transportes do LNEC.

6.4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Neste ponto apresentam-se os materiais constituintes da mistura SMA 12, doravante designada por SMA 12.O, utilizados no âmbito do presente estudo e que correspondem aos que foram aplicados no trecho experimental e na obra de reabilitação do pavimento da Avenida do Brasil no troço entre o Campo Grande e a Avenida Rio de Janeiro.

Os materiais para fabrico da mistura SMA 12.O foram fornecidos pela JAOP – Sociedade de Empreitadas, S.A. e correspondem aos que haviam sido utilizados e descritos na primeira fase do estudo experimental (Fase 1) para as SMA 12.

— Agregados e fíler —

A mistura de agregados utilizada no fabrico da SMA 12.O foi obtida a partir de duas frações granulométricas distintas (6/10 mm, 0/4 mm) e de fíler comercial. As granulometrias dos materiais granulares foram determinadas de acordo com a norma NP EN 933-1, pelo procedimento com lavagem e peneiração, obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 6.9, os quais se representam graficamente na Figura 6.14.

Quadro 6.9 – Granulometria das frações de agregados e filler utilizados no fabrico da mistura SMA 12.O

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (série "base+2") (mm)	Percentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)		
	Fração 6/10 mm	Fração 0/4 mm	Fíler comercial
12,5	100	-	-
10	80	-	-
8	45	-	-
6,3	16	-	-
4	4	100	-
2	3	77	-
1	3	46	100
0,500	3	29	99
0,250	3	19	96
0,125	2	13	82
0,063	1,7	11,0	56,6

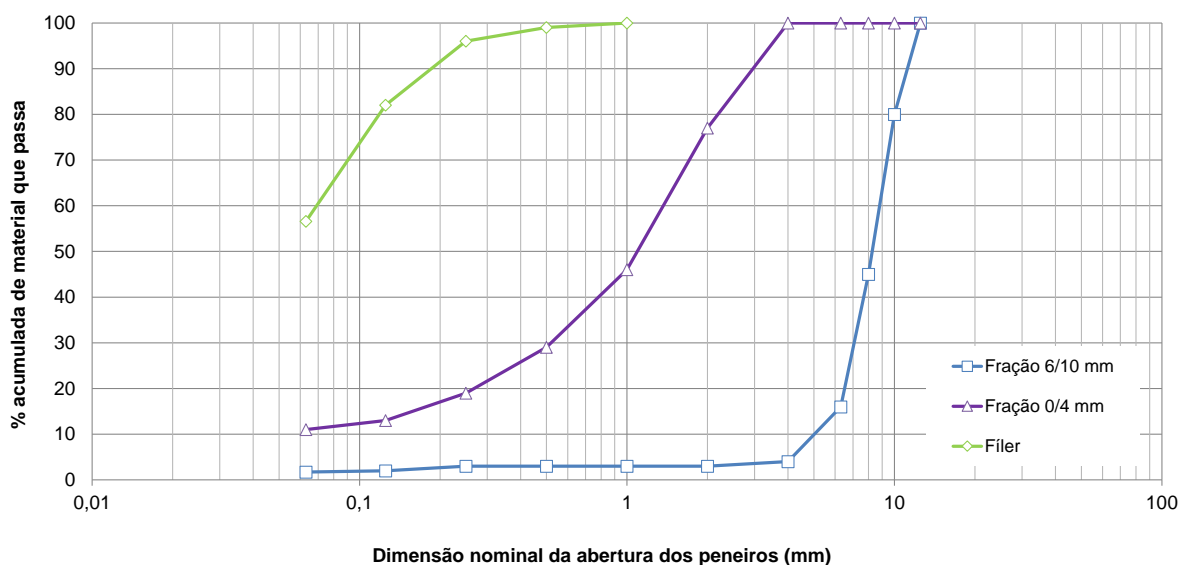


Figura 6.14 – Curvas granulométricas das frações de agregados e do filler utilizados no fabrico da mistura SMA 12.O

Para a definição do fuso a utilizar no presente estudo cumpriram-se os requisitos preconizados na norma de produto EN 13108-5 e tiveram-se em atenção fusos granulométricos utilizados noutros países em que a aplicação deste tipo de mistura betuminosa é frequente.

No Quadro 6.10 apresentam-se de acordo com a norma EN 13108-5 os valores preconizados para os limites gerais do fuso granulométrico para misturas de agregados com $D = 10$ e $D = 12$ mm, por corresponderem aos valores de D passíveis de serem utilizados no presente caso.

Quadro 6.10 – Requisitos para os limites gerais do fuso granulométrico de misturas SMA com D = 10 mm e D = 12 mm (EN 13108-5)

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (série “base+2”) (mm)	Percentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)	
	D = 10 mm	D = 12 mm
18	-	100
14	100	-
12,5	-	90 - 100
10	90 – 100	-
2	15 – 35	15 – 35
0,063	5,0 – 13,0	5,0 – 13,0

A norma EN 13108-5 preconiza ainda em relação ao fuso granulométrico da mistura de agregados, um intervalo de variação entre os valores máximo e mínimo especificados para um dado peneiro, tal como se apresenta no Quadro 6.11.

Quadro 6.11 – Requisitos para a gama de variação do fuso granulométrico de misturas SMA com D = 10 mm e D = 12 mm (EN 13108-5)

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (série “base+2”) (mm)	Diferença entre os valores máximo e mínimo de percentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)	
	D = 10 mm	D = 12 mm
Um peneiro obrigatório de entre os seguintes: 10 ¹⁾ ; 8; 6,3; 4	10 - 25	10 - 25
Um peneiro opcional de entre os seguintes ²⁾ : 10 ¹⁾ ; 8; 6,3; 4	10 – 25	10 – 25
2	5 – 15	5 – 15
Um peneiro obrigatório entre os seguintes: 1; 0,500; 0,250 e 0,125	4 - 15	4 - 15
Um peneiro opcional entre os seguintes ²⁾ : 1; 0,500; 0,250 e 0,125	4 - 15	4 - 15
0,063	2,0 – 6,0	2,0 – 6,0

Legenda: 1) Não se aplica quando D = 10 mm; 2) Retirar da lista o peneiro obrigatório selecionado anteriormente

Para a definição do fuso granulométrico a aplicar, teve-se em consideração a revisão bibliográfica apresentada no ponto 3.2.4 relativa aos fusos utilizados em países onde existe experiência na utilização de misturas SMA, assim como a informação especificada pela JRS, Rettenmaier Ibérica. Entre os fusos para misturas SMA com valores de D igual a 10 e 12 mm foram selecionados três fusos granulométricos para análise: o fuso da F10 correspondente a uma mistura do tipo SMA 10 utilizado em Espanha (F10) e que foi especificado pela JRS, Rettenmaier Ibérica, o fuso da SMA 12 utilizado

na Itália (SMA 12-IT) e o fuso da SMA 12 utilizado na Roménia (SMA 12-RO). Os três fusos referidos encontram-se representados na Figura 6.15, sendo também apresentados os limites gerais preconizados na norma EN 13108-5, quer para o fuso de uma SMA com $D = 10$ mm, quer para o fuso de uma SMA com $D = 12$ mm, os quais diferem essencialmente para os peneiros D e $1,4D$.

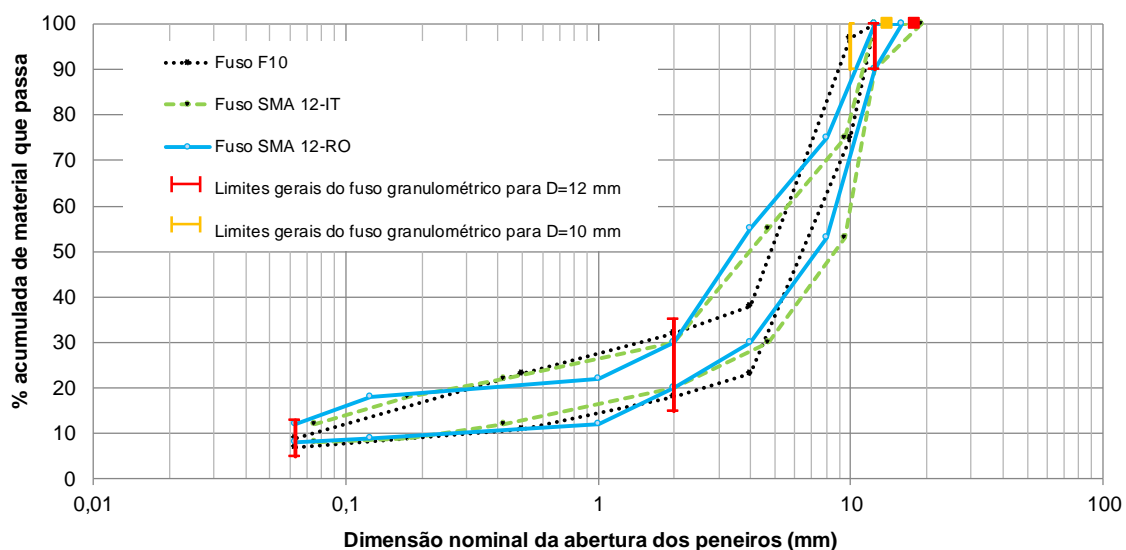


Figura 6.15 – Fusos granulométricos analisados para a mistura SMA 12, e limites gerais do fuso granulométrico de misturas SMA com $D = 10$ mm e $D = 12$ mm (EN 13108-5)

Da comparação entre os fusos da F10, SMA 12-IT e SMA 12-RO e dos requisitos especificados pela norma EN 13108-5 (Quadro 6.10 e Quadro 6.11), verifica-se que os três fusos se enquadram de uma forma geral nos requisitos preconizados na referida norma. Assim, de acordo com os três fusos e os requisitos da EN 13108 estabeleceu-se um fuso granulométrico a utilizar no estudo de formulação, tal como se apresenta no Quadro 6.12 e na Figura 6.16.

Para o fuso especificado anteriormente, foi utilizada a seguinte composição granulométrica para a mistura SMA 12.O, para a qual se indicam seguidamente as percentagens definidas por fração:

- fração 6/10 mm 64,5 %;
- fração 0/4 mm 30,5 %;
- fíler comercial 5,0 %.

No Quadro 6.12 e na Figura 6.16 apresenta-se adicionalmente ao fuso granulométrico, a curva granulométrica da mistura de agregados definida no fabrico da SMA 12.O correspondente à mistura aplicada na Avenida do Brasil.

Quadro 6.12 – Fuso e curva granulométrica da mistura de agregados definidos no fabrico da SMA 12.O

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (série “base+2”) (mm)	Percentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)	
	Fuso granulométrico SMA 12.O	Curva granulométrica SMA 12.O
18	100	100
12,5	90 – 100	100
10	75 – 97	87
8	-	65
6,3	-	46
4	24 – 38	38
2	20 – 32	30
1	-	21
0,500	11 – 23	16
0,250	-	13
0,125	-	9
0,063	7,0 – 9,0	7,3

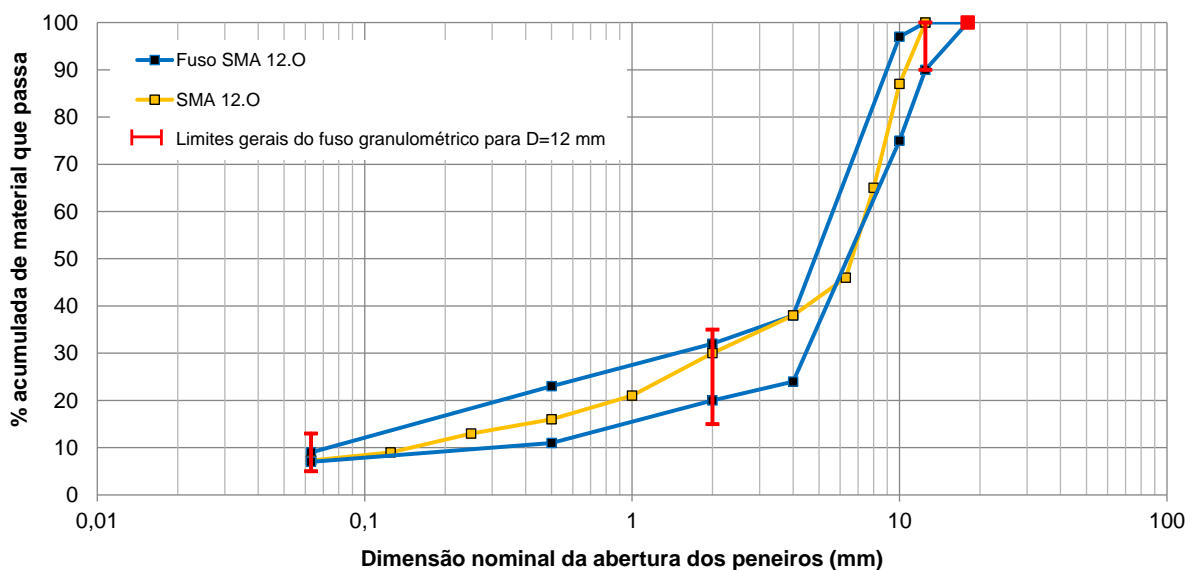


Figura 6.16 – Fuso e curva granulométrica da mistura de agregados utilizados no fabrico da SMA 12.O

Relativamente às propriedades a adotar para os agregados, dada a reduzida experiência nacional na utilização de misturas SMA e, não estando contemplada a sua utilização no CETO (2009), consideraram-se como referência para as categorias das propriedades dos agregados e do fíler recomendadas no ponto 3.2.3 (Quadro 3.3), no ponto 3.3.3 (Quadro 3.11) e no ponto 3.4.3 (Quadro 3.13).

No Quadro 6.13 são apresentadas as propriedades dos agregados e do fíler recomendadas para as SMA de dimensão igual ou superior a 8 mm e que foram consideradas como referência para o

estudo da SMA 12.O, sendo igualmente apresentados os resultados obtidos para as três frações utilizadas na mistura betuminosa.

Quadro 6.13 – Categorias admissíveis recomendadas para as propriedades dos agregados a utilizar nas misturas SMA com $D \geq 8$ mm e respetivas características dos agregados utilizados na SMA 12.O

Requisitos/Propriedades	Categorias admissíveis	Fração 6/10 mm	Fração 0/4 mm	Fíler comercial
Qualidade dos finos	MB _F 10	-	MB _F 3,3	-
Forma do agregado grosso – Índice de achatamento	FI ₁₅	FI ₇	-	-
Forma do agregado grosso – Índice de forma	-	SI ₆	-	-
Percentagens de superfícies esmagadas e partidas nos agregados grossos	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	-
Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente de Los Angeles	LA ₂₀	LA ₂₀	-	-
Resistência ao desgaste por atrito do agregado grosso, coeficiente de micro-Deval	M _{DE} 15	M _{DE} 9	-	-
Resistência ao polimento do agregado grosso para camadas de desgaste	PSV ₅₀	PSV ₄₅	-	-
Massa volúmica das partículas	A declarar	2,723	2,615	2,720
Absorção de água	WA ₂₄ 1	WA ₂₄ 0,5	WA ₂₄ 1,0	-
Baridade (sem compactação, Mg/m ³)	A declarar	1,461	1,410	-
Volume de vazios (sem compactação, %)	-	46,3	46,1	32,6
Resistência ao choque térmico	A declarar	-	-	-
Afinidade dos agregados grossos aos ligantes betuminosos (%)	≥ 80	-	-	-

Os agregados da fração 6/10 mm e 0/4 mm, assim como o fíler apresentaram resultados dentro da gama de categorias admissíveis propostas no presente estudo, à exceção da resistência ao polimento do agregado grosso que apenas garantiu uma categoria de PSV₄₅.

— Aditivo estabilizante —

De acordo com a caracterização das fibras celulósicas fornecida para a amostra, proveniente das instalações da JRS, Rettenmaier Ibérica em Espanha, no Anexo II são apresentadas as suas propriedades de acordo com os métodos de ensaio assim como os valores limites das propriedades das fibras celulósicas utilizadas de acordo com a proposta apresentada no Quadro 3.20 do ponto 3.6.4. De acordo com a análise dos resultados providenciados, observa-se que as propriedades da amostra avaliada se encontram de acordo com as categorias admissíveis propostas.

— **Ligante betuminoso** —

De acordo com o que foi observado no ponto 3.5.1, é comum a recomendação de betumes modificados para misturas com dimensão igual ou superior a 8 mm, as quais são habitualmente utilizadas para volume e cargas por eixo mais elevadas. No presente estudo, foi utilizado um betume modificado com a categoria PmB 45/80-55, de acordo com a norma EN 14023, (Styrelf 13/60, denominação comercial).

De acordo com a caracterização fornecida para a amostra de betume, proveniente das instalações da CEPISA em Matosinhos, no Quadro 6.14 são apresentadas as suas propriedades de acordo com os métodos de ensaio, assim como os valores limite das propriedades dos betumes modicados de acordo com as recomendações apresentadas no Quadro 3.15 do ponto 3.5.3.

Quadro 6.14 – Propriedades da amostra de betume utilizado na SMA 12.O

Requisitos do betume	Propriedades do betume	Categorias admissíveis	Valores declarados PmB 45/80-65
Consistência a temperatura de serviço intermédia	Penetração a 25 °C (0,1 mm)	Classe 4 (45 - 80)	61
Consistência à temperatura de serviço elevada	Temperatura de amolecimento (°C)	Classe 7 (≥ 55)	58,6
Coesão	Força de ductilidade (tração baixa velocidade) (J/cm ²)	Classe 2 (≥ 3) (5 °C) Classe 6 (≥ 2) (10 °C)	-
Durabilidade, Resistência ao envelhecimento, (RTFOT) a 163 °C	Variação de massa, máxima (%)	Classe 2 (≤ 0,3)	-
	Aumento da temp. de amolecimento (°C)	Classe 2 (≤ 8)	-
	Penetração retida, 25°C, 1/10 mm (0,1 mm)	Classe 7 (≥ 60)	-
Outros requisitos	Ponto de inflamação (°C)	Classe 3 (≥ 235)	-
	Ponto de fragilidade de Fraass (°C)	Classe 5 (≤ -10)	-
	Viscosidade cinemática (135 °C) (mm ² /s)	-	-
	Teor em parafinas % (m/m)	-	-
	Solubilidade (%)	-	-
	Recuperação elástica a 25 °C (%)	Classe 3 (≥ 70)	67
	Estabilidade ao armazenamento, (diferença de temperatura de amolecimento) (°C)	Classe 2 (≤ 5)	-
	Estabilidade ao armazenamento, (diferença na penetração) (0,1 mm)	Classe 2 (≤ 9)	-

Da análise dos resultados providenciados, observa-se que as propriedades da amostra avaliada se encontram de uma forma geral de acordo com as categorias admissíveis recomendadas.

6.4.3 ESTUDO DE FORMULAÇÃO DA SMA 12.O

A formulação da mistura SMA 12.O (SMA 12 surf PmB 45/80-55) foi efetuada através do método *Marshall*. Para o estudo da percentagem de betume a utilizar na mistura SMA 12.O, teve-se em consideração a composição granulométrica previamente definida no ponto 6.4.2.

Posteriormente, para a composição granulométrica definida foram escolhidas cinco percentagens diferentes de ligante betuminoso para um intervalo entre 5,0 % e 7,0 %, variando as percentagens entre si de 0,5 %. O intervalo definido teve em consideração a avaliação da percentagem mínima de betume recomendada no Quadro 3.15 para uma mistura SMA 12 ($\geq 5,5$ %). Para cada percentagem de betume foram compactados quatro provetes com um diâmetro de cerca de 100 mm através do compactador de impacto, utilizando 50 pancadas em cada topo dos provetes.

Adicionalmente para mitigar o escorrimento de material betuminoso durante o fabrico e compactação dos provetes em laboratório foi aplicada uma percentagem de 0,4 % de fibras celulósicas relativamente à massa total da mistura betuminosa. A adição das fibras celulósicas foi efetuada segundo o método de adição a frio previamente proposto no ponto 5.3.

Os provetes foram posteriormente avaliados, obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 6.15 e representados graficamente no Figura 6.17.

Quadro 6.15 – Resultados do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 12.O compactados com 50 pancadas

Propriedade		Identificação das misturas betuminosas				
		SMA 12.O 5,0 %	SMA 12.O 5,5 %	SMA 12.O 6,0 %	SMA12.O 6,5 %	SMA12.O 7,0 %
		Número de pancadas				
		50	50	50	50	50
Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)		2,441	2,451	2,445	2,430	2,414
Ensaio <i>Marshall</i>	Estabilidade, S (kN)	17,9	15,9	12,8	13,0	12,7
	Deformação, F (mm)	7,0	5,1	5,8	6,2	9,5
	Quociente <i>Marshall</i> , Q (kN/m)	2,6	3,1	2,2	2,1	1,3
Baridade máxima teórica, ρ_{mt} (Mg/m ³)		2,539	2,531	2,491	2,475	2,479
Características volumétricas	Porosidade, V_V (%)	3,9	3,1	1,9	1,8	2,6
	Percentagem de vazios na mistura de agregados, VMA (%)	15,7	16,2	16,1	17,1	19,0
	Percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume, VFB (%)	75,5	80,6	88,5	89,5	86,3

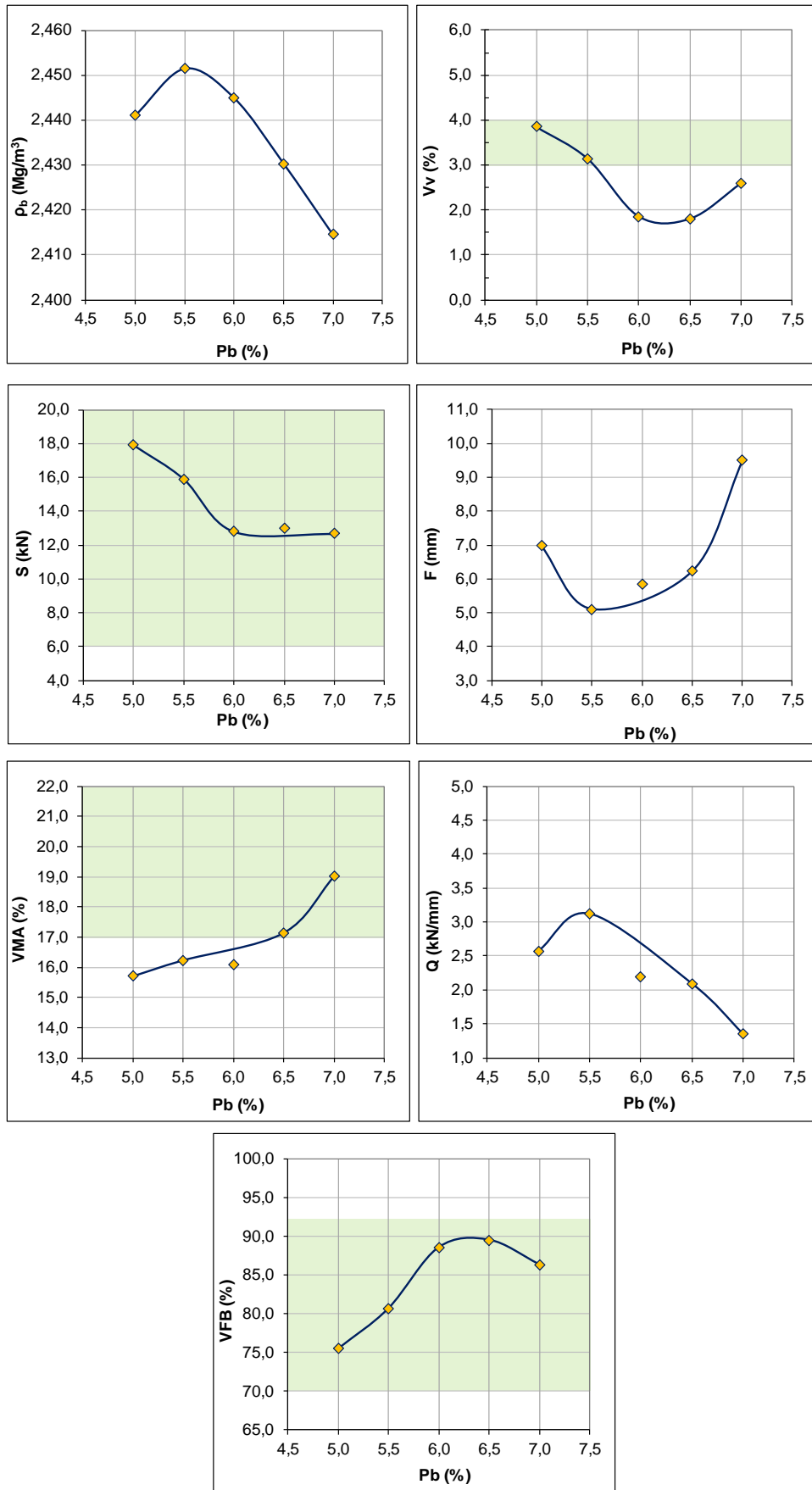


Figura 6.17 – Representação gráfica dos resultados do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 12.O compactados com 50 pancadas

De acordo com o estudo de formulação efetuado, obteve-se a fórmula de trabalho para a mistura SMA 12.O (SMA 12 surf PmB 45/80-55), que se apresenta seguidamente por material:

- fração 6/10 mm 60,7 %;
- fração 0/4 mm 28,7 %;
- fíler comercial 4,7 %;
- fibras celulósicas 0,4 %;
- betume modificado 5,5 %.

A fórmula de trabalho teve em consideração as recomendações efetuadas no Quadro 4.4 para as propriedades das misturas SMA a utilizar em Portugal, no que concerne às propriedades volumétricas e mecânicas (estabilidade *Marshall*). Seguidamente são abordadas as propriedades relacionadas com o desempenho para validação da fórmula de trabalho.

6.5 MISTURA SMA 14-1.O

6.5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

No âmbito de trabalhos de pavimentação efetuados em Portugal em que se procedeu à utilização de misturas SMA, é possível indicar a beneficiação dos arruamentos e parque de estacionamento da fábrica da TEXSA, localizada na zona Industrial de Alpiarça (Figura 6.18).

A beneficiação com uma extensão de cerca de 0,5 km foi executada pela Pragosa, S.A. durante o ano de 2012. Os trabalhos tiveram como intuito substituir a camada de desgaste existente nos arruamentos e parque de estacionamento, devido às degradações observadas na sua superfície resultantes da falta de capacidade estrutural da mistura betuminosa existente.

A solução de beneficiação preconizada para o pavimento da fábrica da TEXSA consistiu na aplicação de uma camada de desgaste em mistura SMA 14 com fibras celulósicas e betume modificado do tipo PmB 45/80-65, numa espessura de 6 cm, após fresagem na mesma espessura do pavimento existente.



Figura 6.18 – Arruamentos e parque de estacionamento da fábrica da TEXSA e respetivos trabalhos de pavimentação (Martinho *et al.*, 2013)

Para a realização do presente estudo experimental, foram considerados os materiais utilizados no fabrico da mistura SMA 14 aplicada como camada de desgaste na fábrica da TEXSA. A mistura avaliada no presente estudo é designada por SMA 14-1.O e contempla a avaliação das características dos seus materiais constituintes, assim como do seu desempenho, nomeadamente, a avaliação do escorrimento de material betuminoso, da sensibilidade à água e da resistência à deformação permanente e ao fendilhamento por fadiga.

Para a avaliação do desempenho, foram utilizados provetes de mistura SMA 14-1.O, fabricados em laboratório, assim como de uma amostra da camada de desgaste com mistura SMA 14 recolhida na obra em 2014 na sequência dos trabalhos de beneficiação realizados em 2012. A amostra recolhida consistiu na extração de uma laje com dimensões de 60x50x7 cm³.

A compactação em laboratório e avaliação, no que concerne à sensibilidade à água e à resistência à deformação permanente e fendilhamento por fadiga, da mistura SMA 14-1.O foram realizadas nas instalações do Núcleo de Infraestruturas Rodoviárias e Aeroportuárias do Departamento de Transportes do LNEC.

6.5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Neste ponto apresentam-se os materiais constituintes da mistura SMA 14-1.O utilizados no âmbito do presente estudo e que correspondem aos que foram aplicados nos arruamentos e parque de estacionamento da fábrica da TEXSA.

Os materiais para o fabrico da mistura SMA 14-1.O correspondem aos que haviam sido utilizados e descritos na primeira fase do estudo experimental (Fase 1) para as SMA 14-1.

— Agregados e fíler —

A mistura de agregados utilizada no fabrico da SMA 14-1.O foi obtida a partir de três frações granulométricas distintas (10/16 mm, 4/12 mm e 0/4 mm) e de fíler comercial. As granulometrias dos materiais granulares foram determinadas de acordo com a norma NP EN 933-1, pelo procedimento com lavagem e peneiração, obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 6.16, os quais se representam graficamente na Figura 6.19.

Quadro 6.16 – Granulometria das frações de agregados e fíler utilizados no fabrico da mistura SMA 14-1.0

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (série "base+2") (mm)	Porcentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)			
	Fração 10/16 mm	Fração 4/12 mm	Fração 0/4 mm	Fíler comercial
20	100	-	-	-
16	86	100	-	-
14	52	98	-	-
12,5	20	93	-	-
10	2	51	-	-
8	1	22	-	-
6,3	1	7	100	-
4	1	1	98	-
2	1	1	74	-
1	1	1	51	100
0,500	1	1	34	99
0,250	1	1	23	96
0,125	1	1	15	82
0,063	0,8	0,6	10,6	56,6

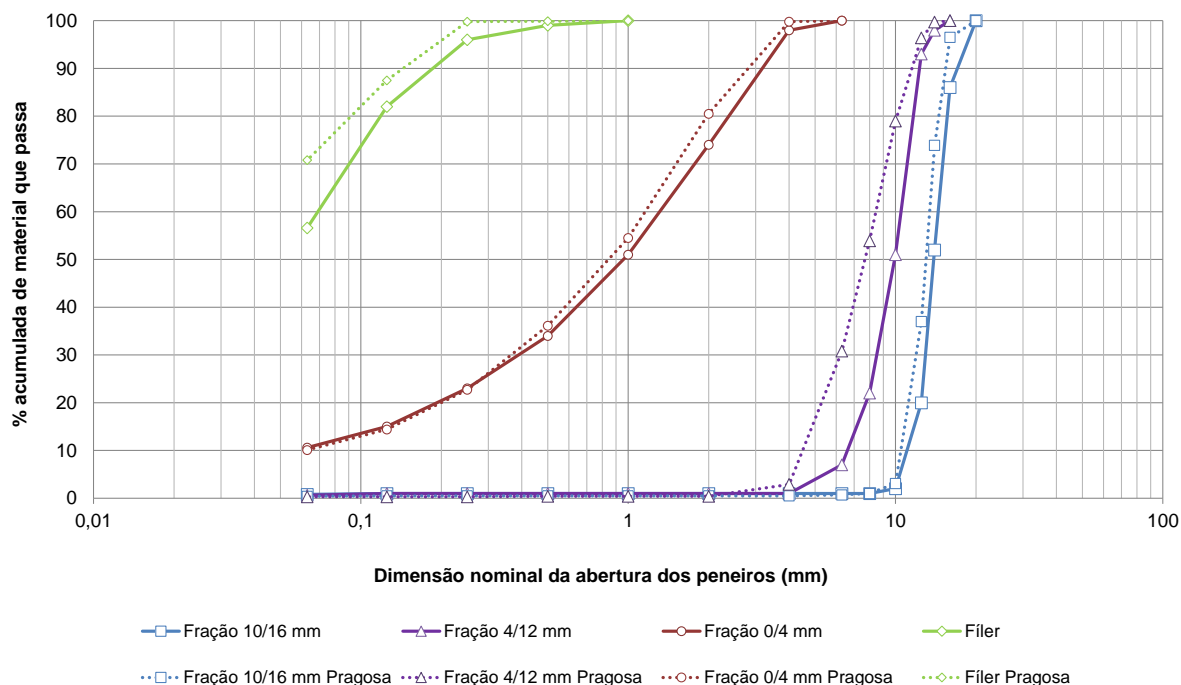


Figura 6.19 – Curvas granulométricas das frações de agregados e do fíler utilizados no fabrico da mistura SMA 14-1.0

Segundo a Figura 6.19 verifica-se alguma discrepância nas curvas referentes às frações 4/12 mm, 0/4 mm e ao fíler. No caso das frações de agregados a discrepância existente nas curvas poderá estar nomeadamente relacionada com a disparidade entre o momento em que se realizou o estudo da Pragosa, S.A. e o momento em que se recolheu materiais para o presente estudo (intervalo de tempo de cerca de 2 anos). É ainda possível que tenha ocorrido uma recolha distinta no modo como os materiais foram recolhidos na pedreira, que conduziu a que a curva utilizada no presente estudo seja um pouco mais descontínua no caso da fração 4/12 mm. No que concerne ao fíler, verificou-se aquando da obtenção dos materiais para o presente estudo que a empresa Lusofel não poderia fornecer os materiais, pelo que se optou por utilizar o fíler disponível utilizado para a SMA 12 aplicada na Avenida do Brasil.

Para mitigar as discrepâncias existentes nas curvas granulométricas das frações de agregados procedeu-se no presente estudo à recomposição da mistura de agregados, para se assegurar a curva granulométrica definida no estudo da Pragosa, S.A., a qual se analisa seguidamente.

O fuso a utilizar no presente estudo tem por base o fuso definido no estudo de formulação realizado pela Pragosa S.A. para a SMA 14-1 aplicada na fábrica da TEXSA. Apesar de definido o mesmo fuso é realizada no presente trabalho uma análise do cumprimento dos requisitos preconizados na norma de produto EN 13108-5, considerando simultaneamente fusos granulométricos utilizados noutros países em que a aplicação deste tipo de mistura betuminosa é frequente.

No Quadro 6.17 apresentam-se de acordo com a norma EN 13108-5 os valores preconizados para os limites gerais do fuso granulométrico para misturas de agregados com $D = 14$ mm, por corresponderem aos valores de D passíveis de serem utilizados no presente caso.

Quadro 6.17– Requisitos para os limites gerais do fuso granulométrico de misturas SMA com $D = 14$ mm (EN 13108-5)

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (série “base+2”) (mm)	Percentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)
	$D = 14$ mm
20	100
16	-
14	90 - 100
2	15 – 35
0,063	5,0 – 12,0

A norma EN 13108-5 preconiza ainda em relação ao fuso granulométrico da mistura de agregados, um intervalo de variação entre os valores máximo e mínimo especificados para um dado peneiro, tal como se apresenta no Quadro 6.18.

Quadro 6.18– Requisitos para a gama de variação do fuso granulométrico de misturas SMA com D = 14 mm (EN 13108-5)

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (série “base+2”) (mm)	Diferença entre os valores máximo e mínimo de percentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)
	D = 14 mm
Um peneiro obrigatório de entre os seguintes: 12,5; 10; 8; 6,3; 4	10 - 25
Um peneiro opcional de entre os seguintes ¹⁾ : 12,5; 10; 8; 6,3; 4	10 - 25
2	5 - 15
Um peneiro obrigatório entre os seguintes: 1; 0,500; 0,250 e 0,125	4 - 15
Um peneiro opcional entre os seguintes ²⁾ : 1; 0,500; 0,250 e 0,125	4 - 15
0,063	2,0 - 6,0

Legenda: 1) Retirar da lista o peneiro obrigatório selecionado anteriormente

Para a análise do fuso granulométrico aplicado, teve-se em consideração a revisão bibliográfica apresentada no ponto 3.2.4 relativa aos fusos utilizados em países onde existe experiência na utilização de misturas SMA. Entre os fusos para misturas SMA com valores de D igual a 14 e 16 mm foram selecionados dois fusos granulométricos para análise: o fuso da SMA 14 utilizada no Reino Unido (SMA 14-RU) e o fuso da SMA 16 utilizado na Suécia (SMA 16-SE). Os dois fusos referidos encontram-se representados na Figura 6.20, sendo também apresentados os limites gerais preconizados na norma EN 13108-5 para o fuso de uma SMA com D = 14 mm.

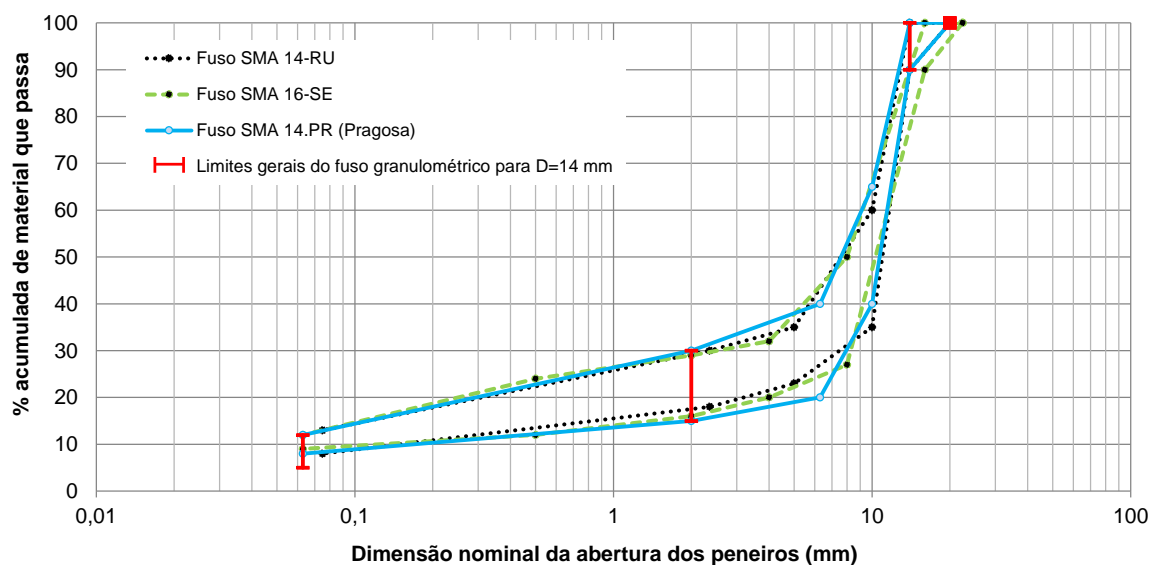


Figura 6.20 – Fusos granulométricos analisados para a mistura SMA 14-1, e limites gerais do fuso granulométrico de misturas SMA com D = 14 mm (EN 13108-5)

Da comparação entre os fusos da SMA 14-RU, SMA 16-SE e SMA 14-1.PR (Pragosa S.A.) verifica-se que o fuso definido pela Pragosa, S.A. é semelhante ao definido para o fuso da SMA 14 utilizada no Reino Unido. Do mesmo modo, é possível constatar que o fuso definido se enquadra nos requisitos especificados pela norma EN 13108-5 (Quadro 6.17 e Quadro 6.18).

Para o fuso especificado anteriormente, foi escolhida (segundo o estudo da Pragosa S.A.) a composição granulométrica indicada para a mistura SMA 14-1.O, para a qual se indicam seguidamente as percentagens definidas por fração:

- fração 10/16 mm 33,0 %;
- fração 4/12 mm 41,0 %;
- fração 0/4 mm 16,0 %;
- fíler comercial 10,0 %.

No Quadro 6.19 e na Figura 6.21 apresenta-se adicionalmente ao fuso granulométrico, a curva granulométrica da mistura de agregados utilizada no fabrico da SMA 14-1.O aplicada na fábrica da TEXSA.

Quadro 6.19 – Fuso e curva granulométrica da mistura de agregados utilizados no fabrico da SMA 14-1.O

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (série “base+2”) (mm)	Percentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)	
	Fuso granulométrico SMA 14-1.O	Curva granulométrica SMA 14-1.O
20	100	100
16	-	99
14	90 - 100	91
12,5	-	78
10	40 - 65	59
8	-	48
6,3	20 - 40	39
4	-	27
2	15 - 30	23
1	-	19
0,500	-	16
0,250	-	14
0,125	-	11
0,063	8,0 - 12,0	8,9

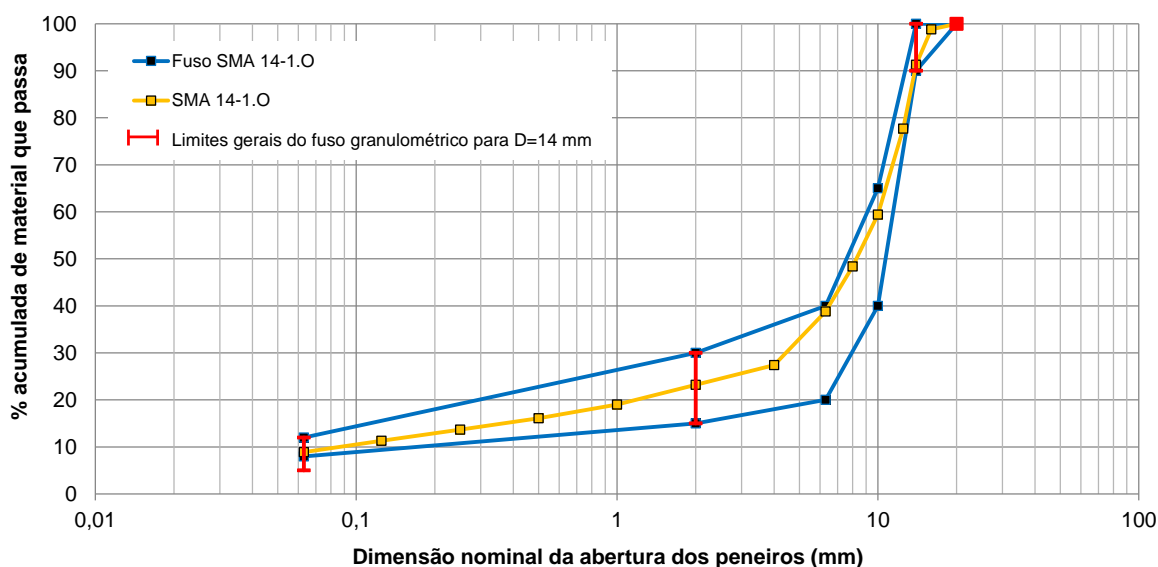


Figura 6.21 – Fuso e curva granulométrica da mistura de agregados utilizados no fabrico da SMA 14-1.O

Relativamente às propriedades adotar para os agregados, dada a reduzida experiência nacional na utilização de misturas SMA e, não estando contemplada a sua utilização no CETO (2009), consideraram-se como referência para as categorias das propriedades dos agregados e do filler recomendadas no ponto 3.2.3 (Quadro 3.3), no ponto 3.3.3 (Quadro 3.11) e no ponto 3.4.3 (Quadro 3.13).

No Quadro 6.20 são apresentadas as propriedades dos agregados e do filler recomendadas para SMA de dimensão igual ou superior a 8 mm e que foram consideradas como referência para o estudo da SMA14-1.O, sendo igualmente apresentados os resultados obtidos para as três frações e filler utilizadas na mistura betuminosa.

Quadro 6.20 – Categorias admissíveis recomendadas para as propriedades dos agregados a utilizar nas misturas SMA com $D \geq 8$ mm SMA 14-1.O

Requisitos/Propriedades	Categorias admissíveis	Fração 10/16 mm	Fração 4/12 mm	Fração 0/4 mm	Filer comercial
Qualidade dos finos	MB _F 10	-	-	-	-
Forma do agregado grosso – Índice de achatamento	FI ₁₅	FI ₆	FI ₁₃	-	-
Forma do agregado grosso – Índice de forma	-	SI ₁₀	-	-	-
Percentagens de superfícies esmagadas e partidas nos agregados grossos	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	-
Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente de Los Angeles	LA ₂₀	LA ₈	-	-	-
Resistência ao desgaste por atrito do agregado grosso, coeficiente de micro-Deval	M _{DE} 15	M _{DE} 7	-	-	-
Resistência ao polimento do agregado grosso para camadas de desgaste	PSV ₅₀	PSV ₅₀ (54)	-	-	-
Massa volúmica das partículas (Mg/m ³)	A declarar	2,980	2,968	2,686	2,720
Absorção de água (%)	WA ₂₄ 1	WA ₂₄ 1 (0,4)	WA ₂₄ 1 (0,4)	WA ₂₄ 1 (0,2)	-
Baridade (sem compactação, Mg/m ³)	A declarar	1,578		-	-
Volume de vazios (sem compactação, %)	-	47,0 ¹⁾		-	32,6
Resistência ao choque térmico	A declarar	-	-	-	-
Afinidade dos agregados grossos aos ligantes betuminosos (%)	≥ 80	-	-	-	-

Legenda: 1) Considerando a composição granulométrica especificada no estudo da Pragosa S.A.

Os agregados da fração 10/16 mm, 4/12 mm e 0/4 mm, assim como o filler apresentaram resultados dentro da gama de categorias admissíveis propostas no presente estudo.

— Aditivo estabilizante —

De acordo com a caracterização das fibras celulósicas fornecida para a amostra, proveniente das instalações da JRS, Rettenmaier Ibérica em Espanha, no Anexo II são apresentadas as suas propriedades de acordo com os métodos de ensaio assim como os valores limites das propriedades das fibras celulósicas utilizadas de acordo com a proposta apresentada no Quadro 3.20 do ponto 3.6.4. De acordo com a análise dos resultados providenciados, observa-se que as propriedades da amostra avaliada se encontram de acordo com as categorias admissíveis propostas.

— Ligante betuminoso —

De acordo com o que foi observado no ponto 3.5.1, é comum a recomendação de betumes modificados para misturas com dimensão igual ou superior a 8 mm, as quais são habitualmente utilizadas para volume e cargas por eixo mais elevadas. No presente estudo, foi utilizado um betume modificado com a categoria PmB 45/80-65, de acordo com a norma EN 14023.

De acordo com a caracterização do betume fornecida para a amostra de betume (lote YO280067), proveniente das instalações da REPSOL na Azambuja, no Quadro 6.21 são apresentadas as suas propriedades de acordo com os métodos de ensaio, assim como os valores limite das propriedades dos betumes modificados de acordo com a proposta apresentada no Quadro 3.15 do ponto 3.5.3.

Quadro 6.21 – Propriedades da amostra de betume utilizado na SMA 14-1.O

Requisitos do betume	Propriedades do betume	Categorias admissíveis	Valores declarados PmB 45/80-65
Consistência a temperatura de serviço intermédia	Penetração a 25 °C (0,1 mm)	Classe 4 (45 - 80)	53
Consistência à temperatura de serviço elevada	Temperatura de amolecimento (°C)	Classe 7 (≥ 55)	66,6
Coesão	Força de ductilidade (tração baixa velocidade) (J/cm ²)	Classe 2 (≥ 3) (5 °C) Classe 6 (≥ 2) (10 °C)	-
Durabilidade, Resistência ao envelhecimento, (RTFOT) a 163 °C	Variação de massa, máxima (%)	Classe 2 (≤ 0,3)	-
	Aumento da temp. de amolecimento (°C)	Classe 2 (≤ 8)	-
	Penetração retida, 25°C, 1/10 mm (0,1 mm)	Classe 7 (≥ 60)	-
Outros requisitos	Ponto de inflamação (°C)	Classe 3 (≥ 235)	-
	Ponto de fragilidade de Fraass (°C)	Classe 5 (≤ -10)	-
	Viscosidade cinemática (135 °C) (mm ² /s)	-	-
	Teor em parafinas % (m/m)	-	-
	Solubilidade (%)	-	-
	Recuperação elástica a 25 °C (%)	Classe 3 (≥ 70)	72
	Estabilidade ao armazenamento, (diferença de temperatura de amolecimento) (°C)	Classe 2 (≤ 5)	-
	Estabilidade ao armazenamento, (diferença na penetração) (0,1 mm)	Classe 2 (≤ 9)	-

Da análise dos resultados providenciados, observa-se que as propriedades da amostra analisada se encontram de acordo com as categorias admissíveis propostas.

6.5.3 ESTUDO DE FORMULAÇÃO DA SMA 14-1.O

A formulação da mistura SMA 14-1.O (SMA 14 surf PmB 45/80-65), realizada pela Pragosa, S.A. foi efetuada através do método *Marshall*. Segundo o estudo realizado pela Pragosa S.A., a percentagem de betume a utilizar na mistura SMA 14-1, teve em consideração a composição granulométrica previamente definida no ponto 6.5.2.

Posteriormente, para a composição granulométrica definida, no estudo da Pragosa S.A. foram escolhidas três percentagens diferentes de betume para um intervalo entre 5,5 % e 6,5 %, variando-se as percentagens entre si de 0,5 %. O intervalo definido nesse estudo está de acordo com a percentagem mínima de betume proposta no Quadro 3.15 para uma mistura SMA 14 ($\geq 5,5$ %). Para cada percentagem de ligante betuminoso foram compactados três provetes com um diâmetro de 100 mm através do compactador de impacto, utilizando 50 pancadas em cada topo dos provetes.

Para se mitigar o escorrimento de material betuminoso durante o fabrico e compactação dos provetes em laboratório segundo o estudo da Pragosa S.A. foi aplicada uma percentagem de 0,5 % de fibras celulósicas relativamente à massa da mistura betuminosa.

Os resultados obtidos no estudo da Pragosa, S.A. são apresentados no Quadro 6.22 e representados graficamente na Figura 6.22.

Quadro 6.22 – Resultados do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 14-1.O compactados com 50 pancadas

Propriedade		Identificação das misturas betuminosas		
		SMA 14-1.O 5,5 %	SMA 14-1.O 6,0 %	SMA 14-1.O 6,5 %
		Número de pancadas		
		50	50	50
Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)		2,524	2,541	2,520
Ensaio <i>Marshall</i>	Estabilidade, S (kN)	10,0	9,4	8,5
	Deformação, F (mm)	5,8	6,5	7,5
	Quociente <i>Marshall</i> , Q (kN/m)	1,7	1,5	1,1
Baridade máxima teórica, ρ_{mt} (Mg/m ³)		2,610	2,588 ¹⁾	2,568
Características volumétricas	Porosidade, V_v (%)	3,3	1,8	1,9
	Percentagem de vazios na mistura de agregados, VMA (%)	16,8	16,6	17,8
	Percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume, VFB (%)	80,4	89,0	89,5

Legenda: 1) No presente estudo obtido uma baridade máxima teórica de 2,617 Mg/m³

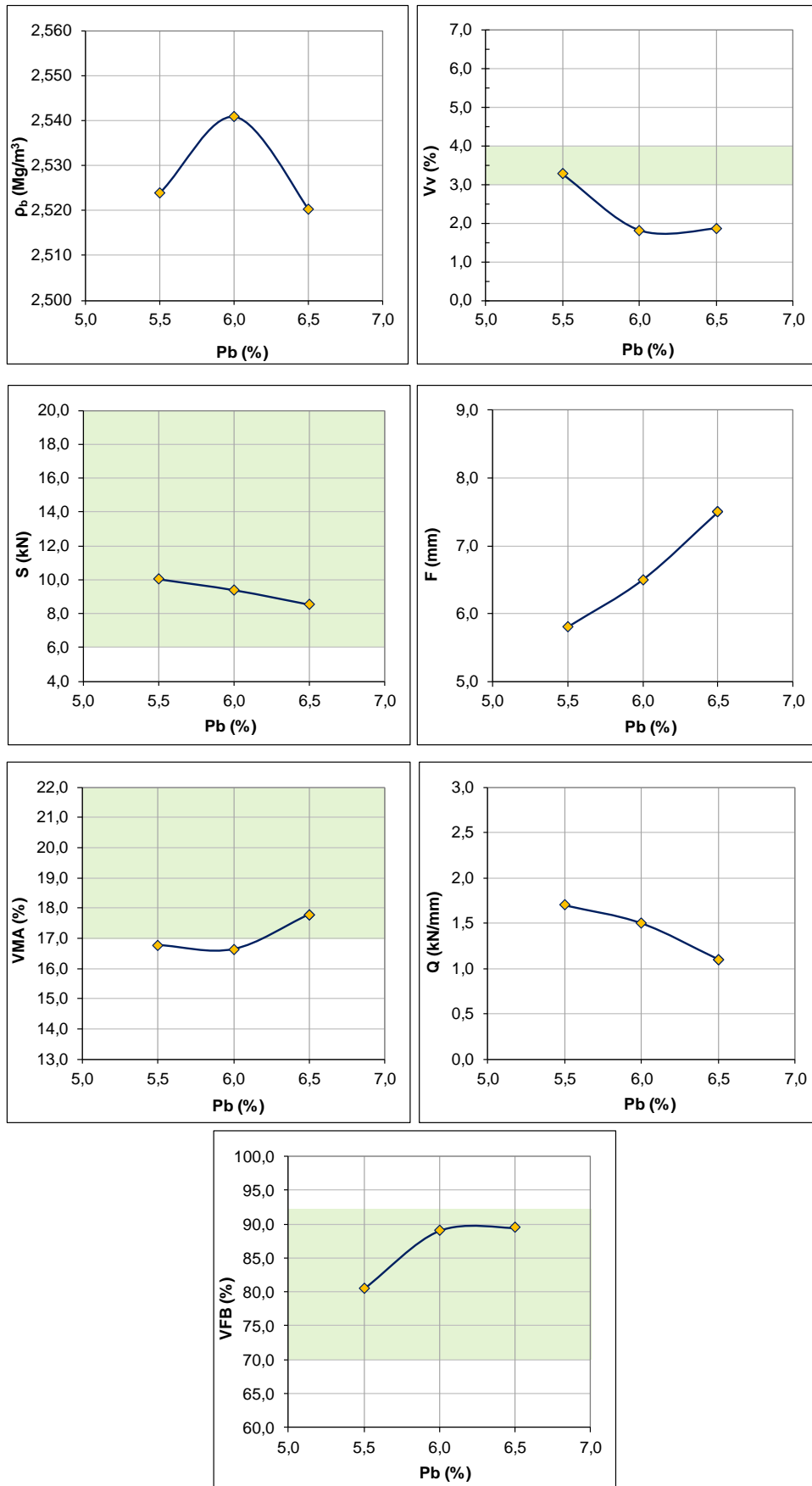


Figura 6.22 – Representação gráfica dos resultados do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 14-1.0 compactados com 50 pancadas

De acordo com o estudo de formulação efetuado pela Pragosa S.A., obteve-se a fórmula de trabalho para a mistura SMA 14-1.O (SMA 14 surf PmB 45/80-65), que se apresenta seguidamente por material:

- fração 10/16 mm 30,8 %;
- fração 4/12 mm 38,3 %;
- fração 0/4 mm 15,0 %;
- fíler comercial 9,4 %;
- fibras celulósicas 0,5 %;
- betume modificado 6,0 %.

Da análise do estudo de formulação realizado pela Pragosa, S.A., a fórmula de trabalho definida respeita as recomendações efetuadas no Quadro 4.4 para as propriedades das misturas SMA a utilizar em Portugal, no que concerne às propriedades volumétricas e mecânicas (estabilidade *Marshall*), à exceção da porosidade que é inferior ao valor mínimo recomendado de 3,0 %. Seguidamente são avaliadas no presente estudo as propriedades relacionadas com o desempenho para validação da fórmula de trabalho.

6.6 MISTURA SMA 14-2

6.6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

No âmbito do estudo de uma mistura SMA para aplicação como camada de desgaste numa autoestrada, a JRS, Rettenmaier Ibérica, solicitou ao LNEC a realização de um estudo de formulação de uma mistura SMA 14.

O estudo solicitado decorreu durante 2012 e teve como intuito estudar a composição da SMA pelo método *Marshall*, bem como a avaliação da sua sensibilidade à água e da resistência à deformação permanente. A mistura SMA preconizada para o estudo consistiu numa mistura SMA 14 com fibras celulósicas e betume PmB 45/80-65.

Para o presente estudo experimental, utilizou-se os materiais aplicados na mistura SMA 14 anteriormente referida, para a avaliação das características dos materiais constituintes da mistura designada por SMA 14-2 (SMA 14 surf PmB 45/80-65), assim como do seu desempenho. No presente estudo não foi possível avaliar a resistência ao fendilhamento por fadiga dada a limitação existente em termos de materiais disponíveis.

Para a avaliação do desempenho, foram utilizados provetes de mistura SMA 14-2, fabricados com os materiais fornecidos pela JRS, Rettenmaier Ibérica. A compactação em laboratório e a avaliação do escorrimento de material betuminoso, da sensibilidade à água e da resistência à deformação permanente da mistura SMA 14-2 foram realizadas nas instalações do Núcleo de Infraestruturas Rodoviárias e Aeroportuárias do Departamento de Transportes do LNEC.

6.6.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Neste ponto apresentam-se os materiais constituintes da mistura SMA 14-2 utilizados no âmbito do presente estudo e que correspondem aos que foram aplicados no estudo do LNEC para a JRS, Rettenmaier Ibérica.

Os materiais para fabrico da mistura SMA 14-2 fornecidos pela JRS, Rettenmaier Ibérica, correspondem aos que haviam sido utilizados e descritos na primeira fase do estudo experimental (Fase 1) para a SMA 14-2.

— Agregados e filer —

A mistura de agregados utilizada no fabrico da SMA 14-2 foi obtida a partir de duas frações granulométricas distintas (6/16 mm, 0/5 mm) e de filer comercial. As granulometrias dos materiais granulares foram determinadas de acordo com a norma NP EN 933-1, pelo procedimento com lavagem e peneiração, obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 6.23, os quais se representam graficamente na Figura 6.23.

Quadro 6.23 – Granulometria das frações de agregados e filer utilizados no fabrico da mistura SMA 14-2

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (série “base+2”) (mm)	Percentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)		
	Fração 6/16 mm	Fração 0/5 mm	Filer comercial
16	100	-	-
14	88	-	-
12,5	80	-	-
10	56	-	-
8	36	-	-
6,3	18	100	-
4	5	82	-
2	3	57	-
1	2	39	-
0,500	2	27	-
0,250	1	19	-
0,125	1	13	100
0,063	0,6	8,6	84,6

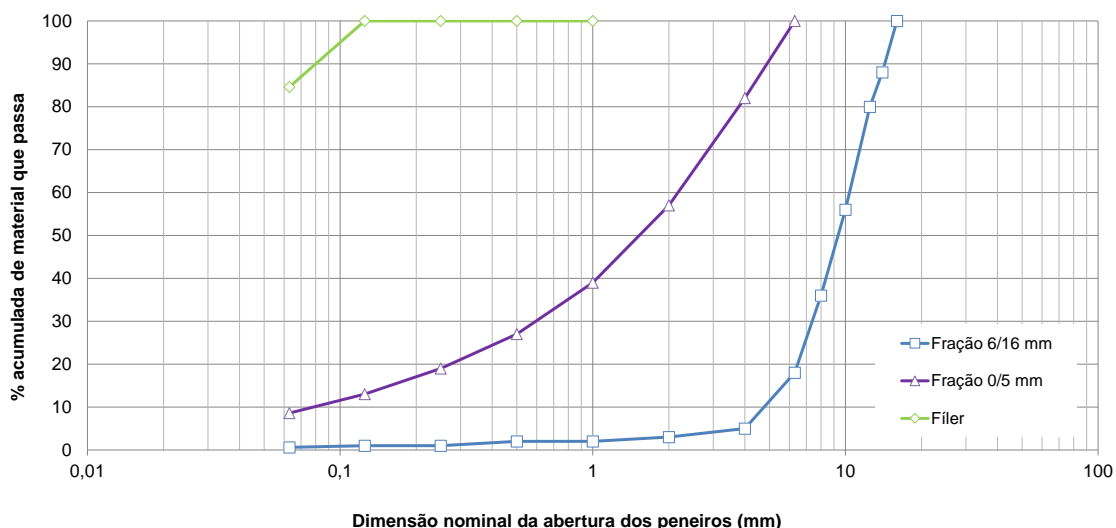


Figura 6.23 – Curvas granulométricas das frações de agregados e do fíler utilizados no fabrico da mistura SMA 14-2

Para a definição do fuso a utilizar no presente estudo cumpriram-se os requisitos preconizados na norma de produto EN 13108-5 e tiveram-se em atenção fusos granulométricos utilizados noutros países em que a aplicação deste tipo de mistura betuminosa é frequente.

No que concerne aos limites gerais do fuso granulométrico para misturas de agregados com $D = 14$ mm e respetivo intervalo de variação entre valores máximos e mínimo especificados para um dado peneiro, foram adotados os anteriormente especificados para a SMA 14-1.O no ponto 6.5.2.

Para a definição do fuso granulométrico a aplicar, teve-se em consideração a revisão bibliográfica apresentada no ponto 3.2.4 relativa aos fusos utilizados em países onde existe experiência na utilização de misturas SMA. Entre os fusos para misturas SMA com valores de D igual a 14 e 16 mm foram selecionados dois fusos granulométricos para análise: o fuso da SMA 14 utilizada no Reino Unido (SMA 14-RU) e o fuso da SMA 16 utilizado na Suécia (SMA 16-SE). Os dois fusos referidos encontram-se representados na Figura 6.24, sendo também apresentados os limites gerais preconizados na norma EN 13108-5 para o fuso de uma SMA com $D = 14$ mm.

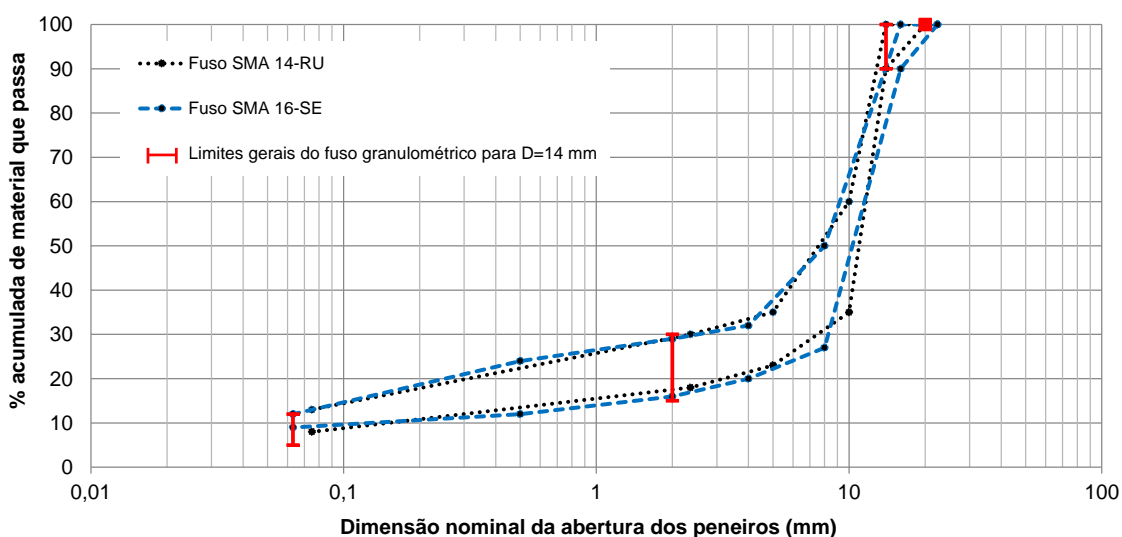


Figura 6.24 – Fusos granulométricos analisados para a mistura SMA 14-2, e limites gerais do fuso granulométrico de misturas SMA com $D = 14$ mm (EN 13108-5)

Da comparação entre os fusos da SMA 14-RU e SMA 16-SE e dos requisitos especificados pela norma EN 13108-5, verifica-se que os dois fusos se enquadram de uma forma geral nos requisitos preconizados na referida norma. Assim, baseado nos dois fusos e requisitos da EN 13108, estabeleceu-se um fuso granulométrico a utilizar no estudo de formulação, tal como se apresenta no Quadro 6.24 e na Figura 6.25.

Para o fuso especificado anteriormente, foi utilizada a seguinte composição granulométrica para a mistura SMA 14-2, para a qual se indicam seguidamente as percentagens definidas por fração:

- fração 6/16 mm 80,0 %;
- fração 0/5 mm 10,0 %;
- fíler comercial 10,0 %.

No Quadro 6.24 e na Figura 6.25 apresenta-se adicionalmente ao fuso granulométrico a curva granulométrica da mistura de agregados utilizada no fabrico da SMA 14-2.

Quadro 6.24– Fuso e curva granulométrica da mistura de agregados utilizados no fabrico da SMA 14-2

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (série “base+2”) (mm)	Percentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)	
	Fuso granulométrico SMA 14-2	Curva granulométrica SMA 14-2
20	100	100
16	-	100
14	90 - 100	90
12,5	-	84
10	40 - 60	65
8	-	49
6,3	23 - 38	34
4	-	22
2	17 - 27	18
1	-	16
0,500	-	14
0,250	-	13
0,125	-	12
0,063	8,0 - 12,0	9,8

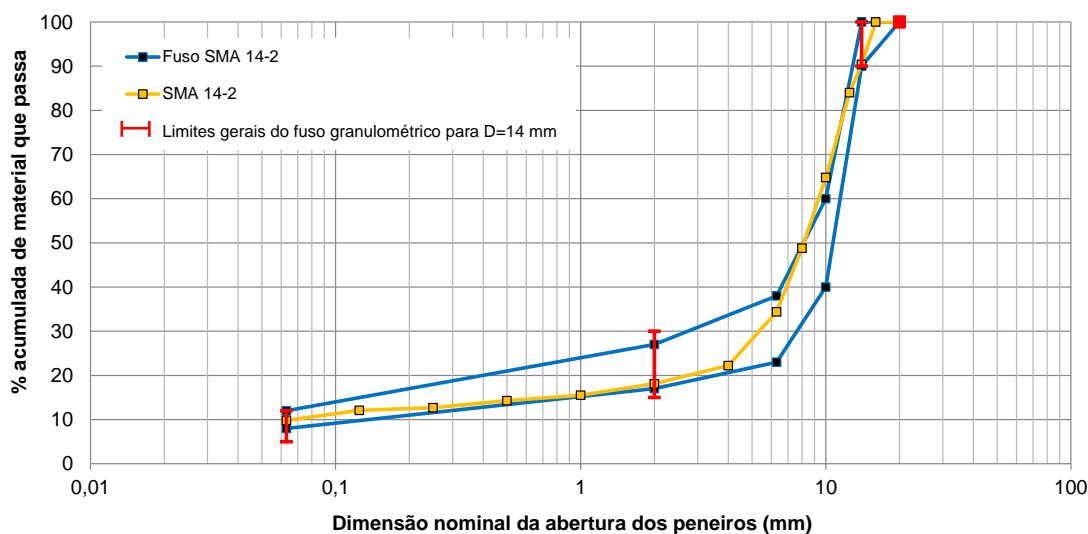


Figura 6.25 – Fuso e curva granulométrica da mistura de agregados utilizados no fabrico da SMA 14-2

Relativamente às propriedades a adotar para os agregados, dada a reduzida experiência nacional na utilização de misturas SMA e não estando contemplada a sua utilização no CETO (2009), consideraram-se como referência para as categorias das propriedades dos agregados e do fíler recomendadas no ponto 3.2.3 (Quadro 3.3), no ponto 3.3.3 (Quadro 3.11) e no ponto 3.4.3 (Quadro 3.13).

No Quadro 6.25 são apresentadas as propriedades dos agregados e do fíler recomendadas para as SMA de dimensão igual ou superior a 8 mm e que foram consideradas como referência para o estudo da SMA14-2, sendo igualmente apresentados os resultados obtidos para as duas frações e fíler utilizadas na mistura betuminosa.

Quadro 6.25 – Categorias admissíveis recomendadas para as propriedades dos agregados a utilizar nas misturas SMA com $D \geq 8$ mm e respetivas características dos agregados utilizados na SMA 14-2

Requisitos/Propriedades	Categorias admissíveis	Fração 6/16 mm	Fração 0/5 mm	Fíler comercial
Qualidade dos finos	MB _F 10	-	-	-
Forma do agregado grosso – Índice de achatamento	FI ₁₅	FI ₁₆	-	-
Forma do agregado grosso – Índice de forma	-	SI ₁₈	-	-
Percentagens de superfícies esmagadas e partidas nos agregados grossos	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	-
Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente de Los Angeles	LA ₂₀	-	-	-
Resistência ao desgaste por atrito do agregado grosso, coeficiente de micro-Deval	M _D E15	-	-	-
Resistência ao polimento do agregado grosso para camadas de desgaste	PSV ₅₀	PSV ₄₅	-	-
Massa volúmica das partículas	A declarar	2,667	2,680	2,700
Absorção de água	WA ₂₄ 1	WA ₂₄ 1 (0,5)	WA ₂₄ 1 (0,3)	-
Baridade (sem compactação, Mg/m ³)	A declarar	1,424	1,481	-
Volume de vazios (sem compactação, %)	-	46,6	44,7	-
Resistência ao choque térmico	A declarar	-	-	-
Afinidade dos agregados grossos aos ligantes betuminosos (%)	≥ 80	-	-	-

Dada a limitação existente nos materiais disponíveis, apenas foi possível realizar os ensaios indicados no Quadro 6.25 para os agregados da fração 6/16 mm, 0/5 mm e para o fíler. Os resultados obtidos encontram-se, para as propriedades avaliadas, dentro da gama de categorias admissíveis recomendadas no presente estudo, à exceção do índice de achatamento que é ligeiramente superior ao valor admissível.

— Aditivo estabilizante —

De acordo com a caracterização das fibras celulósicas fornecida para a amostra, proveniente das instalações da JRS, Rettenmaier Ibérica em Espanha, no Anexo II são apresentadas as suas propriedades de acordo com os métodos de ensaio assim como os valores limites das propriedades das fibras celulósicas utilizadas de acordo com a proposta apresentada no Quadro 3.20 do ponto 3.6.4. De acordo com a análise dos resultados providenciados, observa-se que as propriedades da amostra avaliada se encontram de acordo com as categorias admissíveis propostas.

— Ligante betuminoso —

De acordo com o que foi observado no ponto 3.5.1, é comum a recomendação de betumes modificados para misturas com dimensão igual ou superior a 8 mm, as quais são habitualmente utilizadas para volume e cargas por eixo mais elevadas. No presente estudo, foi utilizado um betume modificado com a categoria PmB 45/80-65, de acordo com a norma EN 14023.

De acordo com a caracterização do betume fornecida para a amostra de betume, proveniente das instalações da Probigalp em Rio Maior, no Quadro 6.26 são apresentadas as suas propriedades de acordo com os métodos de ensaio, assim como os valores limite das propriedades dos betumes modificados de acordo com as recomendações apresentadas no Quadro 3.15 do ponto 3.5.3.

Quadro 6.26 – Propriedades da amostra de betume utilizado na SMA 14-2

Requisitos do betume	Propriedades do betume	Categorias admissíveis	Valores declaradas PmB 45/80-65
Consistência a temperatura de serviço intermédia	Penetração a 25 °C (0,1 mm)	Classe 4 (45 - 80)	60
Consistência à temperatura de serviço elevada	Temperatura de amolecimento (°C)	Classe 7 (≥ 55)	72,4
Coesão	Força de ductilidade (tração baixa velocidade) (J/cm ²)	Classe 2 (≥ 3) (5 °C) Classe 6 (≥ 2) (10 °C)	-
Durabilidade, Resistência ao envelhecimento, (RTFOT) a 163 °C	Variação de massa, máxima (%)	Classe 2 (≤ 0,3)	-0,31
	Aumento da temp. de amolecimento (°C)	Classe 2 (≤ 8)	-
	Penetração retida, 25°C, 1/10 mm (0,1 mm)	Classe 7 (≥ 60)	93
Outros requisitos	Ponto de inflamação (°C)	Classe 3 (≥ 235)	-
	Ponto de fragilidade de Fraass (°C)	Classe 5 (≤ -10)	-12
	Viscosidade cinemática (135 °C) (mm ² /s)	-	951
	Teor em parafinas % (m/m)	-	-
	Solubilidade (%)	-	-
	Recuperação elástica a 25 °C (%)	Classe 3 (≥ 70)	86,5
	Estabilidade ao armazenamento, (diferença de temperatura de amolecimento) (°C)	Classe 2 (≤ 5)	2,4
Estabilidade ao armazenamento, (diferença na penetração) (0,1 mm)	Classe 2 (≤ 9)	6,3	

Da análise dos resultados providenciados, observa-se que as propriedades da amostra avaliada se encontram de acordo com as categorias admissíveis propostas.

6.6.3 ESTUDO DE FORMULAÇÃO DA SMA 14-2

A formulação da mistura SMA 14-2 (SMA 14 surf PmB 45/80-65) foi efetuada através do método *Marshall*. Para o estudo da percentagem de betume a utilizar na mistura SMA 14-2, teve-se em consideração a composição granulométrica previamente definida no ponto 6.6.2.

Posteriormente, para a composição granulométrica definida foram escolhidas cinco percentagens diferentes de betume para um intervalo entre 5,5 % e 7,5 %, variando-se as percentagens entre si de 0,5 %. O intervalo definido permite avaliar a validade da percentagem mínima de betume recomendada no Quadro 3.15 para uma mistura SMA 14 ($\geq 5,5$ %). Para cada percentagem de betume foram compactados quatro provetes com um diâmetro de cerca de 100 mm através do compactador de impacto, utilizando 50 pancadas em cada topo dos provetes.

Adicionalmente, para mitigar o escorrimento de material betuminoso durante o fabrico e compactação dos provetes em laboratório foi aplicada uma percentagem de 0,4 % de fibras celulósicas. A adição das fibras celulósicas foi efetuada segundo o método de adição a frio previamente proposto no ponto 5.3.

Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 6.27 e representados graficamente na Figura 6.26.

Quadro 6.27 – Resultados do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 14-2 compactados com 50 pancadas

Propriedade		Identificação das misturas betuminosas				
		SMA 14-2 5,5 %	SMA 14-2 6,0 %	SMA 14-2 6,5 %	SMA14-2 7,0 %	SMA14-2 7,5 %
		Número de pancadas				
		50	50	50	50	50
Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)		2,351	2,359	2,367	2,346	2,347
Ensaio <i>Marshall</i>	Estabilidade, S (kN)	9,0	8,2	8,6	8,6	7,7
	Deformação, F (mm)	3,6	2,4	3,1	3,7	3,6
	Quociente <i>Marshall</i> , Q (kN/m)	3,1	3,5	2,8	2,4	2,1
Baridade máxima teórica, ρ_{mt} (Mg/m ³)		2,504	2,429	2,420	2,393	2,386
Porosidade, V_v (%)		6,1	2,9	2,2	2,0	1,6
Percentagem de vazios na mistura de agregados, VMA (%)		18,7	16,6	17,2	17,9	18,7
Percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume, VFB (%)		67,2	82,7	87,0	89,0	91,3

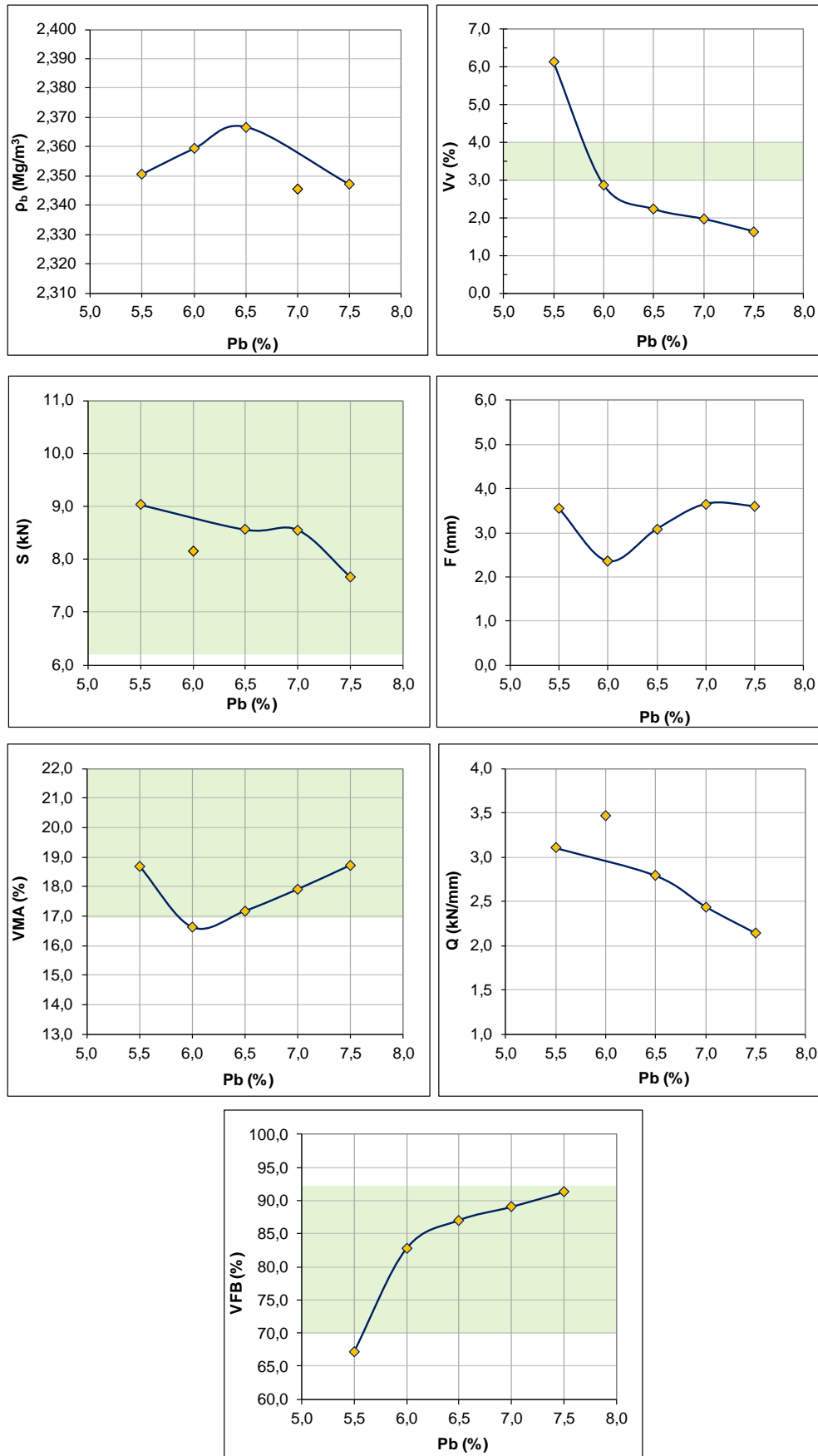


Figura 6.26 – Representação gráfica dos resultados do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 14-2 compactados com 50 pancadas

De acordo com o estudo de formulação efetuado, obteve-se a fórmula de trabalho para a mistura SMA 14-2 (SMA 14 surf PmB 45/80-65), que se apresenta seguidamente por material:

- fração 6/16 mm 74,8 %;
- fração 0/5 mm 9,4 %;
- fíler comercial 9,4 %;
- fibras celulósicas 0,4 %;
- betume modificado 6,0 %.

Da análise do estudo de formulação realizado, a fórmula de trabalho definida respeita as recomendações efetuadas no Quadro 4.4 para as propriedades das misturas SMA a utilizar em Portugal, no que concerne às propriedades volumétricas e mecânicas (estabilidade *Marshall*), à exceção da porosidade que é ligeiramente inferior a 3,0 % (2,9 %). Seguidamente são abordadas as propriedades relacionadas com o desempenho para validação da fórmula de trabalho.

6.7 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

Decorrente das misturas formuladas (SMA 11, SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2) é realizada, no presente ponto, uma análise integrada dos resultados obtidos no que concerne à avaliação do escorrimento de material de betuminoso, da sensibilidade à água, da resistência à deformação permanente, do módulo de deformabilidade e da resistência ao fendilhamento por fadiga.

6.7.1 AVALIAÇÃO DO ESCORRIMENTO DE MATERIAL BETUMINOSO

— Amostras estudadas —

No ensaio de avaliação do escorrimento de material betuminoso através do método do copo, as amostras a ensaiar, consistiram em misturas SMA (SMA 11, SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2) com uma composição baseada nas fórmulas de trabalho definidas aquando dos respetivos estudos de formulação.

As amostras avaliadas foram colocadas numa estufa a uma temperatura de ensaio de acordo com o Quadro 6.28 durante um período de 60 minutos. O valor da temperatura de ensaio utilizada corresponde à temperatura para realização da “amassadura” recomendada pelo fabricante do betume acrescida de 15 °C.

Quadro 6.28 – Temperatura de ensaio na avaliação do escorrimento de material betuminoso (SMA 11, SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2)

Identificação das misturas betuminosas	Temperatura de ensaio (°C)
SMA11 ¹⁾	175
SMA12.O	180
SMA14-1.O	185
SMA14-2	185

Legenda: 1) mistura avaliada no estudo da Alves Ribeiro, S.A.

— Apresentação e análise de resultados —

Da análise dos resultados do ensaio para avaliação do escorrimento de material betuminoso segundo o método de copo (EN 12697-18) apresenta-se no Quadro 6.29 a compilação dos resultados obtidos para as misturas avaliadas na presente fase do estudo experimental (Fase 2).

Quadro 6.29 – Compilação dos resultados dos ensaios de avaliação do escorrimento de material betuminoso e percentagem mínima de fibras celulósicas a adotar

Identificação das misturas betuminosas	Percentagem de betume, P_b (%)	Percentagem de fibras celulósicas, (%)	Resultados obtidos		
			Percentagem de material escorrido, D_n (%)	Percentagem mínima de fibras celulósicas a adotar segundo a equação proposta (5.2)	
				$D \leq 0,2$ %	$D \leq 0,3$ %
SMA11	5,8	0,5	0,14	0,30	0,24
SMA12.O	5,5	0,4	0,05	0,19	0,11
SMA14-1.O	6,0	0,5	0,14	0,38	0,32
SMA14-2	6,0	0,4	0,18	0,38	0,32

De acordo com o Quadro 6.29 é possível concluir que todas as misturas (SMA 11, SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2) apresentam um bom comportamento relativamente à sensibilidade ao escorrimento, com um valor inferior a 0,3 % ($D_{0,3}$), como recomendado no Quadro 4.4.

De acordo com o Quadro 6.29 é possível verificar uma adequabilidade da equação (5.2) proposta no presente trabalho para estimar a percentagem mínima de fibras celulósicas, a qual tende a requer uma menor percentagem de fibras relativamente à percentagem que foi efetivamente aplicada (cerca de 0,2 %), sendo exceção a mistura SMA 14-2. A conclusão anterior é coerente com os resultados obtidos para a percentagem de material escorrido, os quais como se observa no Quadro 6.29 são inferiores a 0,2 %, permitindo assim uma redução na percentagem de fibras utilizada.

Tendo presente o valor limite habitualmente definido internacionalmente para o escorrimento de material betuminoso igual a 0,3 % (ver ponto 4.6), relativamente à massa total da mistura betuminosa, considera-se ser mais adequado que a estimativa da percentagem mínima de fibras celulósicas seja realizada para um $D \leq 0,2$ %. A utilização de um limite de escorrimento de 0,2 % para a equação (5.2) visa mitigar a possibilidade de ocorrência de um escorrimento de material desadequado.

6.7.2 AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE À ÁGUA

— Amostras estudadas —

A avaliação da sensibilidade à água das misturas (SMA 11, SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2) foi realizada segundo dois métodos de ensaio distintos (EN 12697-12 e MIL-STD-620A), como apresentado no Quadro 6.30. Na avaliação realizada segundo a EN 12697-12 utilizou-se o método A, que considera a avaliação da sensibilidade à água das misturas betuminosas através do ensaio para determinar a resistência conservada em tração indireta (EN 12697-23). No caso da SMA 11.AR e SMA 14-1.PR as mesmas provieram dos estudos de formulação realizados pela Alves Ribeiro, S.A. e Pragosa, S.A., respetivamente.

Quadro 6.30 – Misturas SMA utilizadas para avaliação da sensibilidade à água (Fase 2 do estudo experimental)

Identificação das misturas betuminosas	Tipo de misturas SMA e sua proveniência	
	EN 12697-12	MIL-STD-620A
SMA11	■ 1)	
SMA11.AR	■ 2)	■ 2)
SMA12.O	■ 3); ■ 4)	■ 4)
SMA14-1.O	■ 4)	
SMA14-1.PR	■ 5)	■ 5)
SMA14-2	■ 4)	■ 4)

Legenda: 1) amostras de SMA recolhida na obra; 2) amostras fabricadas e avaliadas no estudo da Alves Ribeiro, S.A.; 3) amostras não compactadas recolhidas no trecho experimental e posteriormente compactadas com 20 pancadas em cada topo do provete; 4) amostras fabricadas no laboratório do LNEC; 5) amostras fabricadas e avaliadas no estudo da Pragosa, S.A

No ensaio de avaliação da sensibilidade à água segundo a norma EN 12697-12, os provetes a ensaiar, consistiram num conjunto de seis provetes cilíndricos com diâmetro 100 ± 3 mm compactados, de acordo com a norma EN 12697-30, com 50 pancadas em cada topo do provete. As misturas betuminosas utilizadas apresentam uma composição baseada nas fórmulas de trabalho definidas aquando dos respetivos estudos de formulação.

No caso da SMA 12.O adicionalmente ao primeiro conjunto de provetes fabricados em laboratório com 50 pancadas em cada topo do provete e, com o objetivo de avaliar a influência da energia de compactação na sensibilidade à água, foi fabricado um segundo conjunto de provetes com amostras de mistura não compactada recolhida no trecho experimental, para os quais se aplicou 20 pancadas em cada topo do provete. A energia de compactação utilizada teve como objetivo assegurar condições de compactação semelhantes às obtidas no trecho experimental, observado, se traduziram em média numa porosidade de cerca de 9,5 %.

No que concerne ao ensaio de avaliação da sensibilidade à água, segundo a norma MIL-STD-620A (método 104), foram utilizados seis provetes cilíndricos tipo *Marshall* com diâmetro de 100 mm, preparados segundo o método 100, e compactados através da aplicação de 50 pancadas em cada topo do provete. A mistura SMA fabricada utiliza a mesma composição que os provetes utilizados na avaliação da sensibilidade à água através da norma EN 12697-12.

— Apresentação e análise de resultados —

Na Figura 6.27 e na Figura 6.28 são apresentados graficamente os resultados para as misturas (SMA 11, SMA 11.AR, SMA 12.O, SMA 14-1.O, SMA 14-1.PR e SMA 14-2) avaliadas na presente fase do estudo experimental (Fase 2), complementados com a mistura SMA 12.O e a mistura escolhida de controlo (AC 14 surf 35/50) estudada por Pimentel (2013). Como complemento no Anexo III são apresentados de forma detalhada os resultados obtidos, assim como a avaliação do tipo de rotura (EN 12697-23) que se observou nos provetes ensaiados segundo a norma EN 12697-12, no que concerne ao estado do revestimento na superfície do agregado e à presença de agregado fraturado ou esmagado.

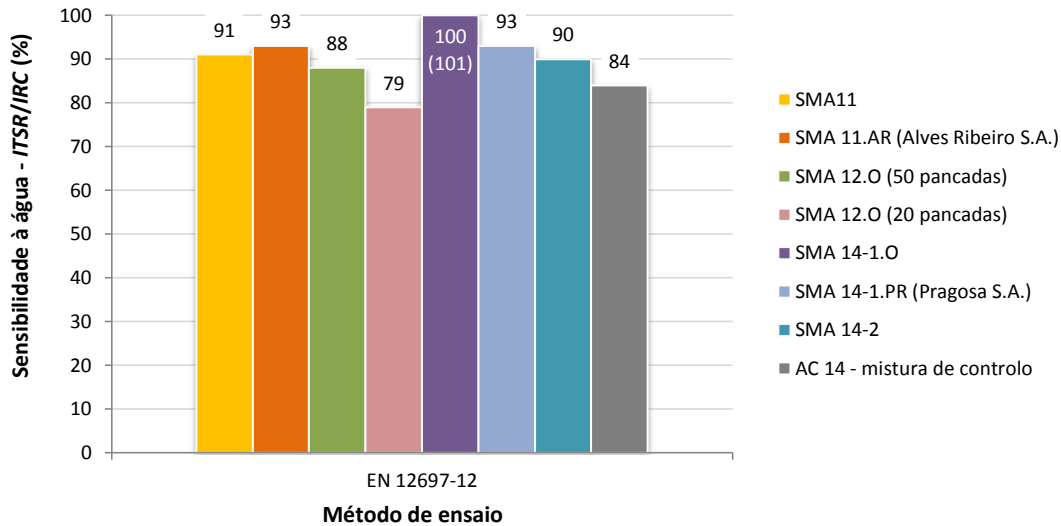


Figura 6.27 – Compilação dos resultados da sensibilidade à água segundo a norma EN 12697-12

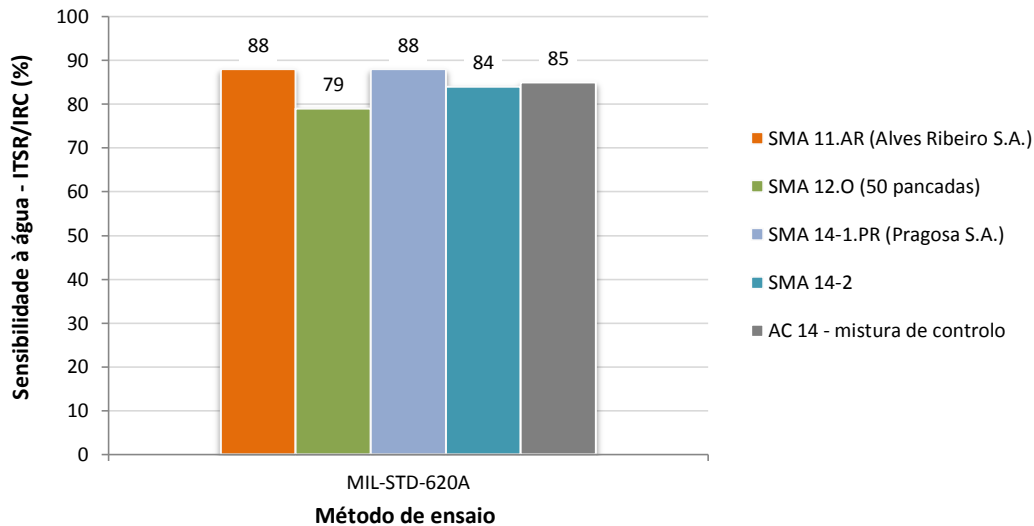


Figura 6.28 – Compilação dos resultados da sensibilidade à água segundo a norma MIL-STD-620A

Segundo os resultados compilados na Figura 6.27 e na Figura 6.28, em termos dos valores obtidos para o índice de resistência conservada (IRC) e para a resistência conservada em tração indireta

(*ITSR*), verificou-se que todas as misturas SMA apresentaram valores similares com o *ITSR* a variar entre 88 % e 93 %, sendo exceção a mistura SMA 14-1.O onde se obteve um valor de 100 % (101 %). No que concerne ao *IRC*, observou-se idêntico comportamento com o *IRC* a variar entre 84 % e 88 %, sendo exceção a mistura SMA 12.O (79 %) para a qual se aplicaram 20 pancadas em cada topo do provete. Constatou-se ainda, que para todas as misturas SMA avaliadas o valor de *ITSR* de cada mistura SMA foi superior ao respetivo valor determinado de *IRC*.

Quando comparados os resultados obtidos para as misturas SMA, relativamente à mistura de controlo (AC 14 surf 35/50), verificou-se que apenas no caso da SMA 12.O para a qual se aplicaram 20 pancadas em cada topo do provete se observou um valor de *ITSR* inferior ao da mistura de controlo. Apesar dos provetes apresentarem uma porosidade de cerca de 10,6 % o valor da resistência conservada contínua é apenas ligeiramente inferior ao recomendado no Quadro 4.4, relativo às propriedades recomendadas para as misturas SMA a aplicar em Portugal (*ITSR*₈₀). Relativamente ao *IRC* os valores obtidos para as SMA foram semelhantes aos que se observaram na mistura de controlo, sendo inferiores à mistura de controlo no caso da SMA 14-2 e da SMA 12.O para a qual se aplicaram 20 pancadas em cada topo do provete.

Na Figura 6.27 e Figura 6.28 verifica-se que a obtenção de um menor índice de resistência (*IRC*) relativamente à resistência conservada em tração indireta (*ITSR*) para todas as misturas SMA diferiu dos resultados que por vezes têm sido obtidos em outros estudos (Batista *et al.*, 2008; Batista e Antunes, 2009) para misturas betuminosas do tipo betão betuminoso e misturas betuminosas drenantes. Nos estudos indicados, à semelhança da mistura de controlo escolhida no presente estudo, verificou-se uma diminuição do valor de *ITSR* relativamente ao correspondente valor de *IRC*.

Tal pode estar relacionado com o facto das misturas SMA terem um mastique betuminoso rico em betume, o que pode contribuir para um aumento da sensibilidade à água dos provetes para um aumento da temperatura de ensaio (de 15 °C para 60 °C) consequência de uma diminuição da rigidez do mastique betuminoso. Tal conclusão parece estar em linha com o que foi observado para o tipo de rotura observada nos provetes avaliados (ver Anexo III), onde os resultados demonstram não existir deficiências significativas no revestimento e uma reduzida expressão de agregados fraturados ou esmagados nos provetes ensaiados, pelo que a rotura durante o ensaio tende a ocorrer, portanto, essencialmente na ligação entre o mastique betuminoso e os agregados grossos.

Se analisados os resultados comparativamente ao que é recomendado no Quadro 4.4 para as propriedades das misturas SMA a utilizar em Portugal, concluiu-se que todas as misturas SMA avaliadas asseguram o limite recomendado de 80 % para o *ITSR*, sendo considerado possível quando existente um maior conhecimento a nível nacional sobre as misturas SMA, de tornar mais restritivo o limite a adotar para a sensibilidade à água.

6.7.3 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

— Amostras estudadas —

No ensaio de simulação em pista de laboratório segundo a norma EN 12697-22, os provetes ensaiados, consistiram em lajetas individuais de dimensões 300 mm x 300 mm x 50 mm, que foram fabricadas e compactadas em laboratório através do *roller compactor*, preconizado na norma EN 12697-33. No caso da mistura SMA 11 as lajetas foram fabricadas e compactadas em laboratório com amostras de mistura betuminosa recolhida em obra. As misturas betuminosas utilizadas apresentam uma composição baseada nas fórmulas de trabalho definidas aquando dos respetivos estudos de formulação.

— Apresentação e análise de resultados —

No presente ponto apresenta-se uma compilação dos resultados dos ensaios para avaliação da resistência à deformação permanente realizados sobre as misturas SMA 11, SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2 (Quadro 6.31 e Figura 6.29) utilizando para o efeito um equipamento de simulação em pista de pequenas dimensões, mundialmente conhecido por *wheel-tracking*, segundo o método de acondicionamento dos provetes ao ar (método B), preconizado na norma EN 12697-22. Adicionalmente, na Figura 6.29 são ainda representados os resultados obtidos para a SMA 14-1.O avaliada no estudo realizado pela Pragosa S.A., assim como da mistura adotada de controlo obtida do estudo realizado por Pimentel (2013).

Quadro 6.31 – Compilação dos resultados dos ensaios da resistência à deformação permanente segundo a norma EN 12697-22

Identificação das misturas betuminosas	Resultados obtidos (valores médios)				
	Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_V (%)	Deformação máxima (profundidade de rodeira a 10000 ciclos), RD_{AIR} (mm)	Taxa de deformação, WTS_{AIR} (mm/10 ³ ciclos)	Percentagem de profundidade de rodeira a 10000 ciclos, PRD_{AIR} (%)
SMA 11	2,483	5,1	2,4	0,06	4,9
SMA 12.O	2,432	4,0	2,3	0,05	4,7
SMA 14-1.O	2,578	1,5	6,0	0,17	12,1
SMA 14-1.PR ¹⁾	2,319 ²⁾	-	2,7	0,07	4,3
SMA 14-2	2,344	3,5	2,3	0,06	4,7

Legenda: 1) mistura SMA avaliada no estudo de formulação da Pragosa, S.A.; 2) baridade geométrica

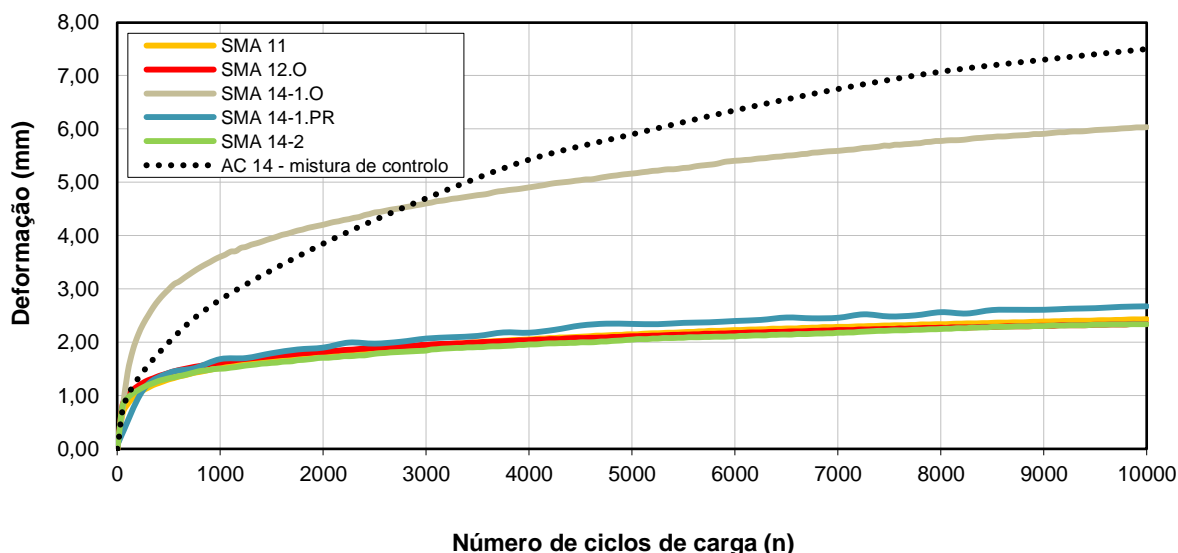


Figura 6.29 – Compilação das curvas obtidas para a resistência à deformação permanente segundo a norma EN 12697-22

Segundo a análise do Quadro 6.31 e da Figura 6.29 verificou-se que as misturas SMA avaliadas, tendem a ter um comportamento à deformação permanente muito semelhante, apresentando uma

deformação máxima (profundidade de rodeira a 10000 ciclos), variável entre 2,3 mm e 2,7 mm, sendo exceção a mistura SMA 14-1.O com um valor de 6,0 mm. Relativamente à taxa de deformação, os valores variaram entre 0,05 e 0,07 mm/10³ ciclos, sendo mais uma vez exceção a SMA 14-1.O com um valor de 0,17 mm/10³ ciclos. No que concerne à percentagem de profundidade de rodeira a 10000 ciclos, os valores variaram entre 4,3 % e 4,9 %, excetuando a SMA 14-1.O com um valor de 12,1 %. Um comportamento relativamente distinto da mistura SMA 14-1.O pode estar eventualmente relacionado com a utilização de um excesso de material no fabrico das lajetas ou com a utilização de um fíler distinto, contribuindo assim para um aumento da instabilidade estrutural da mistura SMA.

Apesar da menor resistência à deformação permanente apresentada pela mistura SMA 14-1.O relativamente às restantes misturas SMA avaliadas, verifica-se que a mesma, ainda assim, apresentou um melhor comportamento que o evidenciado pela mistura de controlo escolhida (AC 14 surf 35/50), que apresentou os seguintes resultados no que concerne à deformação máxima (cerca de 7,5 mm), taxa de deformação (0,35 mm/10³ ciclos) e percentagem de profundidade de rodeira (19,2 %).

Se comparados os resultados obtidos para as diversas misturas SMA relativamente à mistura de controlo, constatou-se que as misturas SMA têm uma elevada resistência à deformação permanente, apesar de utilizarem uma maior percentagem de betume comparativamente à mistura de controlo (5,0 %).

Do mesmo modo se analisados os resultados comparativamente ao que é recomendado no Quadro 4.4 para as propriedades das misturas SMA a utilizar em Portugal, concluiu-se que todas as misturas SMA avaliadas asseguram os limites recomendados. Os estudos a realizar deverão contemplar a avaliação de misturas SMA com betumes convencionais como forma de minimizar o efeito do betume na resistência à deformação permanente.

O bom desempenho à deformação permanente evidenciado pela SMA 12.O, corrobora a análise efetuada no ponto 5.4 e demonstra que uma eventual avaliação do efeito de *stone-on-stone* entre provetes compactados para diferentes energias de compactação deve basear-se numa análise comparativa das baridades dos provetes em detrimento da comparação das suas porosidades.

6.7.4 AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE E RESISTÊNCIA AO FENDILHAMENTO POR FADIGA

— Amostras estudadas —

No ensaio de avaliação do módulo de deformabilidade e do fendilhamento por fadiga segundo a norma EN 12697-26 e EN 12697-24, respetivamente, os provetes a ensaiar, consistiram em amostras de mistura betuminosa fabricada e compactada em laboratório através do *roller compactor*, preconizado na norma EN 12697-33. Das lajetas fabricadas foram obtidos por corte, conjuntos de provetes prismáticos com cerca de 50 mm de altura, 50 mm de largura e 400 mm de comprimento.

No caso da mistura SMA 11 as lajetas foram fabricadas e compactadas em laboratório com amostras de mistura betuminosa recolhida em obra. Adicionalmente, com o objetivo de avaliar a resistência à fadiga da SMA 12.O aplicada no trecho experimental procedeu-se à recolha de quatro lajetas de mistura SMA compactada após seis meses da sua aplicação (Figura 6.13), das quais se obteve por corte um conjunto de 20 provetes prismáticos. As diversas misturas betuminosas utilizadas apresentam uma composição baseada nas fórmulas de trabalho definidas aquando dos respetivos estudos de formulação.

— Apresentação e análise de resultados —

No Quadro 6.32 apresenta-se uma análise dos resultados do ensaio para avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga e do módulo de deformabilidade (SMA 11, SMA 12.O e SMA 14-1.O), aferidos com equipamentos de flexão em quatro pontos a extensão controlada de acordo com o procedimento preconizado nas normas EN 12697-24 e EN 12697-26, respetivamente. Adicionalmente, na Figura 6.30 e Figura 6.31 efetua-se, respetivamente, uma representação dos resultados apresentados no Quadro 6.32, relativos à evolução do módulo de deformabilidade para diferentes frequências e das leis de fadiga das misturas SMA, assim como de uma mistura adotada como mistura de controlo obtida do estudo realizado por Pimentel (2013). Como complemento no Anexo III são apresentados de forma detalhada os resultados obtidos.

Os ensaios para avaliação do módulo de deformabilidade foram realizados à temperatura de 20 °C, para cada uma das frequências de carregamento aplicadas (ver ponto 6.2). Relativamente aos ensaios para avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga das misturas SMA foram realizados para a mesma temperatura (20 °C) em extensão controlada, aplicando um carregamento sinusoidal com uma frequência de 10 Hz. Os valores da extensão imposta nos ensaios variaram entre 300×10^{-6} e 700×10^{-6} .

Quadro 6.32 – Compilação dos resultados dos ensaios da resistência ao fendilhamento por fadiga e do módulo de deformabilidade segundo a norma EN 12697-24 e EN 12697-26

Identificação das misturas betuminosas	Resultados obtidos a 20 °C								Inclinação da lei de fadiga, p
	Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_v (%)	Módulo de deformabilidade médio (MPa)					ϵ_6 ($\times 10^{-6}$ m/m)	
			1 Hz	4 Hz	8 Hz	10 Hz	30 Hz		
SMA 11	2,470	5,6	2067	3050	3673	3908	5140	273	-6,9
SMA 12.O ¹⁾	2,274	10,2	2757	3801	4374	4571	5537	230	-5,6
SMA 12.O ²⁾	2,420	4,4	1534	2460	3017	3181	4273	337	-8,6
SMA 14-1.O	2,588	1,1	1643	2845	3559	3827	5173	525	-11,0
Média	2,416	5,3	2000	3039	3656	3872	5031	341	-8,0
Desvio padrão (σ)	0,130	3,8	554	564	558	568	536	130	2,3
Coefficiente de variação (%)	5,4	70,7	27,7	18,6	15,3	14,7	10,7	38,1	29,1

Legenda: 1) provetes obtidos de lajetas recolhidas no trecho experimental; 2) provetes fabricados e compactados em laboratório

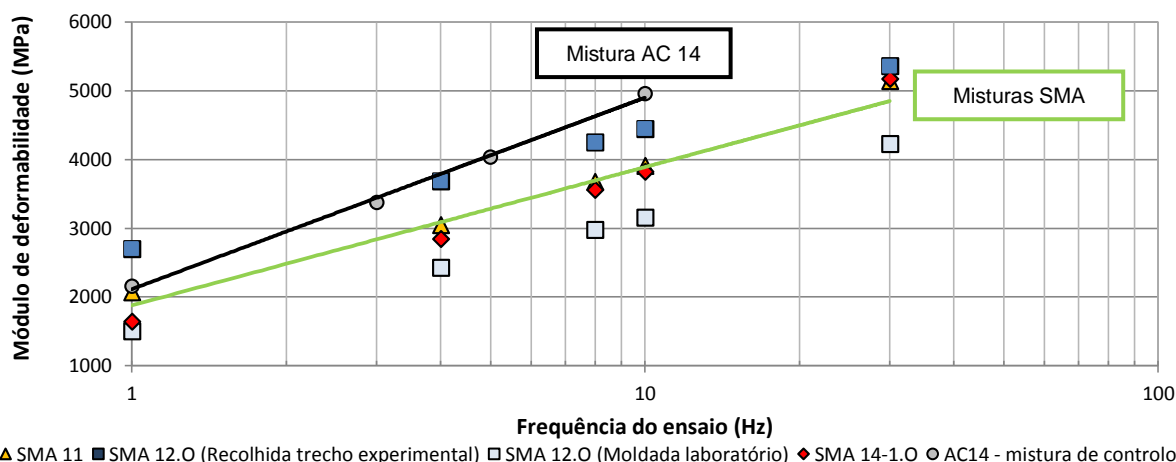


Figura 6.30 – Evolução do módulo de deformabilidade para diferentes frequências (misturas SMA 11, SMA 12.O e SMA 14-1.O e mistura de controlo AC14)

Segundo a Figura 6.30, observou-se que as vigas ensaiadas das misturas SMA 11, SMA 12.O e SMA 14-1.O apresentaram um comportamento distinto entre si na avaliação do módulo de deformabilidade, com um coeficiente de variação máximo de 27,2 %. Foi ainda possível constatar que as misturas SMA apresentaram geralmente para todas as frequências um módulo de deformabilidade inferior ao que foi observado para a mistura de controlo (AC14 surf 35/50). A mistura AC14 apresentou para uma frequência de 10 Hz, um módulo de deformabilidade de cerca de 5000 MPa, comparativamente a cerca de 3800 MPa para as diversas misturas analisadas. O valor do módulo de deformabilidade para as diversas misturas SMA para uma frequência de 10 Hz variou entre cerca de 3150 MPa e 4600 MPa.

É ainda possível constatar que das diversas misturas SMA analisadas a que menor e maior módulo de deformabilidade apresentou para as diversas frequências foi a mistura SMA 12.O fabricada em laboratório e a SMA 12.O recolhida no trecho experimental, respetivamente.

Na Figura 6.31 apresentam-se as leis de fadiga obtidas nos ensaios com provetes de misturas SMA 11, SMA 12.O e SMA 14-1.O. Adicionalmente, são apresentadas as leis de fadiga referentes a duas misturas betuminosas [mistura de controlo, AC14 surf 35/50 (Pimentel, 2013) e uma mistura de alto desempenho, MBR-BBA com 18 % de borracha e cerca de 7,0 % de betume, mistura aplicada em 1999 na primeira obra realizada com BBA em Portugal].

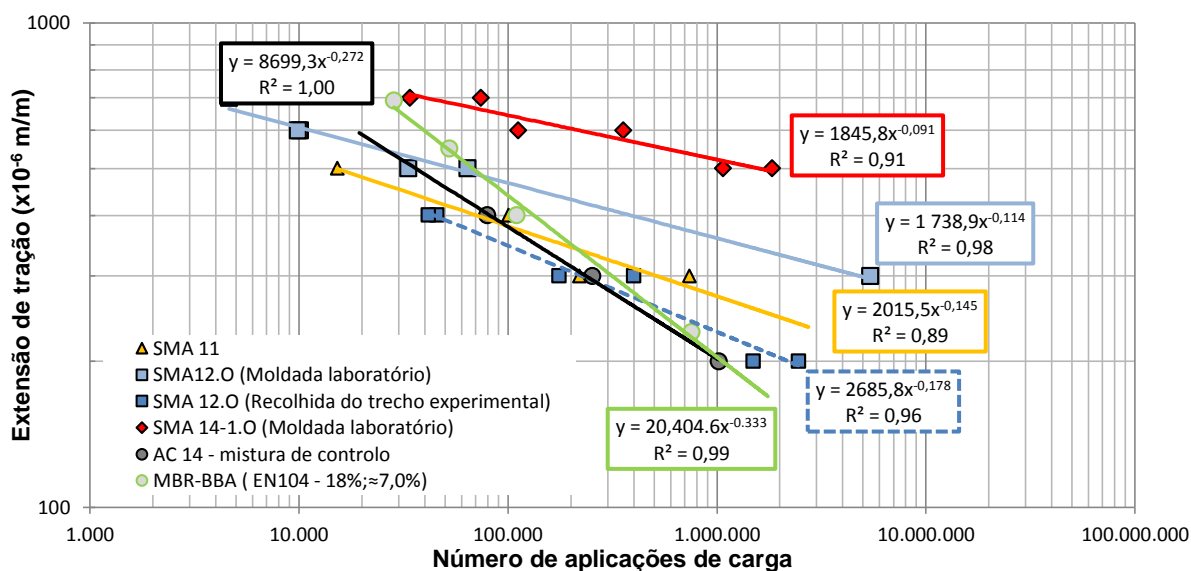


Figura 6.31 – Leis de fadiga das misturas SMA 11, SMA 12.O e SMA 14-1.O, mistura de controlo (AC 14) e MBR-BBA

Da análise da Figura 6.31 e do Quadro 6.32, verificou-se que a mistura a SMA 14-1.O fabricada e compactada em laboratório corresponde à mistura que melhor comportamento à fadiga apresentou das diversas misturas SMA avaliadas, com uma extensão de tração para um milhão de aplicações de carga (ϵ_6) de aproximadamente 525×10^{-6} , comparativamente a 337×10^{-6} para a SMA 12.O. No que concerne ao andamento das leis de fadiga, nos ensaios efetuados a 10 Hz, a inclinação das leis de fadiga (p) da mistura SMA 12.O e SMA 14-1.O ensaiadas foi de cerca de -8,6 e -11,0.

Todas as restantes misturas SMA (SMA 11 e SMA 12.O, correspondentes a provetes obtidos de lajetas recolhidas no trecho experimental) apesar de exibirem um bom comportamento à fadiga relativamente à mistura de controlo (AC 14 surf 35/50) e à MBR-BBA com 18 % de borracha e cerca de 7,0 % de betume, apresentaram uma extensão de tração para um milhão de aplicações de carga de aproximadamente 273×10^{-6} e 230×10^{-6} , respetivamente. Como possíveis causas para uma diminuição

do valor do ε_6 , pode-se indicar o facto dos provetes avaliados apresentarem uma elevada porosidade o que contribuiu naturalmente para uma diminuição da vida à fadiga das misturas betuminosas. Isso mesmo pode ser constatado na Figura 6.32 onde se apresenta para a mistura SMA 11, SMA 12.O e SMA 14-1.O a variação da extensão de tração para um milhão de aplicações de carga em função da porosidade da mistura SMA.

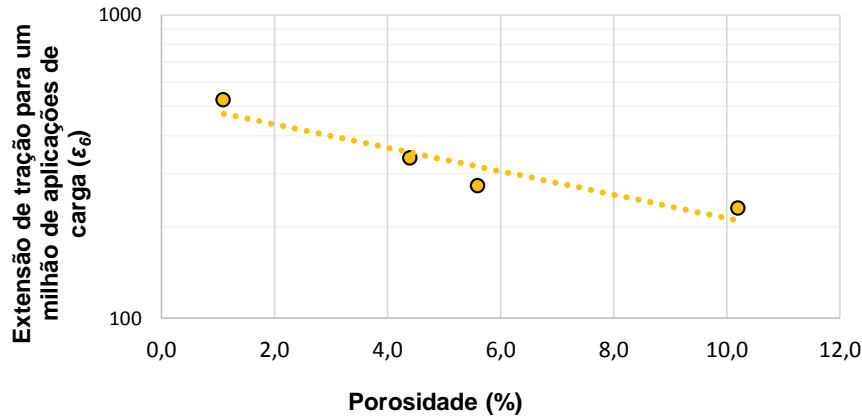


Figura 6.32 – Variação da extensão de tração para um milhão de aplicações de carga em função da porosidade

Relativamente ao andamento das leis de fadiga, verifica-se que nos ensaios efetuados a 10 Hz a inclinação das leis de fadiga (ρ) das misturas SMA avaliadas variou de -5,6 até -11,0 aumentando com a diminuição do volume de vazios da mistura betuminosa. Ainda assim os valores determinados para a inclinação das leis de fadiga foram geralmente superiores ao observado para a mistura de controlo e para a mistura MBR-BBA.

6.8 CONCLUSÕES

Apresentam-se seguidamente as principais conclusões obtidas na presente fase do estudo experimental (Fase 2) realizado sobre misturas SMA com fibras celulósicas relativas à formulação e à avaliação do desempenho, nomeadamente da avaliação do escorrimento de material betuminoso, sensibilidade à água, resistência à deformação permanente e fendilhamento por fadiga.

O estudo da formulação das misturas SMA (SMA 12.O e SMA 14-2) com fibras celulósicas permitiu obter as seguintes conclusões principais:

- apesar da utilização de fusos, habitualmente definidos em países onde a aplicação de misturas SMA é comum e apesar de adicionalmente aos fusos ser por vezes requerida a utilização de uma percentagem de betume igual ou superior a 6,0 %, verificou-se ser, contudo, difícil alcançar esse objetivo. De acordo com os estudos realizados, foi possível constatar que a simples definição de uma curva granulométrica que se insira dentro dos limites especificados para um determinado fuso de uma SMA não é por si só garantia de se obter uma mistura SMA, que permita a utilização de uma elevada percentagem de betume (superior a 6,0 %) e/ou que apresente um desempenho adequado;
- tal constatação corrobora a necessidade de se adquirir um maior conhecimento sobre a formulação e comportamento das misturas SMA. Esta constatação transcende inclusive o presente estudo, verificando-se que nas aplicações de SMA realizadas em estradas a nível

nacional (Martinho *et al.*, 2013), a percentagem de betume que tem sido habitualmente utilizada varia entre 5,5 % e 6,0 %, independentemente dos fusos ou percentagem de fibras utilizados;

- apesar das percentagens ótimas de betume utilizadas no presente estudo estarem de acordo com o que é proposto no Quadro 3.15, para as percentagens mínimas de betume a adotar numa SMA em Portugal, considera-se pertinente compreender se é possível a utilização de maiores percentagens de betume para os materiais utilizados e se esse aumento contribui para uma melhoria do desempenho das misturas SMA.

No que concerne à avaliação do desempenho, a avaliação do escorrimento de material betuminoso das misturas SMA (SMA 12.O, SMA 14-1, SMA 14-2) permitiu obter as seguintes conclusões principais:

- considerando o valor limite habitualmente definido internacionalmente para o valor do escorrimento de material betuminoso (D) igual a 0,3 % relativamente à massa total da mistura betuminosa, propõe-se estimar a percentagem mínima de fibras celulósicas segundo a equação (5.2) proposta no presente estudo para um $D \leq 0,2$ %. A utilização de um limite de escorrimento de 0,2 % visa mitigar a possibilidade de ocorrência de um escorrimento de material desadequado;
- a equação (5.2) pode contribuir para apoiar os utilizadores na formulação de uma mistura SMA, através da estimativa de uma percentagem de fibras celulósicas que permita maximizar a binómio benefício/custo no que concerne à mitigação do escorrimento de material betuminoso.

Relativamente à avaliação da sensibilidade à água para as misturas SMA (SMA 11, SMA 12.O, SMA 14-1 e SMA 14-2), podem ser retiradas as seguintes conclusões principais:

- os resultados obtidos mostraram que as diferentes misturas SMA tendem a apresentar valores semelhantes entre si no que concerne ao índice de resistência conservada a 60 °C (*IRC*) e à resistência conservada em tração indireta a 15 °C (*ITSR*). Quando comparados os resultados entre os dois métodos e ensaio, verificou-se que os valores de *ITSR* [88 % a 100 % (101 %)] são superiores aos respetivos valores determinados de *IRC* (79 % a 88 %) para cada mistura SMA;
- as misturas SMA apresentaram um melhor comportamento no que concerne ao *ITSR*, relativamente à mistura de controlo (AC 14 surf 35/50). Relativamente ao *IRC*, o comportamento das misturas SMA foi semelhante ao que se observa para a mistura de controlo;
- cada mistura SMA tende a apresentar um menor *IRC* comparativamente ao *ITSR*, ao contrário do que é habitualmente obtido para outros tipos de misturas (misturas betuminosas do tipo betão betuminoso e misturas betuminosas drenantes) como evidenciam outros estudos (Batista *et al.*, 2008; Batista e Antunes, 2009). Tal, pode estar relacionado com o facto das misturas SMA terem um mastique betuminoso rico em betume, o que contribui para um aumento da sensibilidade à água dos provetes para um aumento da temperatura de ensaio (de 15 °C para 60 °C) consequência de uma diminuição da rigidez do mastique betuminoso. A conclusão anterior parece estar em linha com o que foi constatado para o tipo de rotura observada nos provetes avaliados. Os resultados demonstram não existir deficiências significativas no revestimento e uma reduzida expressão de agregados fraturados ou esmagados nos provetes ensaiados, pelo que a rotura durante o ensaio tende a ocorrer, portanto, essencialmente na ligação entre o mastique betuminoso e os agregados grossos. Do mesmo modo as conclusões obtidas evidenciam a importância de compreender qual composição do mastique betuminoso a utilizar numa SMA, situação que se avalia

posteriormente através do conceito proposto no presente trabalho de *mastic-within-stone*, no capítulo 8;

- os resultados obtidos enquadram-se no que é proposto no Quadro 4.4 para as propriedades das misturas SMA a utilizar em Portugal, com todas as misturas SMA avaliadas a assegurarem um limite mínimo recomendado de 80 % para o *ITSR*. Considera-se possível, quando existente um maior conhecimento a nível nacional sobre as misturas SMA, de tornar mais restritivo o limite a adotar para a sensibilidade à água.

Dos ensaios realizados para a avaliação da resistência à deformação permanente a 60 °C das misturas SMA 11, SMA 12.O, SMA 14-1 e SMA 14-2, é possível obter as seguintes conclusões principais:

- as diversas misturas SMA avaliadas apresentaram um comportamento à deformação permanente muito semelhante entre si, sendo exceção o caso da mistura SMA 14-1.O. Este facto pode eventualmente estar relacionado com a utilização de um excesso de material no fabrico das lajetas ou da utilização de um fíler distinto, contribuindo assim para um aumento da instabilidade estrutural da mistura SMA;
- constatou-se que todas as misturas SMA apresentaram relativamente à mistura de controlo (AC 14 surf 35/50) uma elevada resistência à deformação permanente, apesar de adotarem uma maior percentagem de betume (5,5 % a 6,0 %) comparativamente à mistura de controlo (5,0 %);
- as misturas SMA avaliadas asseguram os limites propostos no Quadro 4.4 para as propriedades das misturas SMA a utilizar em Portugal, sendo considerado possível quando existente um maior conhecimento a nível nacional sobre as misturas SMA de tornar mais restritivos os limites a adotar para a deformação permanente.

A avaliação do módulo de deformabilidade e resistência ao fendilhamento por fadiga (ensaios realizados a 20 °C) das misturas SMA 11, SMA 12.O, SMA 14-1 permitiu obter as seguintes conclusões principais:

- os módulos de deformabilidade determinados para as diversas misturas SMA a diversas frequências (1, 4, 8, 10 e 30 Hz) são geralmente inferiores aos observados para a mistura de controlo (AC14 surf 35/50). A mistura AC14 apresenta, para uma frequência de 10 Hz, um módulo de deformabilidade de cerca de 5000 MPa, comparativamente a um valor médio de cerca de 3800 MPa para as misturas SMA analisadas. O valor do módulo de deformabilidade das misturas SMA para uma frequência de 10 Hz variou entre cerca de 3150 MPa e 4600 MPa;
- todas as misturas SMA avaliadas exibiram um bom comportamento à fadiga com uma extensão de tração para um milhão de aplicações de carga (ϵ_6) variável entre 230×10^{-6} e 525×10^{-6} , relativamente à mistura de controlo (AC 14 surf 35/50) e à MBR-BBA com 18 % de borracha e cerca de 7,0 % de betume, as quais apresentam um ϵ_6 de aproximadamente 200×10^{-6} ;
- as misturas SMA 12.O e SMA 14-1.O fabricadas e compactadas em laboratório correspondem às misturas que melhor comportamento à fadiga apresentaram das diversas misturas SMA avaliadas, com um ϵ_6 de aproximadamente 337×10^{-6} e 525×10^{-6} , respetivamente;
- relativamente ao andamento das leis de fadiga, verificou-se que nos ensaios efetuados a 10 Hz, a inclinação das leis de fadiga (p) da mistura SMA ensaiada variaram de -5,6 até -11,0, tendendo a aumentar com a diminuição do volume de vazios da mistura betuminosa. Ainda assim, os valores determinados para a inclinação das leis de fadiga são geralmente superiores ao observado para a mistura betuminosa convencional e para a mistura MBR-BBA.

7 AVALIAÇÃO DO EFEITO DE *STONE-ON-STONE* (FASE 3)

7.1 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Na presente fase do estudo experimental (Fase 3) é avaliada e proposta uma metodologia para compactação das partículas ativas em laboratório para se assegurar o efeito de *stone-on-stone* no processo de formulação. A avaliação consiste na determinação da baridade e respetivo volume de vazios existente entre as partículas ativas através de diferentes métodos de compactação. O estudo considera ainda, para cada método de compactação, a avaliação da quebra de agregado que ocorre nas partículas ativas, através do acréscimo de material passado no peneiro de referência comparativamente ao que sucede em obra. Os métodos de compactação estudados são posteriormente avaliados quanto à sua adequabilidade para incorporar a proposta de metodologia analítica para formulação da composição volumétrica de misturas SMA, pressupondo a obtenção do efeito de *stone-on-stone*, independentemente do método de compactação de partículas ativas escolhido.

No Quadro 7.1 são apresentadas as misturas SMA cujos materiais granulares foram avaliados na presente fase, assim como a respetiva avaliação realizada.

Quadro 7.1 – Agregados das SMA utilizados na terceira fase do estudo experimental e tipo de avaliação realizada

Fase do estudo experimental	Avaliação realizada	Agregados utilizados das misturas SMA		
		SMA 12.0	SMA 14-1.0	SMA 14-2
3. ^a	3.1	■	■	■
	3.2	■	■	■
	3.3	■	■	
	3.4	■	■	■

A caracterização dos agregados das misturas SMA foi realizada nas instalações do Núcleo de Infraestruturas Rodoviárias e Aeroportuárias do Departamento de Transportes do LNEC.

7.2 AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE COMPACTAÇÃO DAS PARTÍCULAS ATIVAS (“AGREGADOS GROSSOS”)

Segundo as conclusões apresentadas no ponto 6.8, a utilização de fusos granulométricos pré-definidos de países onde é comum a aplicação de misturas SMA, não garante, por si só, que a utilização de misturas SMA formuladas dentro dos seus limites, apresentem um comportamento adequado ou uma elevada percentagem de betume com o intuito de otimizar o desempenho das misturas SMA. Assim considerando a revisão bibliográfica realizada no capítulo 4, verifica-se existir uma tendência para a introdução do conceito de *stone-on-stone* para a formulação das misturas SMA, como forma de maximizar o contacto entre as partículas ativas (“agregados grossos”).

A utilização de uma estrutura pétreia caracterizada por contacto do tipo *stone-on-stone* conduz a que resistência à deformação permanente seja assegurada principalmente pelas propriedades dos agregados e não tanto pelas propriedades do betume, ao contrário do que sucede no caso específico das misturas betuminosas convencionais.

Um dos métodos propostos para avaliar o efeito de *stone-on-stone* consiste no ensaio de compactação com o varão, como descrito no ponto 4.3. O método desenvolvido permite avaliar o volume de vazios existente entre as partículas ativas. De acordo com o que foi referido no ponto 3.2.4 (Quadro 3.5), a definição de partícula ativa decorre do peneiro de referência que seja utilizado, de acordo com a dimensão máxima nominal dos agregados a utilizar numa mistura SMA.

Tendo em consideração que as dimensões das malhas dos peneiros indicados no Quadro 3.5 (1,18 mm, 2,36 mm e 4,75 mm) não se encontram contemplados nas normas europeias pelo que importa definir quais os novos peneiros de referência a utilizar. Segundo a norma de produto EN 13108-5 relativa às misturas SMA, são especificados diferentes limites gerais para a composição granulométrica da mistura de agregados, em função da abertura do peneiro superior que pode reter material (D), e da série de peneiros utilizada na análise granulométrica (série “base+1” ou série “base+2”). Para a gama de peneiros indicados no Quadro 3.5, são passíveis de serem utilizados de acordo com as normas europeias os peneiros indicados no Quadro 7.2.

Quadro 7.2 – Peneiros série “base+1” ou série “base+2” segundo a norma EN 13108-5

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (mm)	
Série “base+1”	Série “base+2”
11,2	10
8	8
5 (5,6)	6 (6,3)
4	4
2	2
1	1
0,500	0,500
0,250	0,250
0,125	0,125
0,063	0,063

Segundo a revisão bibliográfica observou-se que o rácio entre a partícula que cabe no vazio criado e a partícula que cria o vazio tende a variar entre cerca de 0,16 e 0,29 numa análise 2D e entre 0,15 e 0,42 para uma análise 3D. Sendo considerado adequado que para o tipo de mistura betuminosa o valor médio esteja compreendido entre 0,26 e 0,29. Nesse sentido no Quadro 7.3 apresenta-se para os peneiros disponíveis no Quadro 7.2, a informação dos peneiros de referência especificados em função da dimensão máxima nominal do agregado pela NAPA (1999), (para o método de avaliação do efeito de *stone-on-stone*) e por Vavrik, *et al.* (2002) para os peneiros a utilizar no método de Bailey (descrito no ponto 3.2.4 e 4.5.3). Complementarmente é efetuada uma análise do rácio entre a dimensão do peneiro de referência utilizado e a dimensão máxima nominal do agregado da SMA.

Quadro 7.3 – Peneiros de referência adotados internacionalmente comparativamente a peneiros série “base+1” ou série “base+2” segundo a norma EN 13108-5

Dimensão máxima nominal do agregado numa SMA (mm)	EUA - Método do varão		EUA – Método Bailey		Método a propor no presente trabalho	
	Peneiro de referência (mm)	Rácio	Peneiro de referência (mm)	Rácio	Peneiro de referência, série “base+1” ou “base+2” (mm)	Rácio
19 ¹⁾	4,75	0,25	4,75	0,25	4/5,6/6,3	0,21/0,29/0,33
14 ²⁾	4,75	0,34	2,36	0,17	2/4/5,6/6,3	0,14/0,28/0,40/0,45
12 (12,5) ¹⁾	4,75	0,38	2,36	0,19	2/4	0,16/0,32
11 ²⁾	2,36/4,75	0,21/0,43	2,36	0,21	2/4	0,18/0,36
9,5 ¹⁾	2,36	0,25	2,36	0,25	1/2/4	0,10/0,21/0,42
4,75 ¹⁾	1,18	0,25	1,18	0,25	1/2	0,21/0,42

Legenda: 1) Peneiros contemplados nos EUA; 2) Dimensão máxima nominal do agregado utilizado em misturas do presente trabalho

No Quadro 7.3 é possível verificar que o intervalo do rácio varia entre 0,25 e 0,38 no caso dos peneiros definidos para o método do varão para avaliação do efeito de *stone-on-stone* (4,75 mm, 9,5 mm e 12,5 mm). Para o método de Bailey o valor varia entre 0,17 e 0,25. As diferenças observadas decorrem do facto do método proposto para o método do varão, definir peneiros de maior dimensão comparativamente ao especificado no método de Bailey.

Ainda segundo o Quadro 7.3 foi efetuada uma análise para diferentes peneiros contemplados na norma EN 13108-5, verificando-se ser possível contemplar peneiros de referência que apresentam um rácio entre 0,21 e 0,36, o qual está genericamente compreendido nos intervalos definidos para o método do varão e para o método de Bailey.

Tendo como pressuposto, que o método de formulação a desenvolver no presente trabalho, possibilite obter misturas SMA com uma descontinuidade, que permita a obtenção de:

- uma percentagem de partículas ativas adequada para assegurar um efeito de *stone-on-stone*, passível de obter uma elevada resistência à deformação permanente;
- um elevado volume de vazios disponível para o mastique betuminoso;
- uma reduzida permeabilidade da SMA formulada que maximize a sua durabilidade.

Considerando os pressupostos anterior e os peneiros disponíveis na EN 13108-5, no Quadro 7.4 apresentam-se os peneiros de referência propostos para as partículas ativas, função da dimensão máxima nominal dos agregados utilizados no fabrico de uma mistura SMA.

Quadro 7.4 – Proposta de peneiros de referência para definição das partículas ativas

Dimensão máxima nominal do agregado (mm)	Peneiro de referência (mm)
20	4
14	
12 (12,5)	
11	
10	2
8	2
5 (5,6)	1

Com os peneiros de referência propostos no Quadro 7.4 procede-se seguidamente à avaliação do volume de vazios das partículas ativas. Para o efeito foram utilizados diferentes métodos de compactação, com objetivo de permitir uma melhor compreensão da sua influência no volume de vazios obtido e sua adequabilidade para incorporação no método de formulação a propor posteriormente para obtenção do efeito de *stone-on-stone*.

No Quadro 7.5 são apresentados os métodos de compactação utilizados assim como as avaliações realizadas em função dos agregados utilizados.

Quadro 7.5 – Métodos de compactação e materiais utilizados para avaliar a baridade e o volume de vazios nos agregados/partículas ativas

Tipo de compactação	Carga e número de aplicações de carga e de camadas (P;nP;nC)	Fração ou peneiro de referência (mm)	Tipo de agregados		
			SMA 12.O	SMA 14-1.O	SMA 14-2
			Granodioritos	Basaltos	Granitos
Sem compactação	-	Fração completa	■ ¹⁾		■ ³⁾
		2	■		
		4	■	■	■
		4,75	■		
Varão	(-;25x3 camadas)	Fração completa	■ ²⁾		■ ³⁾
		2	■		
		4	■	■	■
		4,75	■		
Proctor	(-;25x3 camadas)	Fração completa	■ ²⁾		
		2	■		
		4	■	■	
		4,75	■		
	(-;50x3 camadas)	4	■		
	(-;75x3 camadas)	4	■		
(-;55x5 camadas)	4	■	■	■	
Proctor modificado com varão	(-;25x3 camadas)	4	■	■	■
Roller compactor	(-;15 passagens com vibração)	Fração completa	■ ²⁾		■ ³⁾
		2	■		
		4	■	■	■
		4,75	■		

Legenda: Avaliação individual da fração 6/10 mm e 0/4 mm e fíler; 2) Avaliação individual da fração 6/10 mm e 0/4 mm; 3) Avaliação individual da fração 0/5 mm

Segundo o Quadro 7.5, diferentes métodos de compactação foram escolhidos para avaliar a baridade e o volume de vazios nos agregados/partículas ativas, como se apresenta seguidamente:

- sem compactação;
- compactação com o varão;
- compactação com o compactador Proctor;
- compactação com o compactador Proctor “modificado” (utilização de pilão desenvolvido e fabricado para simular o varão utilizado no método de compactação com varão);
- compactação com o *roller compactor* utilizando vibração;

Dos vários métodos utilizados/propostos a para avaliação da baridade e volume de vazios, apenas o método sem compactação, se encontra preconizado na norma NP EN 1097-3. Apesar de uma breve referência, a norma indica que a avaliação da baridade e do volume de vazios nos agregados pode ainda ser realizada utilizando compactação, não especificando, contudo qual o método de compactação a utilizar. Nesse sentido procedeu-se à adaptação das condições de ensaio dos restantes métodos de compactação para se cumprir com a norma anteriormente indicada e com o objetivo do presente estudo.

No que concerne aos peneiros de referência, apesar da definição realizada no Quadro 7.4, procedeu-se ainda assim, para os agregados da SMA 12.O, à avaliação da baridade e do volume de vazios considerando os peneiros de malha com dimensão igual a 2 mm, 4 mm e 4,75 mm. Esta avaliação teve como intuito permitir uma melhor compreensão da influência da utilização de diferentes peneiros de referência na baridade e no volume de vazios.

Seguidamente procede-se à descrição dos métodos de compactação utilizados, assim como da respetiva avaliação e resultados obtidos.

— Método sem compactação —

A determinação da baridade e do volume de vazios nos agregados e partículas ativas sem compactação foi realizada considerando o método preconizado na norma NP EN 1097-3. A norma NP EN 1097-3 é especificada para a avaliação da baridade das frações de agregados utilizados numa mistura betuminosa. Contudo, conhecida a baridade e a massa volúmica dos agregados é possível determinar o volume de vazios existentes na estrutura criada pelos agregados, quando colocados no interior de um determinado recipiente metálico.

— Procedimento de ensaio —

A avaliação da baridade e do volume de vazios nos agregados deve seguir a seguinte metodologia de acordo com a NP EN 1097-3:

Utilizando um recipiente metálico com dimensão variável de acordo com a dimensão máxima nominal do agregado a avaliar, procede-se à determinação do seu volume, através do seu enchimento com água, colocando-se posteriormente no topo do recipiente uma placa de vidro de modo a garantir-se a determinação do volume total do recipiente. Posteriormente, devem ser preparadas três amostras da fração de agregados/partículas ativas (previamente secos a $110 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ até se atingir massa

constante), devendo a massa corresponder entre 120 % e 150 % da massa total passível de ser colocada no interior do recipiente sem compactação.

A fase seguinte consiste, em preencher o recipiente individualmente com cada uma das amostras de agregados, devendo o seu preenchimento ser total até os agregados transbordarem para fora do recipiente. Posteriormente a superfície de agregados deve ser nivelada de modo a remover o excesso de agregados acima do topo do recipiente, podendo-se usar, para o efeito, os dedos ou uma régua (como observado na Figura 7.1). O nivelamento deve ser realizado sem que ocorra a compactação dos agregados. A determinação da baridade, assim como do volume de vazios existente na fração de agregados é realizada após pesagem da massa do recipiente com os agregados não compactados.



Figura 7.1 – Nivelamento dos agregados no recipiente

A baridade da fração de agregados deve ser determinada de acordo com a seguinte equação:

$$\rho_{bi} = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (7.1)$$

sendo:

ρ_{bi} – baridade da amostra ensaiada (Mg/m^3);

m_1 – massa do recipiente (kg);

m_2 – massa do recipiente e respetiva amostra de agregados secos (kg);

V – volume do recipiente (L).

O volume de vazios na fração de agregados deve ser determinado de acordo com a seguinte equação:

$$V_{SC} = \frac{\rho_p - \rho_{bmi}}{\rho_p} \cdot 100 \quad (7.2)$$

sendo:

V_{SC} - volume de vazios nos agregados/partículas ativas sem compactação (%);

ρ_p - massa volúmica das partículas de agregado secas (Mg/m^3);

ρ_{bmi} - baridade média das amostras ensaiadas (Mg/m^3).

No presente estudo as equações (7.1) e (7.2) são igualmente utilizadas para avaliar a baridade e o volume de vazios das partículas ativas, respetivamente. Para tal, apenas se utiliza a fração de agregados referentes às partículas ativas (ver Quadro 7.4), ou quando o peneiro de referência tiver uma malha de dimensão igual a 4,75 mm.

— Apresentação e análise de resultados —

No Quadro 7.6 e na Figura 7.2 são apresentados os principais resultados obtidos na avaliação da baridade e do volume de vazios sem compactação dos agregados utilizados nas misturas SMA 12.O, SMA 14-1.O e na SMA 14-2.

Quadro 7.6 – Resultados da avaliação da baridade e volume de vazios sem compactação segundo o método indicado na NP EN 1097-3

Identificação das amostras	Carga e número de aplicações de carga e de camadas (P;nP;nC)	Fração ou peneiro de referência (mm)	Resultados obtidos		
			Baridade (Mg/m^3)	Volume de vazios nos agregados/partículas ativas, V (%)	Acréscimo na percentagem de partículas passadas no peneiro 4 mm (%)
SMA 12.O-SC1	;-;-	Fração 0/4	1,410	46,1	-
SMA 12.O-SC2		Fração 6/10	1,461	46,3	-
SMA 12.O-SC3		2	1,490	45,4	-
SMA 12.O-SC4		4	1,440	47,1	0,0
SMA 12.O-SC5		4,75	1,438	47,2	-
SMA 14-1.O-SC1		4	1,578	47,0	0,0
SMA 14-2-SC1		Fração 0/5	1,481	44,7	-
SMA 14-2-SC2		4	1,424	46,6	0,0

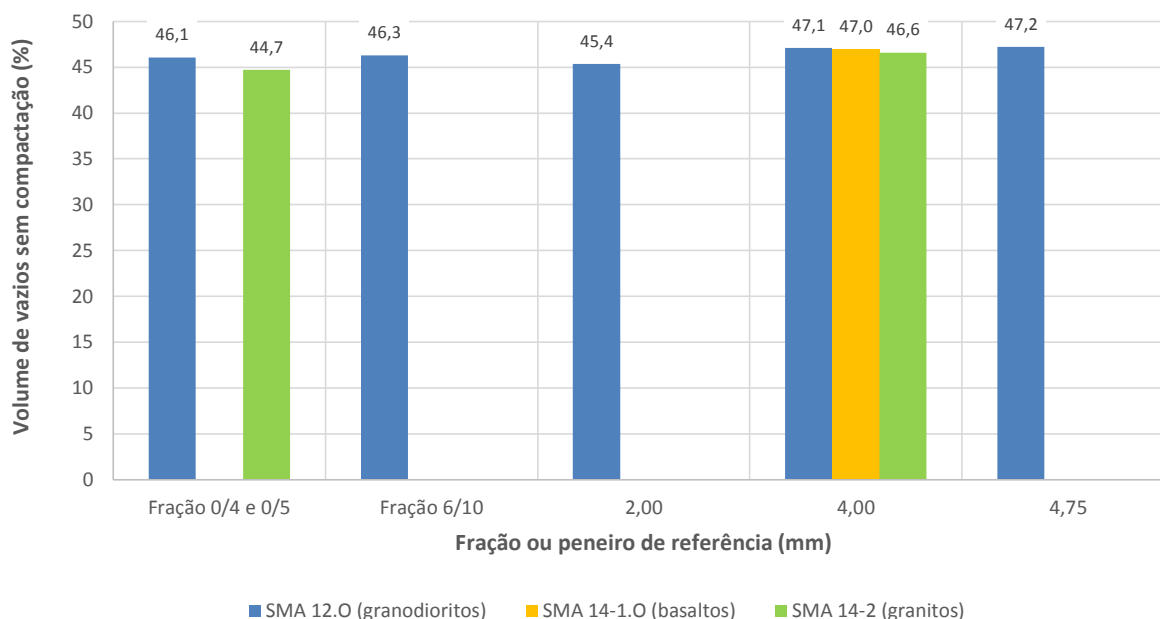


Figura 7.2 – Volume de vazios dos agregados sem compactação (SMA 12.0, SMA 14-1.0 e SMA 14-2)

Da análise do Quadro 7.6 e da Figura 7.2, é possível concluir que para os diversos agregados e frações de agregados avaliados da SMA 12.0 (granodioritos), tende a ocorrer um ligeiro aumento do volume de vazios determinado, à exceção do peneiro de referência 2 mm, para um aumento da dimensão do peneiro de referência utilizado. Quando comparado, para os agregados da SMA 12.0, o volume de vazios obtido para os peneiros de referência de 4 mm e de 4,75 mm relativamente ao volume de vazios da fração 6/10 mm a diferença entre os resultados é inferior a 1,0 %. Para esta reduzida variação pode-se referir o facto da fração grossa utilizada (6/10 mm) conter uma reduzida percentagem de agregados de dimensão inferior aos peneiros de referência. Do mesmo modo a diferença do volume de vazios obtida entre os peneiros de 4 mm e 4,75 mm é de apenas 0,1 %.

Segundo a Figura 7.2 observa-se ainda que o volume de vazios das partículas ativas (≥ 4 mm) para os agregados das misturas SMA 12.0, SMA 14-1.0 e SMA 14-2 (granodioritos, basaltos e granitos, respetivamente) são semelhantes entre si (variável entre 46,6 % e 47,1 %) independentemente da natureza do agregado. O maior volume de vazios foi obtido para os agregados granodioríticos e para os basaltos, 47,1 % e 47,0 %, respetivamente. No caso dos resultados obtidos para a fração 0/4 e 0/5 (granodioritos e granitos) observa-se uma maior variação do volume de vazios variando entre 44,7 % e 46,1 %.

No que concerne à avaliação do acréscimo de partículas no peneiro de referência utilizado (4 mm), este foi nulo para todas as misturas de agregados.

— Método de compactação com o varão —

Para a avaliação da baridade e do volume de vazios segundo o método de compactação com o varão, foi igualmente utilizada a norma NP EN 1097-3. Nesse sentido, no presente estudo foi realizada uma adaptação do método de avaliação do volume de vazios segundo o método do varão especificado nas normas AASHTO T19 e ASTM C29 (método desenvolvido e utilizado nos EUA para formulação de misturas SMA), à norma NP EN 1097-3.

Da análise das normas, anteriormente referidas, para avaliação do volume de vazios, a principal diferença reside genericamente nas diferentes capacidades dos recipientes metálicos a utilizar, como se apresenta no Quadro 7.7. A norma NP EN 1097-3 especifica ainda que a relação entre a altura interior do recipiente e o seu diâmetro esteja compreendida entre 0,5 e 0,8, sendo as normas americanas omissas relativamente a essa questão.

Quadro 7.7 – Capacidade dos recipientes consoante a norma utilizada (NP EN 1097-3, AASHTO T19 e ASTM C29)

Dimensão máxima nominal do agregado (mm)	Capacidade do recipiente (L)	
	NP EN 1097-3	AASHTO T19 e ASTM C29
4,0	1,0	
12,5		2,8
16,0	5,0	
25,0		9,3
31,5	10,0	
37,5		14,0

Do Quadro 7.7 verifica-se que a capacidade requerida para o recipiente no caso de agregados com dimensão máxima até 12,5 mm é de 2,8 (normas americanas) e de 5,0 litros para a norma NP EN 1097-3, pelo que a representatividade do material avaliado não é condicionada face às normas americanas. No caso de se considerar a dimensão máxima de 14 mm as normas americanas não especificam um valor, contudo se efetuada uma interpolação a capacidade do recipiente deve ser de aproximadamente 4,4 litros, pelo que também nesse caso a representatividade do material avaliado não é condicionada ao utilizar-se o recipiente de 5,0 litros especificado na norma NP EN 1097-3 para agregados com dimensão máxima nominal de 16 mm.

Adicionalmente, as normas americanas requerem que seja utilizado entre 125 % e 200 % da massa total passível de ser colocada no interior do recipiente sem compactação, comparativamente a 120 % a 150 % especificado na NP EN 1097-3, pelo que se utilizou no presente estudo o intervalo entre 125 % e 150 %.

— Procedimento de ensaio —

A avaliação do volume de vazios nos agregados e partículas ativas, no presente estudo, seguiu a metodologia (de acordo com a AASHTO T19 e ASTM C29) apresentada no ponto 4.3 e que seguinte se apresenta com as devidas adaptações à norma NP EN 1097-3:

1. Utilizando um recipiente metálico com dimensão variável, de acordo com a dimensão máxima nominal do agregado a avaliar (ver Quadro 7.7, para a norma NP EN 1097-3), procede-se à determinação do seu volume, como previamente apresentado para o método sem compactação. Posteriormente, devem ser preparadas três amostras da fração de agregados/partículas ativas (previamente secos a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ até se atingir massa constante), devendo a massa corresponder entre 125 % e 150 % da massa total passível de ser colocada no interior do recipiente com compactação.

2. A fase seguinte consiste após determinada a massa do recipiente, em preencher individualmente o recipiente com cada uma das amostras de agregados/partículas ativas, devendo o preenchimento ser realizado em três fases (Figura 7.3). Na primeira fase o recipiente deve ser preenchido até um terço da sua altura total, procedendo-se posteriormente ao nivelamento da superfície de agregados colocados no recipiente. Seguidamente aplicam-se 25 pancadas com um varão na camada de agregados, tendo o cuidado de se distribuir uniformemente as pancadas pela superfície sem nunca se atingir a base do recipiente.

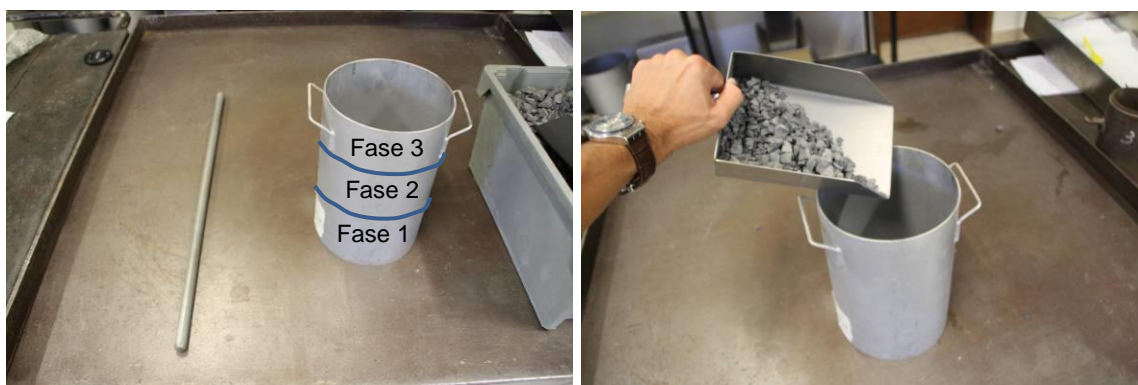


Figura 7.3 – Preenchimento do recipiente no método de compactação com varão

1. Na segunda fase, o recipiente deve ser preenchido até dois terços da sua altura total, procedendo-se mais uma vez ao nivelamento da superfície e respetiva compactação dos agregados com 25 pancadas com um varão.
2. A terceira fase consiste em preencher o recipiente até ultrapassar o seu topo, sendo de novo aplicadas 25 pancadas com um varão. Posteriormente, à semelhança do que é realizado no método sem compactação, a superfície de agregados deve ser nivelada de modo a remover o excesso de agregados acima do topo do recipiente. Para o efeito podem-se utilizar os dedos ou uma régua, tendo o cuidado de evitar a compactação dos agregados. A determinação do volume de vazios nos agregados/partículas ativas (VCA_{DRC}) após a compactação com o varão é realizada após pesagem da massa do recipiente com os agregados compactados.

O VCA_{DRC} deve ser determinado de acordo com a seguinte equação equivalente à equação (4.1), porém adaptada à norma NP EN 1097-3:

$$VCA_{DRC} = \frac{\rho_p - \rho_{bmi}}{\rho_p} \cdot 100 \quad (7.3)$$

sendo:

VCA_{DRC} - volume de vazios nos agregados/partículas ativas compactadas com o varão (%);

ρ_p - massa volúmica das partículas de agregado secas (Mg/m^3);

ρ_{bmi} - baridade média das amostras ensaiadas (Mg/m^3).

— Apresentação e análise de resultados —

No Quadro 7.8 e na Figura 7.4 são apresentados os principais resultados obtidos na avaliação da baridade e do volume de vazios dos agregados compactados com o varão utilizados nas misturas SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2.

Quadro 7.8 – Resultados da avaliação da baridade e volume de vazios (compactação com o varão segundo o método adaptado à NP EN 1097-3)

Identificação das amostras	Carga e número de aplicações de carga e de camadas (P;nP;nC)	Fração ou peneiro de referência (mm)	Resultados obtidos		
			Baridade (Mg/m ³)	Volume de vazios nos agregados/partículas ativas, VCA _{DRC} (%)	Acréscimo na percentagem de partículas passadas no peneiro 4 mm (%)
SMA 12.O-CV1	-; 25; 3	Fração 0/4	1,540	41,1	-
SMA 12.O-CV2		Fração 6/10	1,550	43,0	-
SMA 12.O-CV3		2	1,580	41,9	-
SMA 12.O-CV4		4	1,550	43,0	0,5
SMA 12.O-CV5		4,75	1,540	43,4	-
SMA 14-1.O-CV1		4	1,730	42,0	0,5
SMA 14-2.CV1		Fração 0/5	1,590	40,6	-
SMA 14-2.CV2		4	1,520	43,1	0,5

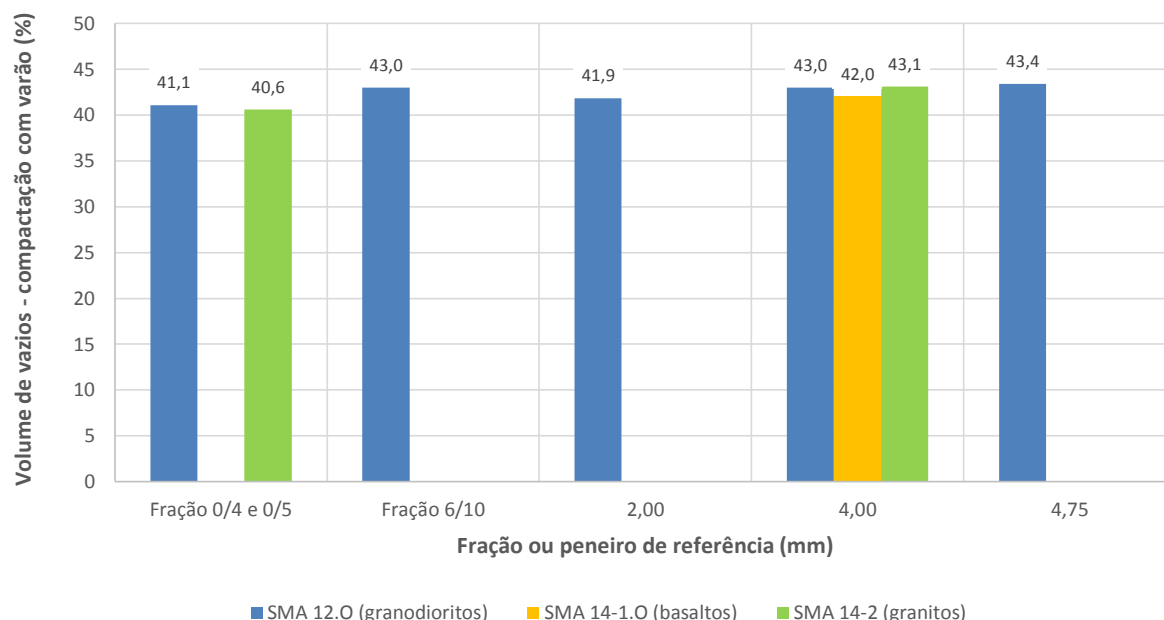


Figura 7.4 – Volume de vazios dos agregados compactados com varão (SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2)

À semelhança do que foi constatado para a avaliação dos agregados sem compactação da SMA 12.O (granodioritos), também se observa no Quadro 7.8 e Figura 7.4, para o método de compactação com o varão uma tendência para um aumento do volume de vazios para um aumento da dimensão do peneiro de referência utilizado, sendo novamente a exceção o peneiro de

dimensão 2 mm. Quando comparadas as diferenças existentes entre a fração 6/10 e as misturas de agregados obtidas dos peneiros de referência verifica-se serem nulas ou diminutas.

Segundo a Figura 7.4 observa-se ainda que o volume de vazios das partículas ativas (≥ 4 mm) para os agregados das misturas SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2 (granodioritos, basaltos e granitos, respetivamente) são semelhantes entre si (variável entre 42,0 % e 43,1 %) independentemente da natureza do agregado. O maior volume de vazios foi obtido para os agregados granodioríticos e para os granitos, 43,0 % e 43,1 %, respetivamente. No caso dos resultados obtidos para a fração 0/4 e 0/5 (granodioritos e granitos) observa-se igualmente uma semelhança entre os volumes de vazios obtidos a variar entre 40,6 % e 41,1 %.

No que concerne à avaliação do acréscimo de partículas no peneiro de referência utilizado (4 mm), este manteve um valor constante de 0,5 % para todas as misturas de agregados.

A avaliação da baridade e do volume de vazios nos agregados/partículas ativas segundo o método de compactação com o varão apresenta como limitação o facto de a compactação ser efetuada de forma manual. Tal limitação pode induzir um aumento na variabilidade dos resultados obtidos, os quais estão dependentes da experiência do técnico que realiza o ensaio. Esta variabilidade decorre da maior ou menor energia, assim da forma como a distribuição das cargas é efetuada sobre a superfície de agregados aquando da compactação. Nesse sentido, considera-se pertinente a proposta de alternativas ao método de compactação com o varão, as quais se apresentam e analisam posteriormente, contribuindo para o desenvolvimento de um método de compactação alternativo para a avaliação do efeito de *stone-on-stone* na formulação das misturas SMA. Como alternativas ao método de compactação com o varão, serão analisadas posteriormente a compactação com o compactador Proctor e com o *roller compactor*.

— Método de compactação com o compactador Proctor —

A proposta de utilização do compactador Proctor para a avaliação da baridade e do volume de vazios nos agregados/partículas ativas prende-se com a similaridade que este método apresenta comparativamente ao método do varão, nomeadamente no que concerne:

- à dimensão dos recipientes utilizados;
- ao tipo de compactação utilizada (por impacto);
- à compactação por camadas e;
- à forma de distribuição das cargas pela superfície dos agregados.

Com o objetivo de simular de forma adequada a compactação com o varão através do Proctor, no presente estudo, procedeu-se ainda ao desenvolvimento e fabrico de pilão com o formato do varão preconizado, nas normas AASHTO T19 e ASTM C29. Na Figura 7.5 é apresentado o aspeto do pilão fabricado para o compactador Proctor, comparativamente ao varão preconizado nas duas normas anteriormente referidas.

O método de compactação que se propõe com o compactador Proctor tem nomeadamente como vantagens relativamente ao varão, o facto de todo o processo de compactação (carga, altura de queda da carga, e sua distribuição na superfície dos agregados) ser mecanizado, ao contrário do método do varão.



Figura 7.5 – Aspeto do pilão desenvolvido e fabricado para simular o varão utilizado no método de compactação com varão

Para a avaliação da baridade e do volume de vazios com o compactador Proctor, foi programado um conjunto de ensaios (de acordo com o Quadro 7.5), para os quais se fez variar a carga e o número de aplicações de carga, assim como o número de camadas a compactar.

O primeiro conjunto de ensaios efetuado para os agregados da SMA 12.O (granodioritos) teve como intuito simular o ensaio de compactação com o varão, utilizando-se para o efeito uma compactação leve (2,49 kg e 30,5 cm de altura de queda) com 25 pancadas por cada uma das três camadas compactadas. No que concerne ao molde utilizado, considerando a dimensão do recipiente utilizado no método do varão, adotou-se o molde de maiores dimensões com alonga, apresentando aproximadamente um diâmetro de 102 mm por uma altura de 114 mm. Referir que com o molde utilizado é respeitada a norma NP EN 1097-3 no que concerne ao volume e à relação entre a altura interior do recipiente e o seu diâmetro (compreendida entre 0,5 e 0,8).

Posteriormente foi realizada a mesma avaliação, porém utilizando o pilão desenvolvido e fabricado para simular o varão como apresentado na Figura 7.5. As condições de ensaio aplicadas foram as mesmas que anteriormente indicadas, tendo a avaliação sido realizada apenas para partículas ativas com dimensão igual ou superior a 4 mm, dada a limitação de materiais disponíveis.

Posteriormente fez-se ainda variar para os agregados da SMA 12.O (granodioritos) a carga aplicada de 25 pancadas para 50 e 75 pancadas por camada, mantendo-se as restantes condições de ensaio. Por último, foi realizado um conjunto de ensaios com compactação pesada (4,54 kg e 47,5 cm de altura de queda) aplicando-se 55 pancadas por cada uma das cinco camadas compactadas. À semelhança do caso anterior a avaliação foi efetuada apenas para partículas ativas com dimensão igual ou superior a 4 mm.

Relativamente à metodologia de ensaio utilizada, a mesma consiste no que havia sido indicado e utilizado anteriormente para o método de compactação com varão (de acordo com a AASHTO 19 e ASTM C29). Do mesmo modo o VCA (VCA_{PC}) após compactação com o Proctor deve ser determinado de acordo com a equação (7.3).

— Apresentação e análise de resultados —

No Quadro 7.9 e na Figura 7.6 são apresentados os principais resultados obtidos na avaliação da baridade e do volume de vazios dos agregados compactados com o Proctor utilizados nas misturas SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2.

Quadro 7.9 – Resultados da avaliação da baridade e volume de vazios (compactação com o compactador Proctor segundo o método adaptado à NP EN 1097-3)

Identificação das amostras	Carga e número de aplicações de carga e de camadas (P;nP;nC)	Fração ou peneiro de referência (mm)	Resultados obtidos		
			Baridade (Mg/m ³)	Volume de vazios nos agregados/partículas ativas, VCA _{PC} (%)	Acréscimo na percentagem de partículas passadas no peneiro 4 mm (%)
SMA 12.O-CP1	2,49; 25; 3	Fração 0/4	1,700	34,8	-
SMA 12.O-CP2		Fração 6/10	1,540	43,4	-
SMA 12.O-CP3		2	1,560	42,7	-
SMA 12.O-CP4		4	1,613	40,8	0,8
SMA 12.O-CP5		4,75	1,530	43,9	-
SMA 12.O-CP6	2,49; 25; 3 ¹⁾	4	1,620	40,4	1,3
SMA 12.O-CP7	2,49; 50; 3		1,640	39,6	3,5
SMA 12.O-CP8	2,49; 75; 3		1,660	39,1	3,8
SMA 12.O-CP9	4,54; 55; 5		1,700	37,5	4,4
SMA 14-1.O-CP1	2,49; 25; 3	4	1,760	40,8	0,8
SMA 14-1.O-CP2	2,49; 25; 3 ¹⁾		1,770	40,5	1,7
SMA 14-1.O-CP3	4,54; 55; 5		1,820	38,9	4,0
SMA 14-2.CP1	2,49; 25; 3 ¹⁾	4 ²⁾	1,530	42,5	2,0
SMA 14-2.CP2	4,54; 55; 5		1,700	36,3	7,6

Legenda: 1) Avaliação utilizando o pilão em formato de varão; 2) Avaliação realizada para o conjunto das frações 4/12 mm e 10//16 mm

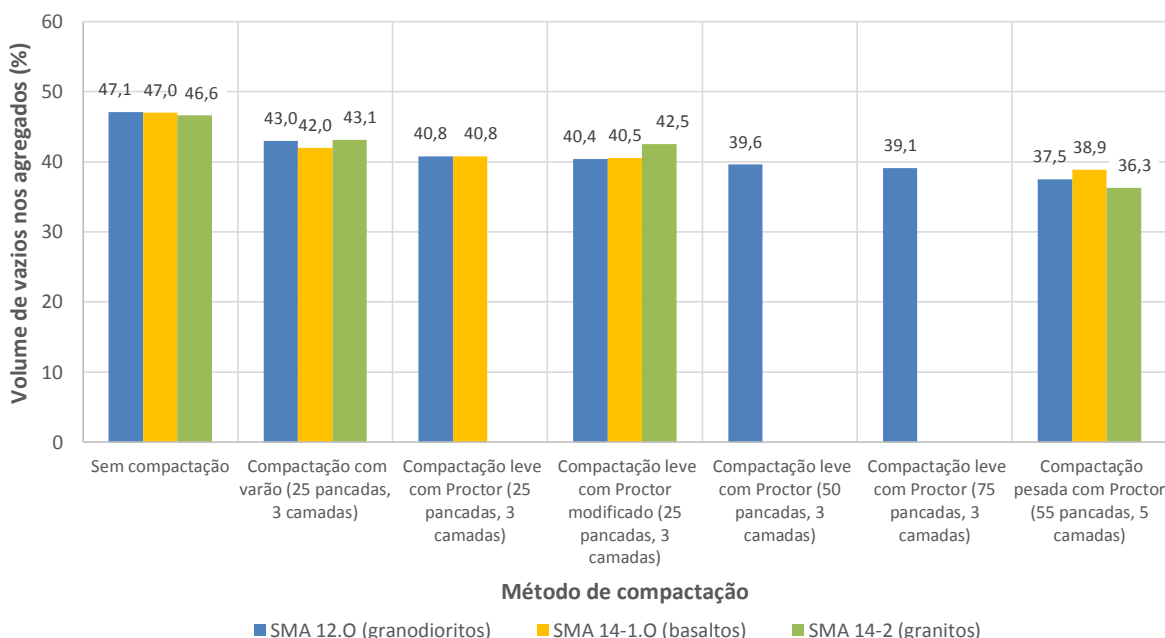


Figura 7.6 – Volume de vazios dos agregados com compactação com o compactador Proctor para o peneiro de referência 4 mm (SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2)

De acordo com o Quadro 7.9, ao contrário do que foi constatado para a avaliação sem compactação e para a compactação com varão dos granodioritos da SMA 12.O, para o método de compactação

com o Proctor (compactação leve com 25 pancadas por cada uma das três camadas a compactar) embora exista uma tendência, não é evidente que ocorra um aumento do volume de vazios para um aumento do peneiro de referência utilizado.

Na Figura 7.6 é possível observar uma análise comparativa entre os diferentes métodos de compactação Proctor utilizados, relativamente aos resultados obtidos sem compactação e com compactação com o varão, considerando o peneiro de referência de 4 mm (peneiro de referência a utilizar para misturas do tipo SMA 12.O e SMA 14 de acordo com o Quadro 7.4.

Segundo a análise realizada na Figura 7.6, verifica-se uma diminuição do volume de vazios obtido, para um aumento da energia de compactação (força e número de aplicações de cargas) utilizada, independentemente da natureza dos agregados. Do mesmo modo, observa-se que o volume de vazios tende a manter-se relativamente constante para cada tipo de condições de ensaio propostas, independentemente da natureza dos agregados e à semelhança do que foi observado para a avaliação sem compactação e para a compactação com o varão.

A Figura 7.6 permite ainda constatar que a utilização do Proctor com compactação leve e aplicação de 25 pancadas em cada uma das três camadas, proposto para simular o método de compactação com varão, promove um menor volume de vazios. A variação observada corresponde a uma diminuição de cerca de 2 % no volume de vazios relativamente ao método de compactação com varão.

No caso da utilização do pilão com o formato de varão também proposto para simular o método de compactação com varão, verificou-se que o mesmo apresenta valores semelhantes aos obtidos para as mesmas condições de ensaio (Proctor com compactação leve e aplicação de 25 pancadas em cada uma das três camadas), mas com a utilização de um pilão convencional. Não é portanto, evidente uma razão para a futura utilização do pilão com o formato de varão em detrimento do pilão convencionalmente utilizado no Proctor.

Como resultado de um aumento da energia de compactação aplicada, durante os ensaios verificou-se ser difícil assegurar que o varão não atinja a base do recipiente durante a compactação da primeira camada, como recomendado nas normas AASHTO T19 e ASTM C29. Os resultados obtidos, mesmo para a compactação leve com 25 pancadas, evidenciam que a utilização do compactador Proctor para simular a compactação com o varão é excessiva, devendo-se proceder a uma redução da energia de compactação e/ou do número de camadas a compactar, caso se pretenda obter uma baridade e volume de vazios entre as partículas ativas semelhante.

No caso dos agregados da SMA 12.O (granodioritos) foi ainda efetuada a avaliação para 50 e 75 pancadas por cada uma das três camadas a compactar. A avaliação mostrou uma redução progressiva para cada avaliação de cerca de 1 % relativamente aos volumes de vazios obtidos com 25 pancadas. Ainda assim os valores do volume de vazios obtidos são sempre superiores aos determinados para a compactação pesada com 55 pancadas por cada uma das cinco camadas a compactar.

Das diversas condições de ensaios avaliadas com o método Proctor, a compactação pesada com aplicação de 55 pancadas em cada uma das cinco camadas, é a que conduz a um menor volume de vazios, comparativamente ao método de compactação com varão utilizado nos EUA. Esta diminuição no volume de vazios corresponde a uma redução de cerca de 9 % relativamente à situação em que não aplicou compactação, independentemente da natureza do agregado.

No que concerne à avaliação do acréscimo de partículas no peneiro de referência utilizado (4 mm), este variou entre 0,8 % e 7,6 %, tendendo a aumentar com um aumento do nível de energia de compactação utilizada (25 pancadas e 55 pancadas, respetivamente). Os resultados apresentados

no Quadro 7.9 parecem evidenciar que uma diminuição do volume de vazios entre as partículas ativas, ocorre como consequência de um aumento da quebra de agregado, traduzida num acréscimo de partículas passadas no peneiro de referência.

— Método de compactação com o *roller compactor* —

No presente estudo, efetuou-se ainda a avaliação da baridade e do volume de vazios segundo o método de compactação com o *roller compactor*. A proposta de utilização do *roller compactor*, deriva da similaridade que este método de compactação apresenta relativamente ao que é comumente utilizado em obra.

Ao contrário dos restantes métodos de compactação utilizados para a avaliação da baridade e do volume de vazios, a compactação através do *roller compactor* não é realizada por impacto, mas por cargas rolantes. Este método tem as vantagens, comparativamente ao método de compactação com o varão, de permitir um processo de compactação mecanizado e, aos restantes métodos utilizados, a aplicação de vibração, a qual contribui para um aumento do adensamento da estrutura pétreo. Este tipo de adensamento é semelhante ao que acontece noutros métodos, como seja a placa vibratória, a qual segundo a revisão bibliográfica, no ponto 3.2.4 (ver Figura 3.6), permite a obtenção de valores de VCA semelhantes aos obtidos para o método de compactação com o varão.

Para a avaliação da baridade e do volume de vazios com o *roller compactor*, foi programado um conjunto de ensaios (de acordo com o Quadro 7.5). Os materiais foram avaliados, utilizando-se 15 passagens com vibração. A vibração teve como intuito permitir um melhor adensamento e consequente diminuição da quebra dos agregados durante o processo de compactação.

No ensaio foram utilizados os moldes habitualmente empregues no fabrico de provetes prismáticos para a avaliação da deformação permanente. Este tipo de molde tem um volume de cerca de 4,5 litros, o qual é ligeiramente inferior ao requerido na norma NP EN 1097-3, que indica a utilização de um recipiente com um volume mínimo de 5,0 litros para agregados com uma dimensão máxima nominal igual de 16 mm. No caso de se considerar a dimensão máxima de 14 mm, as normas americanas não especificam um valor, contudo se efetuada uma interpolação a capacidade do recipiente deve ser de aproximadamente 4,4 litros.

À semelhança do que foi adotado nos restantes métodos de compactação, também para o presente método foi utilizada uma massa total por amostra entre 125 % e 150 % da massa total passível de ser colocada no interior do recipiente com compactação.

— Procedimento de ensaio —

A avaliação da baridade e do volume de vazios nos agregados e partículas ativas, proposta com o *roller compactor*, seguiu a metodologia que seguinte se apresenta considerando a norma NP EN 1097-3:

1. Utilizando um recipiente metálico com dimensão 300 mmx300 mmx50 mm, procede-se à determinação do seu volume. Posteriormente, devem ser preparadas três amostras da fração de agregados/partículas ativas (previamente secos a 110 °C ± 5 °C até se atingir massa constante), devendo a massa corresponder entre 125 % e 150 % da massa total passível de ser colocada no interior do recipiente com compactação.

2. A fase seguinte consiste após determinada a massa do recipiente, em preencher individualmente o recipiente com cada uma das amostras de agregados/partículas ativas como apresentado na Figura 7.7. Inicialmente procede-se ao preenchimento dos quatro cantos do recipiente até se atingir o seu topo. Posteriormente, deve o restante espaço central do recipiente ser preenchido até se atingir igualmente o seu topo. Previamente à compactação, deve-se proceder ao nivelamento da superfície de agregados colocados no recipiente, ao qual se segue a aplicação de 15 passagens com vibração na camada de agregados (Figura 7.8). Notar que a utilização excessiva de agregados para além do topo do recipiente irá tender a promover um aumento da quebra de agregados na base do recipiente onde se observa esse excesso de agregados à superfície.

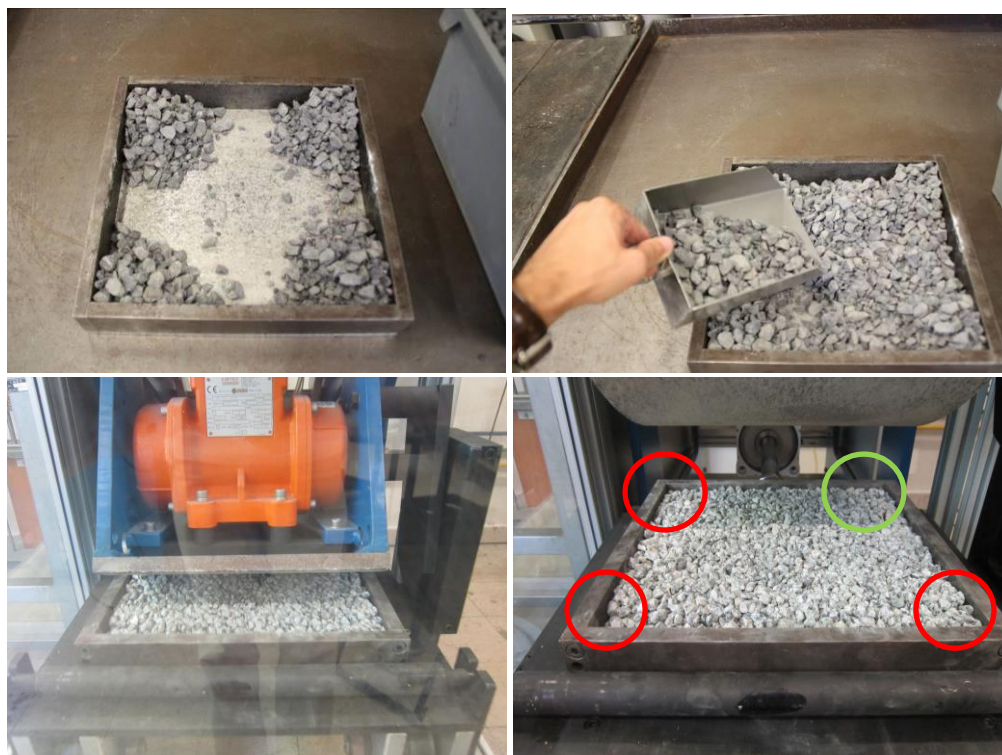


Figura 7.7 – Sequência de preenchimento do recipiente no método de compactação com o *roller compactor*

3. Após realizada a primeira compactação, deve-se numa segunda fase do processo, observar a superfície dos agregados, com especial atenção para os cantos do recipiente onde é espectável ter ocorrido um desnivelamento da superfície de agregados. Na Figura 7.7 é possível observar a vermelho o aspeto dos cantos do recipiente, nos quais ainda é necessário preencher com agregados e a verde o canto onde não é necessário adicionar mais agregados. A superfície de agregados deve então ser de novo nivelada através da introdução de novos agregados sem nunca ultrapassar o topo do recipiente. Posteriormente deve-se sujeitar de novo a amostra à compactação com 15 passagens com vibração.
4. A presente fase deve ser repetida tantas as vezes, quantas as necessárias, até não se verificar um desnivelamento da superfície de agregados após a compactação.

A avaliação da baridade e do volume de vazios nos agregados/partículas ativas após compactação com o *roller compactor*, partículas ativas é determinado após pesagem da massa do recipiente com os agregados compactados.

O VCA (VCA_{RC}) após compactação com o *roller compactor* é determinado de acordo com a equação (7.3) utilizada para os restantes métodos de compactação.

— Apresentação e análise de resultados —

No Quadro 7.10 e na Figura 7.8 são apresentados os principais resultados obtidos na avaliação da baridade e do volume de vazios dos agregados compactados com o *roller compactor* utilizados nas misturas SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2.

Quadro 7.10 – Resultados da avaliação da baridade e volume de vazios (compactação com o compactador *roller compactor*)

Identificação das amostras	Número de passagens com vibração	Fração ou peneiro de referência (mm)	Resultados obtidos			
			Baridade (Mg/m ³)	Volume de vazios nos agregados/partículas ativas, VCA _{RC} (%)	Acréscimo na percentagem de partículas passadas no peneiro 4 mm (%)	
SMA 12.O-CR1	15	Fração 0/4	1,650	37,1	-	
SMA 12.O-CR2		Fração 6/10	1,610	41,0	-	
SMA 12.O-CR3		2	1,650	39,4	-	
SMA 12.O-CR4		4	1,740	36,1	6,7	
SMA 12.O-CR5		4,75	1,700	37,4	-	
SMA 14-1.O-CR1		4	1,770	40,5	1,4	
SMA 14-2.CR1		4 ¹⁾		1,840	31,3	-
SMA 14-2.CR2				1,560	41,7	3,1

Legenda: Avaliação realizada para o conjunto das frações 4/12 mm e 10//16 mm

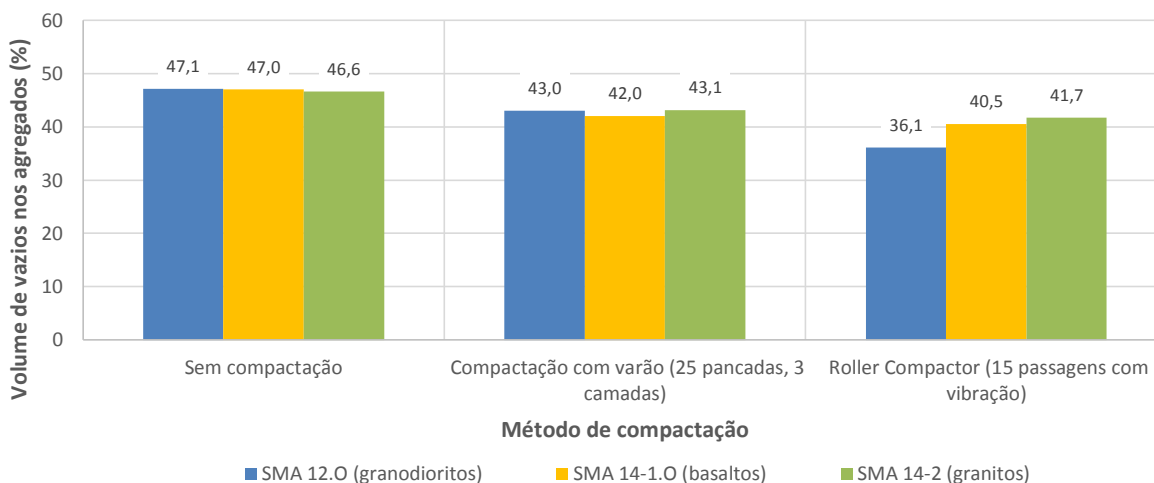


Figura 7.8 – Volume de vazios dos agregados com compactação com o *roller compactor* para o peneiro de referência 4 mm (SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2)

À semelhança do que foi constatado no Proctor para a avaliação dos granodioritos da SMA 12.O (fração 6/10, 2 mm, 4 mm, 4,75 mm), observa-se no Quadro 7.10, que na compactação com o *roller compactor* não é evidente a ocorrência de um aumento do volume de vazios para um aumento do peneiro de referência utilizado, antes parece existir uma diminuição.

Da análise da Figura 7.8, é possível observar uma análise comparativa entre o método do *roller compactor* e os resultados obtidos sem compactação e com compactação com o varão, considerando o peneiro de referência 4 mm. Segundo a análise realizada na Figura 7.8, o método do *roller compactor*, dos três métodos, é o que conduz a um menor volume de vazios, comparativamente ao método de compactação com varão utilizado nos EUA. Esta diminuição no volume de vazios corresponde a uma redução de cerca de 7,5 % no volume de vazios relativamente ao método sem compactação independentemente da natureza dos agregados.

No que concerne à avaliação do acréscimo de partículas no peneiro de referência utilizado (4 mm), este varia entre 1,4 % e 6,7 %. Os resultados apresentados no Quadro 7.10, apesar de não serem tão evidentes parecem ainda assim mostrar uma tendência para uma diminuição do volume de vazios entre as partículas ativas, como consequência de um aumento da quebra de agregado, traduzida num acréscimo de partículas passadas no peneiro de referência.

7.2.1 APRECIÇÃO SUCINTA DOS RESULTADOS OBTIDOS

Decorrente dos ensaios realizados e com o objetivo de permitir uma análise integrada, apresenta-se seguidamente de forma sucinta os resultados obtidos na avaliação dos agregados das misturas SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2.

— Avaliação da baridade e volume de vazios nos agregados/partículas ativas —

Da análise dos resultados dos ensaios para avaliação da baridade e volume de vazios nos agregados/partículas ativas segundo os diferentes métodos de compactação (sem compactação, compactação com o varão, compactador Proctor e *roller compactor*) apresenta-se na Figura 7.9 a compilação dos resultados obtidos para os agregados avaliados.

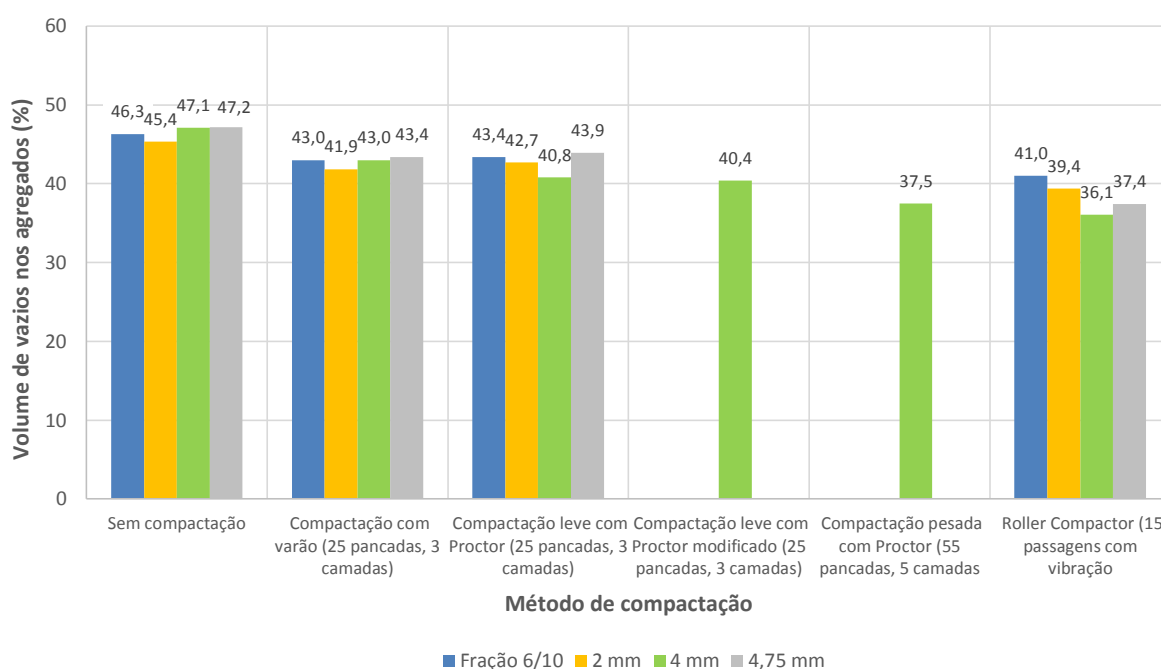


Figura 7.9 – Compilação dos resultados dos ensaios de avaliação do volume de vazios para os granodioritos (SMA 12.O) por fração/peneiro de referência utilizado para cada método de compactação

De acordo com a Figura 7.9 observa-se como seria espectável uma redução do volume de vazios com um aumento da energia de compactação aplicada. Porém, quando avaliado o volume de vazios por método de compactação, verificou-se que este tende a manter-se relativamente constante, independentemente da fração/peneiro de referência utilizado (fração 6/10, peneiros de dimensão 2 mm, 4 mm e 4,75 mm), à exceção do método *roller compactor*. Tal pode contudo estar relacionado com o facto do peneiro de referência utilizado ser de 4 mm para a SMA 12.O, e a fração grossa utilizada (6/10 mm), conter uma reduzida percentagem de agregados de dimensão inferior ao peneiro de referência. No caso do *roller compactor* observou-se uma tendência para a redução do volume de vazios com um aumento da dimensão do peneiro, o que pode estar relacionado com uma melhor compactação por vibração nos agregados de maiores dimensões relativamente aos de menores dimensões.

A conclusão obtida relativa ao peneiro a utilizar (4 mm ou 4,75 mm), não parece evidenciar diferenças significativas no que concerne ao volume de vazios obtido, pelo que se considera importante ser dada uma particular atenção a uma adequada escolha das frações de agregados a utilizar numa SMA, que tenha em consideração o peneiro de referência utilizado.

Na Figura 7.10 são representados os resultados relativos ao volume de vazios entre as partículas ativas (para o peneiro de referência com malha de dimensão igual a 4 mm) obtidos para os diferentes métodos de compactação.

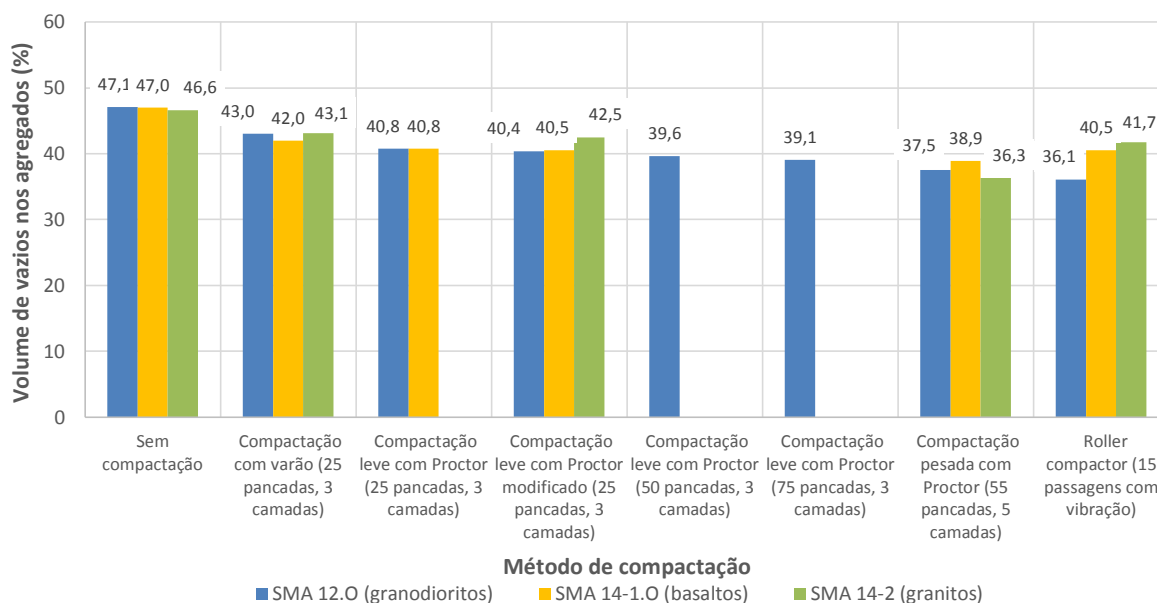


Figura 7.10 – Compilação dos resultados dos ensaios de avaliação do volume de vazios para os agregados utilizados nas SMA por método de compactação (≥ 4 mm)

Segundo os resultados compilados para os diferentes tipos de agregados utilizados nas misturas SMA (granodioritos - SMA 12.O, basaltos - SMA 14-1.O e granitos - SMA 14-2) na Figura 7.10, observa-se à semelhança do que foi constatado na Figura 7.9, e como espectável uma redução do volume de vazios com um aumento da energia de compactação aplicada, independentemente da natureza do agregado avaliado. Os dois métodos de compactação que maior redução do volume de vazios produzem comparativamente à condição sem compactação, corresponde à compactação pesada com Proctor (55 pancadas por cada uma das cinco camadas a compactar) e o *roller compactor* (15 passagens com vibração), com uma redução de cerca de 9,0 % e 7,5 %, respetivamente.

Quando realizada a análise por método de compactação, na Figura 7.10 verifica-se que o volume de vazios tende a manter-se relativamente constante independentemente da natureza do agregado, sendo a exceção o caso da compactação pesada com o Proctor (55 pancadas por cada uma das cinco camadas a compactar) e o *roller compactor* (15 passagens com vibração). Tal pode estar relacionado com o facto da compactação com o varão, ou com o Proctor e Proctor “modificado” (todos para 25 pancadas por cada uma das três camadas a compactar) seja relativamente reduzida contribuindo para uma reduzida quebra de agregado o que origina volumes de vazios entre as partículas ativas semelhantes independentemente da natureza dos agregados.

No Quadro 7.11 e na Figura 7.11 é realizada uma compilação dos resultados obtidos para o volume de vazios entre as partículas ativas, assim como do acréscimo existente na percentagem de partículas passadas no peneiro de referência (4 mm).

Quadro 7.11 – Compilação dos resultados obtidos para o volume de vazios e acréscimo na percentagem de partículas passadas no peneiro 4 mm

Identificação das amostras	Método de compactação	Fração ou peneiro de referência (mm)	Resultados obtidos	
			Volume de vazios nos agregados/partículas ativas (%)	Acréscimo na percentagem de partículas passadas no peneiro 4 mm (%)
SMA 12.O-CV4	Compactação com varão (25 pancadas, 3 camadas)	4	43,0	0,5
SMA 14-1.O-CV1		4	42,0	0,5
SMA 14-2-CV2		4 ²⁾	43,1	0,5
SMA 12.O-CP4	Compactação leve com Proctor (25 pancadas, 3 camadas)	4	40,8	0,8
SMA 14-1.O-CP1		4	40,8	0,8
SMA 12.O-CP6	Compactação leve com Proctor “modificado” (25 pancadas, 3 camadas)	4 ¹⁾	40,4	1,3
SMA 14-1.O-CP2			40,5	1,7
SMA 14-2-CP1			42,5	2,0
SMA 12.O-CP7	Compactação leve com Proctor (50 pancadas, 3 camadas)	4	39,6	3,5
SMA 12.O-CP8	Compactação leve com Proctor (75 pancadas, 3 camadas)	4	39,1	3,8
SMA 12.O-CP9	Compactação pesada com Proctor (55 pancadas, 5 camadas)	4	37,5	4,4
SMA 14-1.O-CP3			38,9	4,0
SMA 14-2.CP2			36,3	7,6
SMA 12.O-CR4	Compactação com <i>roller compactor</i> (15 passagens com vibração)	4	36,1	6,7
SMA 14-1.O-CR1		4	40,5	1,4
SMA 14-2.O-CR2		4 ²⁾	41,7	3,1

Legenda: 1) Avaliação utilizando o pilão em formato de varão; 2) Avaliação realizada para o conjunto das frações 4/12 mm e 10/16 mm

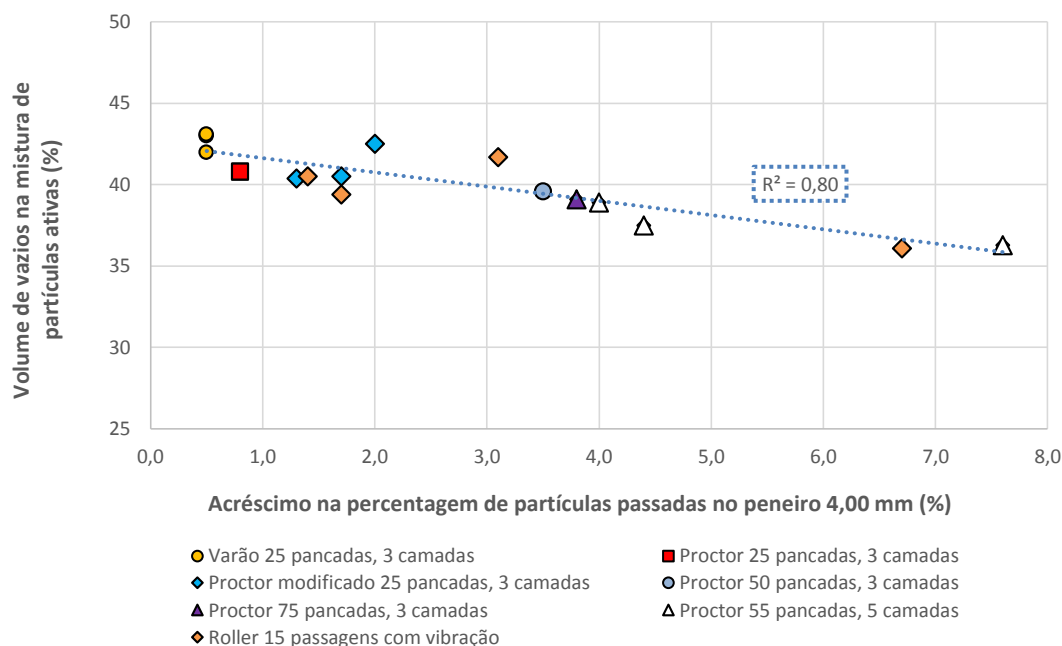


Figura 7.11 – Compilação dos resultados dos ensaios de avaliação da quebra dos agregados utilizados nas misturas SMA por método de compactação

No Quadro 7.11 e na Figura 7.11, analisada a quebra de agregado traduzida pelo acréscimo de partículas no peneiro de referência utilizado (4 mm), verifica-se que variou entre 0,5 % e 7,6 % para os diversos métodos avaliados. Dos diversos métodos avaliados o método de compactação com o varão corresponde ao que menor degradação promove no agregado, sendo a compactação pesada com o Proctor (55 pancadas por cada uma das cinco camadas compactadas) e o *roller compactor* os que promovem por sua vez maior quebra de agregado.

De acordo com o Quadro 7.11 tanto o método de compactação com o varão, como o método Proctor, assim como o método Proctor “modificado” (ambos com a aplicação de 25 pancadas por cada uma das três camadas a compactar), apresentaram um reduzido acréscimo ($\leq 2,0$ %) na percentagem de partículas passadas no peneiro 4 mm. Semelhante conclusão relativa ao método de compactação com o varão havia sido obtida no estudo realizado por Brown & Haddock (1997), abordado no ponto 3.2.4, onde se verificou que o acréscimo na percentagem de partículas passadas no peneiro 4,75 mm era geralmente inferior a 2,7 %.

Na Figura 7.11 observa-se ainda que a compactação com o Proctor (50 e 75 pancadas por cada uma das camadas a compactar) permite obter valores intermédios de acréscimo de partículas ativas ($\leq 4,0$ %). No caso da compactação pesada com o Proctor (55 pancadas por cada uma das cinco camadas a compactar) e com o *roller compactor* (15 passagens com vibração), correspondem aos métodos que maior acréscimo na percentagem de partículas passadas no peneiro 4 mm apresentaram, entre 4,0 % e 7,6 % e 1,4 % e 6,7 %, respetivamente. No caso do *roller compactor* considera-se que a utilização de vibração apresentou um contributo positivo para o adensamento das partículas de agregado, permitindo em alguns casos uma menor quebra de agregado.

Os resultados na Figura 7.11 evidenciam que uma diminuição do volume de vazios entre as partículas ativas, ocorre como consequência de um aumento da quebra de agregado, traduzida por um acréscimo de partículas passadas no peneiro de referência, à semelhança do que havia sido já constatado por Brown & Haddock (1997).

Complementarmente, e com o objetivo de avaliar a quebra de agregado decorrente do fabrico, transporte e aplicação da mistura em obra apresenta-se no Quadro 7.12 uma análise comparativa dos valores obtidos para o acréscimo de partículas passadas no peneiro de referência (avaliado no Quadro 7.11 e na Figura 7.11), face ao que foi obtido no ponto 5.6 para as misturas SMA aplicadas em obra (SMA 12.O e SMA 14-1.O).

Quadro 7.12 – Análise comparativa entre os agregados avaliados (misturas SMA de laboratório e recolhidas na obra) e o acréscimo de partículas no peneiro de referência

Identificação das misturas	Método de compactação	Resultados obtidos (valores médios)
		Acréscimo na percentagem de partículas passadas no peneiro 4 mm (%) [mín; máx]
SMA 12.O SMA 14-1.O SMA 14-2	Compactação com varão (25 pancadas, 3 camadas)	0,5 [0,5; 0,5]
SMA 12.O SMA 14-1.O	Compactação leve com Proctor (25 pancadas, 3 camadas)	0,8 [0,8; 0,8]
SMA 12.O SMA 14-1.O SMA 14-2	Compactação leve com Proctor “modificado” (25 pancadas, 3 camadas)	1,7 [1,3; 2,0]
SMA 12.O	Compactação leve com Proctor (50 pancadas, 3 camadas)	3,5
SMA 12.O	Compactação leve com Proctor (75 pancadas, 3 camadas)	3,8
SMA 12.O SMA 14-1.O SMA 14-2	Compactação pesada com Proctor (55 pancadas, 5 camadas)	5,3 [4,0; 7,6]
SMA 12.O SMA 14-1.O SMA 14-2	Compactação com <i>roller compactor</i> (15 passagens com vibração)	3,7 [1,4; 6,7]
SMA 12.O	Sem compactação (amostra recolhida diretamente na pavimentadora antes da compactação)	3,2
SMA 12.O	Compactação com cilindros de rasto liso (amostra recolhida do trecho experimental)	2,3
SMA 14-1.O	Compactação com cilindros de rasto liso (amostra recolhida do trecho experimental)	4,0

De acordo com o Quadro 7.12 as misturas SMA aplicadas em obra apresentaram um acréscimo de partículas passadas no peneiro de referência 4 mm variável entre 2,3 % e 4,0 %. Observa-se ainda para a mistura SMA 12.O antes de aplicada um acréscimo de 3,2 % como possível resultado da quebra decorrente do processo de fabrico e transporte. Referir que as amostras aplicadas no trecho experimental e obra (SMA 12.O e SMA 14-1.O, respetivamente), apresentavam uma subcompactação com porosidades entre 9,0 % e 7,0 %, respetivamente. Por esse motivo, é espectável que ocorra uma quebra de partículas ativas em obra superior aos valores obtidos no presente trabalho. Os valores observados parecem corroborar o que foi já constatado na revisão bibliográfica no ponto 3.2.4 para os estudos de West & James (2005), West & Moore (2006) e Tao *et al.* (2011) onde os resultados de amostras de SMA recolhidas em obra tendem a mostrar um acréscimo de partículas passadas no peneiro 4,75 mm variável entre cerca de 2,5 % e 9,0 %.

Os resultados obtidos parecem assim evidenciar que a compactação com o varão e a compactação leve com o Proctor (25 pancadas) tendem a promover um acréscimo das partículas passadas no peneiro de referência inferior à que se observou em obra. O valor da quebra de agregado observado através da compactação com o varão e da compactação leve com o Proctor são inclusive inferiores ao constatado para a mistura SMA 12.O antes de compactada em obra. Esta constatação apenas parece evidenciar aquilo que seria espectável: que a quebra de agregado decorrente do processo de fabrico e transporte da mistura para a obra, promove por si só uma quebra de agregado superior ao que é passível de ser obtido através da compactação com o varão. Esta preocupação havia sido já mencionada no estudo realizado por Brown & Haddock (1997), o qual conduziu ao desenvolvimento do método de compactação com o varão. Nesse estudo, porém não foi tida em consideração a quebra

de agregado que ocorria em obra, condicionando assim o método escolhido para avaliar o volume de vazios entre as partículas ativas.

Todos os restantes métodos de compactação avaliados no presente estudo permitem obter um acréscimo de partículas similar aos obtidos em obra. Adicionalmente, e de acordo com revisão a bibliográfica realizada, constatou-se no ponto 4.5.3, relativo à formulação de misturas SMA segundo o método de Bailey, que na formulação de misturas SMA, o esqueleto de agregados pretendido deve ser pelo menos tão denso quanto a condição de compactação com o varão, devendo ser utilizado o valor dessa baridade, ou entre 110 % e 125 % da baridade obtida sem compactação.

No Quadro 7.13 e na Figura 7.12 são apresentados os resultados obtidos da baridade para a condição sem compactação e com compactação. Adicionalmente é ainda apresentado o rácio entre a baridade obtida com compactação relativamente à baridade obtida sem compactação.

Quadro 7.13 – Compilação dos resultados obtidos para as baridades com e sem compactação e seu rácio

Identificação das amostras	Método de compactação	Fração ou peneiro de referência (mm)	Resultados obtidos		
			Baridade sem compactação (Mg/m ³)	Baridade após compactação (Mg/m ³)	Rácio entre a baridade após e sem compactação
SMA 12.O-CV1	Compactação com varão (25 pancadas, 3 camadas)	Fração 0/4	1,410	1,540	1,09
SMA 12.O-CV2		Fração 6/10	1,461	1,550	1,06
SMA 12.O-CV3		2	1,490	1,580	1,06
SMA 12.O-CV4		4	1,440	1,550	1,08
SMA 12.O-CV5		4,75	1,438	1,540	1,07
SMA 14-1.O-CV1		4	1,578	1,730	1,09
SMA 14-2-CV1		Fração 0/5	1,481	1,590	1,07
SMA 14-2-CV2		4 ²⁾	1,424	1,520	1,07
SMA 12.O-CP1	Compactação leve com Proctor (25 pancadas, 3 camadas)	Fração 0/4	1,410	1,700	1,21
SMA 12.O-CP2		Fração 6/10	1,460	1,540	1,05
SMA 12.O-CP3		2	1,490	1,560	1,05
SMA 12.O-CP4		4	1,440	1,613	1,12
SMA 12.O-CP5		4,75	1,438	1,530	1,06
SMA 14-1.O-CP1		4	1,578	1,760	1,11
SMA 12.O-CP6	Compactação leve com Proctor "modificado" (25 pancadas, 3 camadas)	4 ¹⁾	1,440	1,620	1,13
SMA 14-1.O-CP2			1,578	1,770	1,12
SMA 14-2.O-CP1 ²⁾			1,424	1,530	1,08
SMA 12.O-CP7	Compactação leve com Proctor (50 pancadas, 3 camadas)	4	1,440	1,640	1,14
SMA 12.O-CP8	Compactação leve com Proctor (75 pancadas, 3 camadas)	4	1,440	1,660	1,15
SMA 12.O-CP9	Compactação pesada com Proctor (55 pancadas, 5 camadas)	4	1,440	1,700	1,18
SMA 14-1.O-CP3			1,578	1,820	1,15
SMA 14-2-CP2 ²⁾			1,424	1,700	1,20
SMA 12.O-CR1	Compactação com roller compactor (15 passagens com vibração)	Fração 0/4	1,410	1,650	1,17
SMA 12.O-CR2		Fração 6/10	1,460	1,610	1,10
SMA 12.O-CR3		2	1,490	1,650	1,11
SMA 12.O-CR4		4	1,440	1,740	1,21
SMA 12.O-CP5		4,75	1,440	1,700	1,18
SMA 14-1.O-CR1		4	1,578	1,770	1,12
SMA 14-2-CR1		Fração 0/5	1,481	1,840	1,24
SMA 14-2-CR2		4 ²⁾	1,424	1,560	1,10

Legenda: 1) Avaliação utilizando o pilão em formato de varão; 2) Avaliação realizada para o conjunto das frações 4/12 mm e 10//16 mm

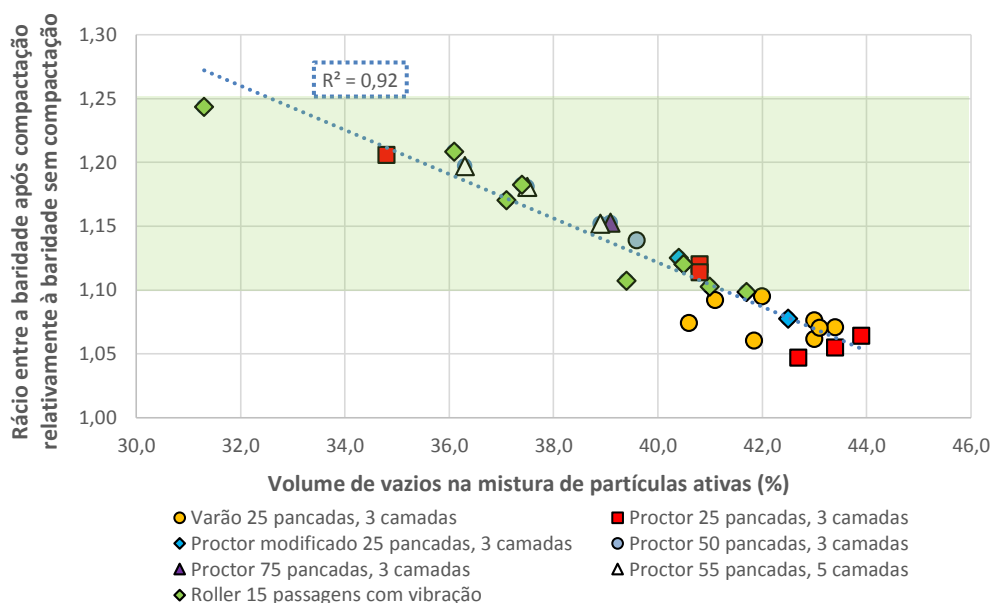


Figura 7.12 – Relação entre o volume de vazios e a relação entre a baridade após compactação relativamente à baridade sem compactação

De acordo com a Figura 7.12 é possível constatar que a compactação segundo o método do varão, proposto nos EUA para a formulação de misturas SMA, não permitiu em nenhum dos tipos de agregados avaliados e peneiro de referência utilizado, a obtenção de um rácio entre a baridade após compactação e sem compactação dos agregados/partículas ativas igual ou superior a 1,10 (110 %) como recomendado no método de Bailey. Do mesmo modo a utilização do método Proctor com compactação leve com 25 pancadas por cada uma das três camadas com pilão convencional ou pilão modificado para simular o varão, tendem a possibilitar rácios inferiores a 1,10 (110 %).

Segundo o Quadro 7.13 e a Figura 7.12, apenas o Proctor (50, 75 pancadas por cada uma das três camadas a compactar), o Proctor com compactação pesada (55 pancadas por cada uma das cinco camadas a compactar) e o *roller compactor* permitiram obter sempre um rácio entre a baridade após e sem compactação igual ou superior a 1,10 (110 %). Do mesmo modo os valores determinados para estes métodos encontram-se no intervalo entre 1,10 (110 %) e 1,25 (125 %) especificado no método de Bailey para a formulação de misturas SMA. Os valores obtidos corroboram o que já havia sido constatado para a avaliação do acréscimo de partículas ativas no peneiro de referência.

Da Figura 7.12 é ainda possível obter uma regressão linear com um coeficiente de correlação de 0,92, que relaciona o volume de vazios com a relação entre a baridade após e sem compactação. Segundo a regressão obtida é possível constatar que é espectável que a formulação de uma mistura SMA requeira a utilização de um volume de vazios entre as partículas ativas compreendido entre cerca de 33 % e 41 % de modo a que seja assegurada a relação proposta pelo método de Bailey entre 110 % e 125 %. Este intervalo é semelhante ao referido por Nicholls (1998) e Drueschner (2005) no ponto 3.2.4 (entre 35 % e 40 %), para que uma mistura SMA possa acomodar um volume de mastique betuminoso que possibilite uma porosidade adequada.

Adicionalmente, ainda no ponto 3.2.4 (Figura 3.6) verifica-se que a avaliação do volume de vazios segundo o método do varão e placa vibratória apresentaram um volume de vazios compreendido entre 37,4 % e 42,5 %, sendo o valor médio de 39,8 %. Assim sendo, de acordo com a Figura 7.12 é espectável que os agregados avaliados nesse estudo, segundo o método do varão ou placa vibratória, nem sempre assegurem a formulação de misturas SMA com um rácio entre a baridade após e sem compactação igual ou superior a 1,10 (110 %), à semelhança do que foi constatado no presente

estudo. Se considerado o valor médio, o rácio (Figura 3.6) seria de cerca de 1,12 (112 %), próximo do limite inferior do intervalo especificado no método de Bailey.

As conclusões anteriores parecem corroborar o estudo realizado pela Austroads (2013), no ponto 4.3 da revisão bibliográfica, onde foram avaliados diferentes métodos para se obter uma mistura de agregados com um efeito de *stone-on-stone* adequado. Segundo o estudo realizado a utilização da compactação com o varão tende a produzir as misturas de agregado com maior percentagem de agregados finos comparativamente aos restantes métodos avaliados, o que segundo os autores do estudo pode permitir obter misturas betuminosas com uma maior percentagem de agregados finos que contribui para a obtenção de misturas SMA com uma boa relação entre a resistência à deformação permanente e a sensibilidade à água. Concluiu-se no presente estudo, que a adoção de uma estrutura pétreia com um menor rácio entre a baridade após e sem compactação irá requer, aquando da formulação, uma menor percentagem de partículas ativas comparativamente à percentagem de partículas passivas utilizadas.

7.2.2 CONCLUSÕES

De acordo com o estudo realizado para a avaliação do efeito de *stone-on-stone* através da avaliação da baridade e volume de vazios segundo diferentes métodos de compactação de agregados/partículas ativas, conclui-se que:

- o método de compactação com o varão, apresenta como limitação o facto da compactação ser efetuada de forma manual. Tal limitação pode induzir um aumento na variabilidade dos resultados obtidos, os quais estão dependentes da experiência do técnico que realiza o ensaio. Esta variabilidade decorre da maior ou menor energia, assim da forma como a distribuição das cargas é efetuada sobre a superfície de agregados aquando da compactação;
- o volume de vazios dos agregados/partículas ativas tende a manter-se relativamente constante, independentemente da fração/peneiro de referência definido, à exceção do *roller compactor*, o que pode estar relacionado com uma melhor compactação por vibração;
- o volume de vazios dos agregados/partículas ativas tende a manter-se relativamente constante, independentemente da natureza do agregado, à exceção da compactação pesada com o Proctor (55 pancadas por cada uma das cinco camadas a compactar) e o *roller compactor* (15 passagens com vibração). Tal pode estar relacionado com o facto da compactação com o varão, ou com o Proctor e Proctor “modificado” (todos para 25 pancadas por cada uma das três camadas a compactar) seja relativamente reduzida, contribuindo para uma reduzida quebra de agregado o que origina volumes de vazios entre as partículas ativas semelhantes independentemente da natureza dos agregados;
- os resultados evidenciaram a importância de uma adequada escolha das frações de agregados a utilizar na SMA, baseada no peneiro de referência utilizado;
- o método de compactação pesada com Proctor (55 pancadas por cada uma das cinco camadas a compactar) e o *roller compactor* (15 passagens com vibração) correspondem aos dois métodos que maior redução do volume de vazios produzem comparativamente à condição sem compactação, com uma redução de cerca de 9,0 % e 7,5 %, respetivamente;
- uma diminuição do volume de vazios entre as partículas ativas, ocorre como consequência de um aumento da quebra de agregado, traduzida por um acréscimo de partículas passadas no peneiro de referência, variando entre 0,5 % e 7,6 % para os diferentes métodos avaliados. O método de compactação com o varão, com o Proctor e com o Proctor “modificado” (todos com

a aplicação de 25 pancadas por cada uma das três camadas a compactar), apresentaram um acréscimo na percentagem de partículas passadas no peneiro 4 mm ou inferior a 2,0 %. A que a compactação com o Proctor (50 e 75 pancadas por cada uma das camadas a compactar) permite obter valores intermédios de acréscimo de partículas ativas ($\leq 4,0$ %). No caso da compactação pesada com o Proctor (55 pancadas por cada uma das cinco camadas a compactar) e com o *roller compactor* (15 passagens com vibração), correspondem aos métodos que maior acréscimo na percentagem de partículas passadas no peneiro 4 mm apresentaram, entre 4,0 % e 7,6 % e 1,4 % e 6,7 %, respetivamente;

- os resultados obtidos evidenciam que a compactação com o varão e a compactação leve com o Proctor (25 pancadas) tendem a promover um acréscimo das partículas passadas no peneiro de referência inferior à que se observa em obra. O valor da quebra de agregado observado através da compactação com o varão e da compactação leve com o Proctor são inclusive inferiores ao constatado para a mistura SMA 12.O antes de compactada em obra. Os resultados parecem mostrar que a quebra de agregado decorrente do processo de fabrico e transporte tende a ser superior à observada com a compactação com o varão;
- quando avaliado o rácio entre a baridade após e sem compactação, apenas o Proctor (50 e 75 pancadas por cada uma das três camadas a compactar), o Proctor com compactação pesada (55 pancadas) e o *roller compactor* permitiram obter valores entre 1,10 (110 %) e 1,25 (125 %) especificado no método de Bailey.
- o rácio entre a baridade após e sem compactação apresentou uma boa correlação, sendo espectável que a formulação de uma mistura SMA requeira a utilização de um volume de vazios entre as partículas ativas compreendido entre cerca de 33 % e 41 % de modo a que seja assegurado o rácio proposto pelo método de Bailey entre 110 % e 125 %.
- a adoção de uma estrutura pétreia com um menor rácio entre a baridade após e sem compactação irá requer, aquando da formulação, uma menor percentagem de partículas ativas comparativamente à percentagem de partículas passivas utilizadas.

7.3 PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA FORMULAÇÃO DAS MISTURAS SMA DE FORMA ANALÍTICA

Tendo em consideração as conclusões anteriormente obtidas, apresenta-se no presente ponto uma proposta de metodologia analítica, cujo intuito é a avaliação da composição ótima de misturas SMA sem que seja requerida a compactação de provetes de mistura betuminosa, como realizado convencionalmente num estudo de formulação, para determinação da percentagem ótima de betume.

A proposta da metodologia analítica será validada numa primeira etapa, através de uma análise comparativa das características volumétricas obtidas para as misturas SMA avaliadas laboratorialmente na segunda fase do estudo experimental (Fase 2) relativamente ao que é obtido através da metodologia analítica proposta.

Na análise realizada a determinação da baridade e do volume de vazios das partículas ativas terá por base o estudo previamente realizado para os diferentes métodos de compactação das partículas ativas previamente avaliados no ponto 7.2.

A metodologia analítica tem como pressuposto inicial, à semelhança dos vários métodos abordados no capítulo 4, a obtenção de um efeito de *stone-on-stone* entre os agregados/partículas ativas presentes numa mistura SMA, não devendo o volume de mastique betuminoso considerando a porosidade da SMA compactada ser superior ao volume de vazios disponibilizado pelos agregados grossos/partículas ativas.

Porém na análise proposta considera-se que o volume de vazios das partículas ativas deve ser igual à soma do volume de mastique betuminoso e do volume de vazios da mistura SMA compactada. Considera-se ainda que o efeito de *stone-on-stone* é obtido pelas partículas ativas de dimensão de acordo com Quadro 7.4.

Nesse sentido apresenta-se na Figura 7.13 uma representação esquemática da composição (massa/volume) de uma mistura SMA, a qual é equivalente à que se teria para uma mistura betuminosa convencional, à exceção da necessidade de um aditivo.

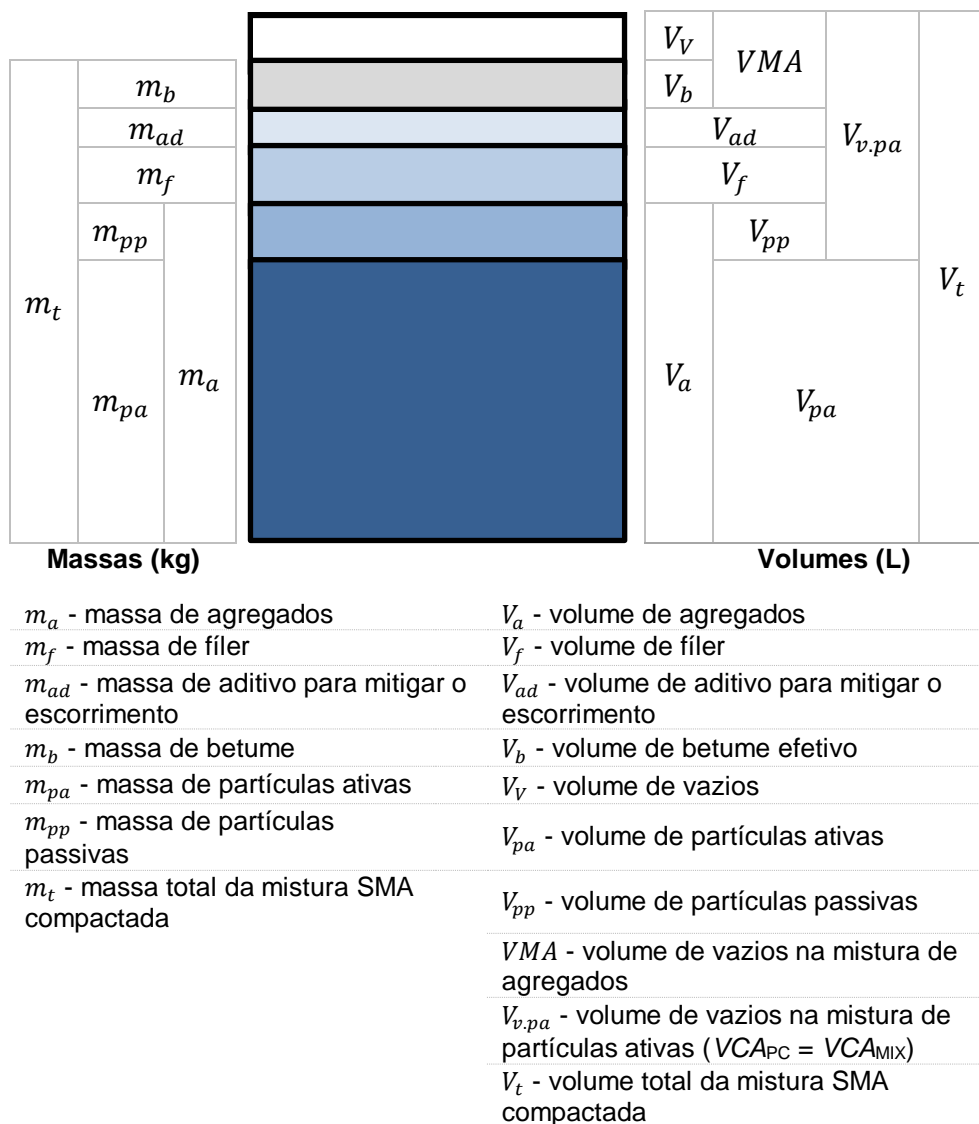


Figura 7.13 – Composição volumétrica de uma mistura SMA compactada

De acordo com a Figura 7.13 é possível obter as seguintes relações entre as grandezas:

$$V_a = V_{pa} + V_{pp} \quad (7.4)$$

$$VMA = V_b + V_V \quad (7.5)$$

$$V_{v.pa} = V_{pp} + V_f + V_{ad} + V_b + V_V \quad (7.6)$$

$$V_t = V_{pa} + V_{pp} + V_f + V_{ad} + V_b + V_V \quad (7.7)$$

$$m_a = m_{pa} + m_{pp} \quad (7.8)$$

$$m_t = m_{pa} + m_{pp} + m_f + m_{ad} + m_b \quad (7.9)$$

Para os pressupostos anteriores, e os que se apresentam:

- o volume total da mistura SMA compactada apresentado na Figura 7.13, corresponde ao volume de um recipiente/molde convencionalmente utilizado para compactar provetes (por exemplo, com o compactador *Marshall* ou giratório) como apresentado na Figura 7.14;
- para se otimizar o efeito de *stone-on-stone*, é então necessário determinar qual a quantidade de partículas ativas passível de se utilizar para preencher o recipiente/molde até ao seu topo, à semelhança do que é efetuado nos ensaios realizados no ponto 7.2 para avaliar a baridade e o volume de vazios.

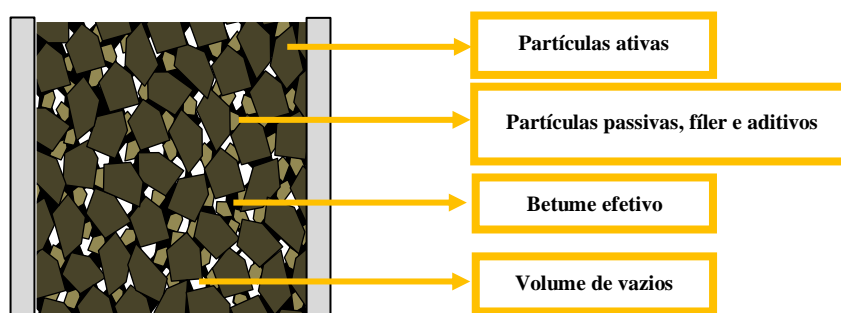


Figura 7.14 – Exemplo da estrutura e composição de uma mistura SMA após compactada num recipiente/molde

Consoante o método de compactação definido, maior ou menor será a quantidade de material (partículas ativas) a utilizar para preencher o volume total disponível no recipiente/molde, função de uma maior ou menor baridade, a que corresponde um maior ou menor volume de sólidos da estrutura de partículas ativas após compactação.

O volume do recipiente/molde que não é preenchido pelo volume de sólidos (partículas ativas), corresponde ao volume de vazios disponível entre as partículas ativas, como apresentado na Figura 7.13. Esse volume de vazios dentro do recipiente/molde será posteriormente preenchido pelo somatório dos volumes de partículas passivas, fíler, aditivos, betume e vazios após compactada a mistura SMA.

Para os pressupostos apresentados, propõe-se seguidamente a sequência para a metodologia a adotar para estimar as características volumétricas dos provetes de mistura SMA compactada, para a composição volumétrica definida para os materiais constituintes da SMA e a obtenção e otimização do efeito de *stone-on-stone*:

Numa primeira etapa deve-se seleccionar os materiais a utilizar, devendo as frações de agregados ser escolhidas considerando o peneiro de referência (Quadro 7.4) de preferência uma fração correspondente às partículas ativas e uma fração correspondente à fração de partículas passivas.

Posteriormente é realizada uma caracterização dos materiais constituintes da mistura SMA, no que concerne, às suas massas volúmicas, e adicionalmente no caso dos materiais granulares (frações de agregados e filer) a absorção de água, e sua granulometria. Para a fração de agregados de dimensão igual ou superior à dimensão do peneiro de referência deve ainda ser realizada a avaliação da baridade e do volume de vazios na estrutura de partículas ativas.

Após a avaliação da baridade e do volume de vazios na mistura de partículas ativas, segundo o método de compactação a propor posteriormente, (capítulo 9, considerando os métodos avaliados no ponto 7.2), é determinada a massa de partículas ativas a utilizar de acordo com a seguinte equação:

$$m_{pa.ss} = \rho_{b.pa} \cdot V_t \quad (7.10)$$

sendo:

$m_{pa.ss}$ - massa de partículas ativas a utilizar para se obter e otimizar o efeito de *stone-on-stone* (kg);

$\rho_{b.pa}$ – baridade das partículas ativas (Mg/m³);

V_t - volume total da mistura SMA compactada correspondente ao volume do recipiente/molde utilizado (L).

Posteriormente, para cada fração é determinada a percentagem de partículas ativas (de dimensão igual ou superior ao peneiro de referência, de acordo com o Quadro 7.4), de partículas passivas (de dimensão inferior ao peneiro de referência e igual ou superior a 0,063 mm) e de filer (partículas de dimensão inferior a 0,063 mm):

$$P_{pa} = 100 - P_{ref} \quad (7.11)$$

$$P_{pp} = P_{ref} - P_{0,063} \quad (7.12)$$

$$P_{filer} = P_{0,063} \quad (7.13)$$

sendo:

P_{pa} - percentagem de partículas ativas por fração (%);

P_{ref} - percentagem de material passado no peneiro de referência (%);

P_{pp} - percentagem de partículas passivas por fração (%);

P_{filer} - percentagem de filer por fração (%);

$P_{0,063}$ - percentagem de material passado no peneiro com malha de dimensão igual a 0,063 mm (%).

Com a massa de partículas ativas para se obter e otimizar o efeito de *stone-on-stone* é determinado o respetivo volume:

$$V_{pa.ss} = \frac{m_{pa.ss}}{\rho_{pa}} \quad (7.14)$$

sendo:

$V_{pa.ss}$ - volume de partículas ativas a utilizar para se obter e otimizar o efeito de *stone-on-stone* para o volume do recipiente/molde previamente definido (L);

$m_{pa.ss}$ - massa de partículas ativas a utilizar para se otimizar o efeito de *stone-on-stone* (kg);

ρ_{pa} - massa volúmica das partículas ativas (Mg/m³).

Tendo em consideração o volume de partículas ativas para se otimizar o efeito de *stone-on-stone* e a divisão percentual das frações de agregados em partículas ativas, passivas e filer é definida uma composição preliminar da mistura SMA. Para a composição escolhida e equação (7.9) determinam-se as massas individuais dos materiais constituintes da SMA e a respetiva massa total da mistura SMA a utilizar para se obter e otimizar o efeito de *stone-on-stone* para o volume do recipiente/molde escolhido:

$$m_{t.ss} = m_{pa.ss} + m_{pp} + m_f + m_{ad} + m_b \quad (7.15)$$

sendo:

$m_{t.ss}$ – massa total de mistura SMA a utilizar para se obter e otimizar o efeito de *stone-on-stone* (kg).

As massas volúmicas das partículas ativas, passivas e de filer de forma combinada considerando as diferentes frações de agregados e de filer utilizados na mistura SMA:

$$\rho_{pa.ss} = \frac{\left(\frac{m_{t.ss} \cdot \frac{\% \text{ agregado } 1}{100} \cdot \frac{P_{pa \text{ agregado } 1}}{100} + \dots + m_{t.ss} \cdot \frac{\% \text{ agregado } n}{100} \cdot \frac{P_{pa \text{ agregado } n}}{100} \right) \cdot 100}{\frac{\frac{\% \text{ agregado } 1 \cdot P_{pa \text{ agregado } 1}}{100}}{\rho_{a1}} + \dots + \frac{\frac{\% \text{ agregado } n \cdot P_{pa \text{ agregado } n}}{100}}{\rho_{an}}} \quad (7.16)$$

$$\rho_{pp} = \frac{\left(\frac{m_{t.ss} \cdot \frac{\% \text{ agregado } 1}{100} \cdot \frac{P_{pp \text{ agregado } 1}}{100} + \dots + m_{t.ss} \cdot \frac{\% \text{ agregado } n}{100} \cdot \frac{P_{pp \text{ agregado } n}}{100} \right) \cdot 100}{\frac{\frac{\% \text{ agregado } 1 \cdot P_{pp \text{ agregado } 1}}{100}}{\rho_{a1}} + \dots + \frac{\frac{\% \text{ agregado } n \cdot P_{pp \text{ agregado } n}}{100}}{\rho_{an}}} \quad (7.17)$$

$$\rho_f = \frac{\left(\frac{m_{t.ss} \cdot \frac{\% \text{ agregado } 1 \cdot P_{f \text{ agregado } 1}}{100} + \dots + m_{t.ss} \cdot \frac{\% \text{ agregado } n \cdot P_{f \text{ agregado } n}}{100}}{m_{t.ss}} \right) \cdot 100}{\frac{\frac{\% \text{ agregado } 1 \cdot P_{f \text{ agregado } 1}}{100}}{\rho_{a1}} + \dots + \frac{\frac{\% \text{ agregado } n \cdot P_{f \text{ agregado } n}}{100}}{\rho_{an}}} \quad (7.18)$$

Por uma questão de simplificação na apresentação, não se incluiu nas equações (7.16) a (7.18) a parcela referente ao fíler, a qual tem de ser adicionada no cálculo a realizar.

Notar que a composição definida nesta fase apenas pretende otimizar a percentagem de partículas ativas com o objetivo de maximizar o efeito de *stone-on-stone*. Posteriormente no capítulo 8, é abordada a otimização do desempenho das misturas SMA através do conceito que se propõe de *i-performance* (*improved performance*, que incorpora o efeito proposto de *mastic-within-stone*), através de uma adequada definição volumétrica dos constituintes do mástico betuminoso, sem afetar o efeito de *stone-on-stone*.

Para cada uma das massas é determinado o respetivo volume:

$$V_{pp} = \frac{m_{pp}}{\rho_{pp}} \quad (7.19)$$

$$V_f = \frac{m_f}{\rho_f} \quad (7.20)$$

$$V_{ad} = \frac{m_{ad}}{\rho_{ad}} \quad (7.21)$$

$$V_b = \frac{m_b}{\rho_b} - A \quad (7.22)$$

sendo:

ρ_{pp} - massa volúmica das partículas passivas (Mg/m³);

ρ_f - massa volúmica do fíler (Mg/m³);

ρ_{ad} - massa volúmica do aditivo para mitigar o escorrimento (Mg/m³);

ρ_b - massa volúmica do betume (Mg/m³);

A - absorção de betume (L).

Utilizando os volumes de cada um dos constituintes da mistura SMA, é determinada a porosidade da mistura SMA compactada com o efeito de *stone-on-stone* otimizado, de acordo com a equação:

$$V_{V.ss} = \frac{V_t - (V_{pa.ss} + V_{pp} + V_f + V_{ad} + V_b)}{V_t} \cdot 100 \quad (7.23)$$

sendo:

$V_{V,SS}$ – porosidade da mistura SMA compactada com o efeito de *stone-on-stone* otimizado (%).

Posteriormente é possível determinar a baridade máxima teórica (ρ_{mt}), a baridade (ρ_{ba}), a percentagem de vazios na mistura de agregados (VMA) e a percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume (VFB):

$$\rho_{mt} = \frac{100}{\frac{\% \text{ agregados } 1}{\rho_{a1}} + \dots + \frac{\% \text{ agregados } n}{\rho_{an}} + \frac{\% \text{ fíler}}{\rho_f} + \frac{\% \text{ betume}}{\rho_b} + \frac{\% \text{ aditivos}}{\rho_{ad}}} \quad (7.24)$$

$$\rho_{ba} = \rho_{mt} - \left(\rho_{mt} \cdot \frac{V_{V,SS}}{100} \right) \quad (7.25)$$

$$VMA = V_{V,SS} + P_b \cdot \frac{\rho_{ba}}{\rho_b} \quad (7.26)$$

$$VFB = \frac{P_b \cdot \rho_{ba}}{\rho_b \cdot VMA} \cdot 100 \quad (7.27)$$

7.3.1 AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE COMPACTAÇÃO DE PARTÍCULAS ATIVAS A INCORPORAR NO MÉTODO PROPOSTO PARA A FORMULAÇÃO DAS MISTURAS SMA DE FORMA ANALÍTICA

Para o método de formulação proposto anteriormente, para otimizar o efeito de *stone-on-stone* e respetiva determinação das características volumétricas dos provetes compactados de mistura SMA procedeu-se à avaliação dos diferentes métodos de compactação de partículas ativas para aferir qual o mais adequado para incorporar o método de formulação proposto. Para o efeito foram utilizadas as misturas SMA avaliadas na segunda fase do presente estudo experimental.

Do Quadro 7.14 ao Quadro 7.17 são apresentados os resultados da análise das características volumétricas dos provetes compactados em laboratório (método *Marshall*) comparativamente aos resultados decorrentes da metodologia analítica proposta. Adicionalmente, apresenta-se a porosidade, obtida para os provetes prismáticos utilizados para avaliar a deformação permanente e o fendilhamento por fadiga (compactação com o *roller compactor*). Os resultados apresentados por método de compactação têm por base o respetivo valor da baridade determinado para as partículas ativas assim como a avaliação para 0 % e 100 % de absorção de betume. No caso da representação na Figura 7.15 à Figura 7.18 a informação representada apenas corresponde à avaliação considerando 0 % de absorção de betume como simplificação para uma melhor leitura dos resultados apresentados.

No caso da mistura SMA 11 foram consideradas as características dos agregados e do fíler utilizados na SMA 14-1.O, por se tratarem de materiais provenientes das mesmas pedreiras. No caso da fração 0/4 corresponde à fração utilizada na SMA 14-1.O.

Quadro 7.14 – Análise comparativa das características volumétricas dos provetes compactados em laboratório e da metodologia analítica proposta (SMA 11) [0 %;100 % - absorção de betume]

Método de Compactação	Propriedade	Identificação das misturas betuminosas				
		SMA 11 4,5 %	SMA 11 5,0 %	SMA 11 5,5 %	SMA 11 6,0 %	SMA 11 6,5 %
Estudo de formulação laboratorial	ρ_a (%) ¹⁾	73,3	72,9	72,6	72,1	71,8
	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,501	2,519	2,527	2,529	2,519
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,673	2,651	2,629	2,607	2,586
	V _v (%)	6,4	5,0	3,9 (5,1 ²⁾)	3,0	2,6
	VMA (%)	17,4	17,2	17,4	17,7	18,5
	VFB (%)	62,9	71,1	77,7	83,1	86,0
Sem compactação	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,152;2,138	2,163;2,150	2,175;2,162	2,186;2,173	2,198;2,185
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,647	2,625	2,604	2,583	2,562
	V _v (%)	18,7;19,2	17,6;18,1	16,5;17,0	15,3;15,9	14,2;14,7
	VMA (%)	28,1;28,5	28,1;28,5	28,1;28,5	28,1;28,5	28,1;28,5
	VFB (%)	33,5;32,7	37,5;36,6	41,3;40,5	45,4;44,4	49,4;48,4
Compactação com varão (25 pancadas, 3 camadas)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,355;2,340	2,368;2,353	2,380;2,366	2,393;2,379	2,406;2,391
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,647	2,625	2,604	2,583	2,562
	V _v (%)	11,0;11,6	9,8;10,4	8,6;9,2	7,3;7,9	6,1;6,7
	VMA (%)	21,3;21,8	21,3;21,8	21,3;21,8	21,3;21,8	21,3;21,8
	VFB (%)	48,3;46,9	54,0;52,4	59,7;58,0	65,5;63,7	71,3;69,4
Compactação leve com Proctor (25 pancadas, 3 camadas)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,404;2,389	2,417;2,401	2,430;2,415	2,442;2,428	2,456;2,441
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,647	2,625	2,604	2,583	2,562
	V _v (%)	9,2;9,7	7,9;8,5	6,7;7,3	5,4;6,0	4,2;4,7
	VMA (%)	19,7;20,2	19,7;20,2	19,7;20,2	19,7;20,1	19,7;20,1
	VFB (%)	53,4;51,7	59,6;57,8	66,0;63,9	72,4;70,2	78,9;76,5
Compactação leve com Proctor "modificado" (25 pancadas, 3 camadas)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,413;2,398	2,426;2,411	2,439;2,424	2,452;2,437	2,465;2,450
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,647	2,625	2,604	2,583	2,562
	V _v (%)	8,8;9,4	7,6;8,2	6,3;6,9	5,1;5,6	3,8;4,4
	VMA (%)	19,4;19,9	19,4;19,9	19,4;19,9	19,4;19,8	19,3;19,8
	VFB (%)	54,4;52,7	60,8;58,9	67,3;65,2	73,8;71,5	80,4;78,0
Compactação pesada com Proctor (55 pancadas, 5 camadas)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,481;2,465	2,494;2,478	2,507;2,492	2,521;2,505	2,534;2,519
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,647	2,625	2,604	2,583	2,562
	V _v (%)	6,3;6,9	5,0;5,6	3,7;4,3	2,4;3,0	1,1;1,7
	VMA (%)	17,1;17,6	17,1;17,6	17,1;17,6	17,1;17,6	17,1;17,6
	VFB (%)	63,4;61,1	70,8;68,3	78,3;75,6	85,9;83,0	93,6;90,4
Compactação com roller compactor (15 passagens com vibração)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,416;2,401	2,429;2,414	2,442;2,427	2,455;2,440	2,468;2,453
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,647	2,625	2,604	2,583	2,562
	V _v (%)	8,7;9,3	7,5;8,1	6,2;6,8	5,0;5,5	3,7;4,2
	VMA (%)	19,3;19,8	19,3;19,8	19,3;19,8	19,3;19,7	19,3;19,7
	VFB (%)	54,8;53,0	61,2;59,3	67,7;65,5	74,2;72,0	80,9;78,5

Legenda: 1) relativamente à massa total da mistura betuminosa; 2) porosidade média dos provetes prismáticos para avaliação da deformação permanente considerando uma percentagem de betume igual a 5,8 %

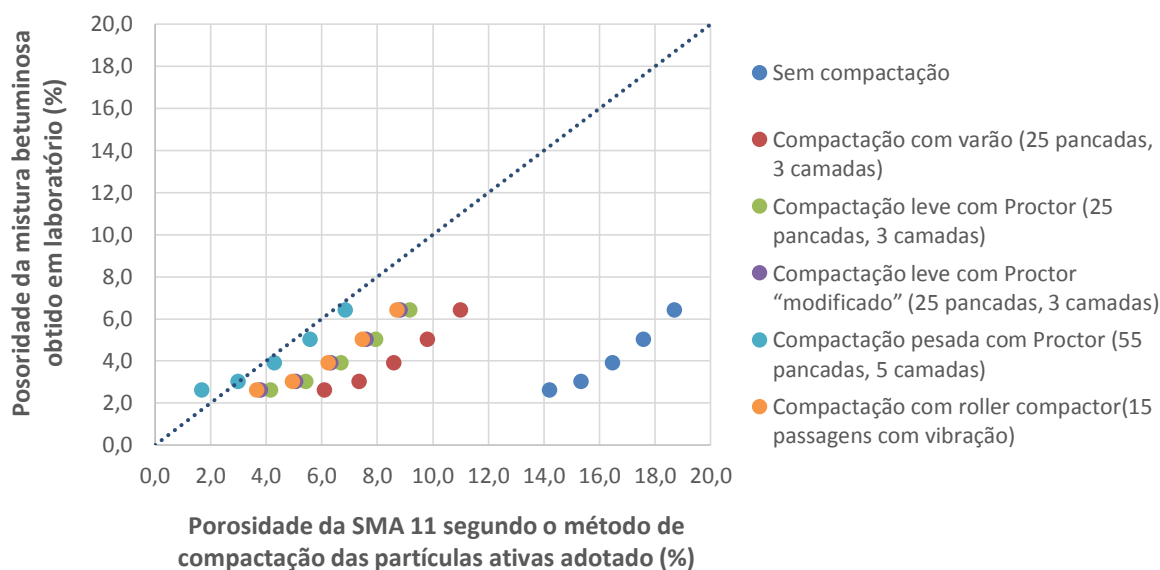


Figura 7.15 – Análise comparativa entre a porosidade obtida no estudo de formulação e nos diferentes métodos de compactação de partículas ativas (SMA 11)

Segundo o Quadro 7.14 e a Figura 7.15 é possível constatar dos diversos métodos de compactação avaliados que o método de compactação pesada com o Proctor (55 pancadas por cada uma das cinco camadas a compactar) corresponde ao método que resultados mais similares apresenta relativamente ao que foi obtido aquando da formulação em laboratório. Semelhante conclusão é obtida para os provetes prismáticos compactados para avaliação da deformação permanente com a percentagem ótima (5,8 %). É ainda possível constatar na Figura 7.15 que dos diversos métodos de compactação avaliados todos à exceção do método de compactação pesada com o Proctor apresentaram uma porosidade superior ao obtido em laboratório, evidenciando um subcompactação das partículas ativas presentes na mistura SMA obtida através da metodologia analítica proposta. Tais resultados evidenciam que a percentagem de partículas ativas utilizada na SMA 11, a qual ronda valores 71,8 % e 73,3 % relativamente à massa total da mistura betuminosa, é passível de ser avaliada segundo o método de compactação pesada com o Proctor.

Considerando o Quadro 7.14, é ainda possível verificar, para o método de compactação pesada com o Proctor, o valor obtido para o volume de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume (*VFB*) apresentou resultados similares aos obtidos em laboratório. Relativamente ao volume de vazios na mistura de agregados (*VMA*) verificou-se que a metodologia analítica proposta mantém esse valor constante uma vez que a relação entre o volume de betume e de vazios é também ela constante, pois o volume inicialmente considerado é o mesmo para todas as percentagens de betume. Sendo esse volume constante, verificou-se que o *VMA* obtido de forma analítica tende a estar próximo do valor mínimo obtido em laboratório.

Quadro 7.15 – Análise comparativa das características volumétricas dos provetes compactados em laboratório e da metodologia analítica proposta (SMA 12.O) [0 %;100 % - absorção de betume]

Método de Compactação	Propriedade	Identificação das misturas betuminosas				
		SMA 12.O 5,0 %	SMA 12.O 5,5 %	SMA 12.O 6,0 %	SMA 12.O 6,5 %	SMA 12.O 7,0 %
Estudo de formulação laboratorial	ρ_a (%) ¹⁾	58,6	58,3	58,0	57,6	57,4
	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,441	2,451	2,445	2,430	2,414
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,539	2,531	2,491	2,475	2,479
	V _v (%)	3,9	3,1 (4,0 ²⁾)	1,9	1,8	2,6
	VMA (%)	15,7	16,2	16,1	17,1	19,0
	VFB (%)	75,5	80,6	88,5	89,5	86,3
Sem compactação	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,460;2,447	2,474;2,460	2,487;2,473	2,500;2,487	2,514;2,501
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,482	2,464	2,446	2,428	2,413
	V _v (%)	0,9;1,4	-0,4;0,2	-1,7;-1,1	-3,0;-2,4	-4,2;-3,4
	VMA (%)	12,8;13,3	12,8;13,3	12,8;13,3	12,8;13,3	12,9;13,4
	VFB (%)	93,2;89,3	-;98,8	-	-	-
Compactação com varão (25 pancadas, 3 camadas)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,651;2,636	2,665;2,651	2,679;2,665	2,693;2,679	2,708;2,694
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,482	2,464	2,446	2,428	2,413
	V _v (%)	-6,8;-6,2	-8,2;-7,6	-9,5;-9,0	-10,9;-10,3	-12,2;-11,7
	VMA (%)	6,1;6,6	6,1;6,6	6,1;6,6	6,1;6,6	6,1;6,6
	VFB (%)	-	-	-	-	-
Compactação leve com Proctor (25 pancadas, 3 camadas)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,754;2,379	2,768;2,753	2,783;2,768	2,798;2,783	2,813;2,799
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,482	2,464	2,446	2,428	2,413
	V _v (%)	-10,9;-10,3	-12,4;-11,7	-13,8;-13,2	-15,2;-14,6	-16,6;-16,0
	VMA (%)	2,4;3,0	2,4;3,0	2,4;2,9	2,4;2,9	2,4;3,0
	VFB (%)	-	-	-	-	-
Compactação leve com Proctor "modificado" (25 pancadas, 3 camadas)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,771;2,756	2,786;2,771	2,801;2,786	2,816;2,801	2,831;2,816
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,482	2,464	2,446	2,428	2,413
	V _v (%)	-11,6;-11,0	-13,1;-12,5	-14,5;-13,9	-16,0;-15,4	-17,3;-16,7
	VMA (%)	1,8;2,3	1,8;2,3	1,8;2,3	1,8;2,3	1,8;2,3
	VFB (%)	-	-	-	-	-
Compactação pesada com Proctor (55 pancadas, 5 camadas)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,904;2,888	2,919;2,903	2,934;2,919	2,950;2,935	2,966;2,951
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,482	2,464	2,446	2,428	2,413
	V _v (%)	-17,0;-16,3	-18,5;-17,8	-20,0;-19,3	-21,5;-20,9	-22,9;-22,3
	VMA (%)	-2,9;-2,3	-2,9;-2,3	-2,9;-2,3	-2,9;-2,3	-2,9;-2,3
	VFB (%)	-	-	-	-	-
Compactação com roller compactor (15 passagens com vibração)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,871;2,955	2,987;2,971	3,003;2,987	3,019;3,003	3,035;3,019
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,482	2,464	2,446	2,428	2,413
	V _v (%)	-19,7;-19,0	-21,2;-20,6	-22,8;-22,1	-24,3;-23,7	-25,8;-25,1
	VMA (%)	-5,3;-4,7	-5,3;-4,7	-5,3;-4,7	-5,3;-4,7	-5,3;-4,6
	VFB (%)	-	-	-	-	-

Legenda: 1) relativamente à massa total da mistura betuminosa; 2) porosidade média dos provetes prismáticos para avaliação da deformação permanente

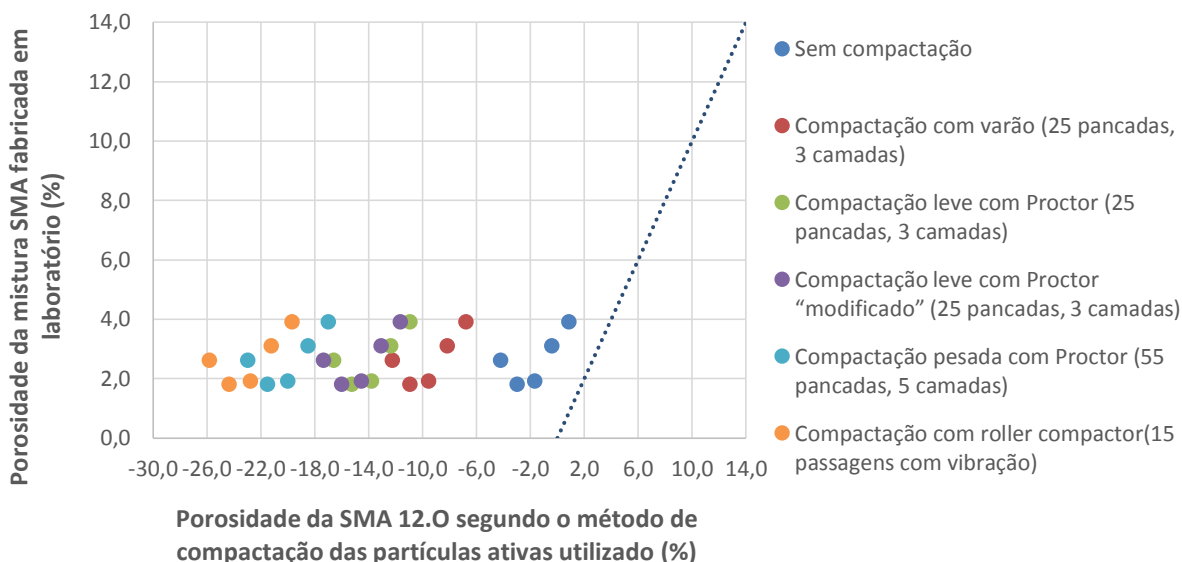


Figura 7.16 – Análise comparativa entre a porosidade obtida no estudo de formulação e nos diferentes métodos de compactação de partículas ativas (SMA 12.O)

No Quadro 7.15 e na Figura 7.16 é possível constatar para todos os métodos de compactação avaliados (inclusive sem compactação) que existe uma sobrecompactação das partículas ativas presentes na mistura SMA obtida através da metodologia analítica, quando considerados os provetes *Marshall* ou os provetes prismáticos utilizados para avaliação da deformação permanente. Tais resultados evidenciam que a percentagem de partículas ativas utilizada na SMA 12.O, a qual ronda valores 57,4 e 58,6 % relativamente à massa total da mistura betuminosa, é demasiado reduzida para ser considerada na metodologia analítica com qualquer tipo de compactação. Inclusive esse valor deveria ser inferior ao obtido para a baridade sem compactação.

Quadro 7.16 – Análise comparativa das características volumétricas dos provetes compactados em laboratório e da metodologia analítica proposta (SMA 14-1.0) [0 %;100 % - absorção de betume]

Método de Compactação	Propriedade	Identificação das misturas betuminosas		
		SMA14-1.0 5,5 %	SMA14-1.0 6,0 %	SMA14-1.0 6,5 %
Estudo de formulação laboratorial	ρ_a (%) ¹⁾	68,6	68,2	67,8
	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,524	2,541	2,520
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,610	2,588	2,568
	Vv (%)	3,3	1,8 (1,5;1,1) ²⁾	1,9
	VMA (%)	16,8	16,6	17,8
	VFB (%)	80,4	89,0	89,5
Sem compactação	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,302;2,291	2,315;2,303	2,327;2,316
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,624	2,603	2,582
	Vv (%)	12,3;12,7	11,1;11,5	9,9;10,3
	VMA (%)	24,6;24,9	24,6;24,9	24,6;24,9
	VFB (%)	50,0;49,0	54,9;53,8	59,8;58,6
Compactação com varão (25 pancadas, 3 camadas)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,520;2,507	2,533;2,520	2,547;2,534
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,624	2,603	2,582
	Vv (%)	4,0;4,5	2,7;3,2	1,4;1,8
	VMA (%)	17,4;17,8	17,4;17,8	17,4;17,8
	VFB (%)	77,1;74,9	84,6;82,2	92,2;89,6
Compactação leve com Proctor (25 pancadas, 3 camadas)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,572;2,558	2,586;2,573	2,599;2,586
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,624	2,603	2,582
	Vv (%)	2,0;2,5	0,7;1,2	-0,7;-0,2
	VMA (%)	15,7;16,1	15,7;16,1	15,7;16,1
	VFB (%)	87,2;84,4	95,7;92,8	104,3;101,1
Compactação leve com Proctor “modificado” (25 pancadas, 3 camadas)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,582;2,568	2,596;2,582	2,609;2,596
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,624	2,603	2,582
	Vv (%)	1,6;2,1	0,3;0,8	-1,1;-0,6
	VMA (%)	15,4;15,9	15,4;15,8	15,4;15,8
	VFB (%)	89,4;86,5	98,1;95,0	106,9;103,5
Compactação pesada com Proctor (55 pancadas, 5 camadas)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,654;2,641	2,668;2,655	2,683;2,669
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,624	2,603	2,582
	Vv (%)	-1,1;-0,6	-2,5;-2,0	-3,9;-3,4
	VMA (%)	13,0;13,5	13,0;13,5	13,0;13,4
	VFB (%)	108,7;104,6	119,2;114,8	130,0;125,2
Compactação com roller compactor (15 passagens com vibração)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,585;2,572	2,599;2,586	2,612;2,599
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,624	2,603	2,582
	Vv (%)	1,5;2,0	0,2;0,7	-1,2;-0,7
	VMA (%)	15,3;15,7	15,3;15,7	15,3;15,7
	VFB (%)	90,1;87,2	98,9;95,7	107,7;104,3

Legenda: 1) relativamente à massa total da mistura betuminosa; 2) porosidade média dos provetes prismáticos para avaliação da deformação permanente e fendilhamento por fadiga

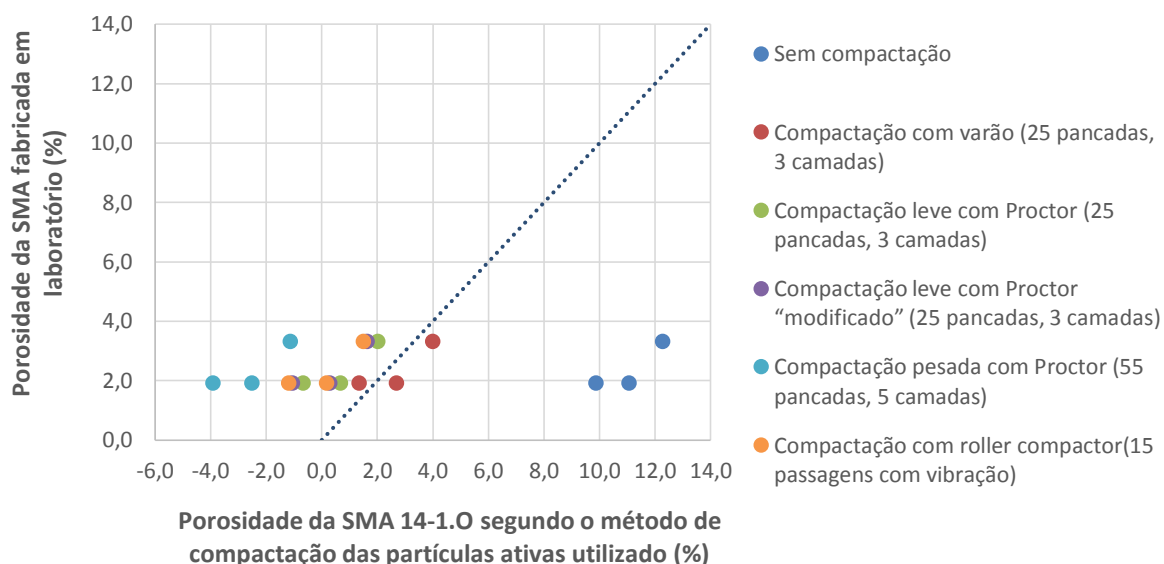


Figura 7.17 – Análise comparativa entre a porosidade obtida no estudo de formulação e nos diferentes métodos de compactação de partículas ativas (SMA 14-1.O)

Segundo o Quadro 7.16 e a Figura 7.17 é possível constatar dos diversos métodos de compactação avaliados que o método de compactação com o varão (25 pancadas por cada uma das três camadas a compactar) corresponde ao método que resultados mais similares apresentou relativamente ao que foi obtido aquando da formulação em laboratório. Porém, se considerados os provetes prismáticos utilizados para a avaliação da deformação permanente e fadiga, considera-se que será o método de compactação leve com o Proctor o que resultados mais similares apresenta para a porosidade.

Na Figura 7.17 observa-se que dos diversos métodos de compactação avaliados todos à exceção do método de compactação com o varão e sem compactação apresentaram uma porosidade inferior à obtida em laboratório. Tal evidencia para os resultados obtidos em laboratório uma sobrecompactação das partículas ativas presentes na mistura SMA de acordo com os métodos de compactação utilizados, traduzida por um aumento da baridade das partículas ativas utilizada na metodologia analítica. No caso de não se utilizar compactação a situação observada é inversa, observando-se uma subcompactação das partículas ativas. Tais resultados evidenciam que a percentagem de partículas ativas utilizada na SMA 14-1.O, a qual rondou valores entre 67,8 % e 68,6 % relativamente à massa total da mistura betuminosa, é passível de ser avaliada segundo o método de compactação com o varão e com compactação leve com o Proctor.

Quadro 7.17 – Análise comparativa das características volumétricas dos provetes compactados em laboratório e da metodologia analítica proposta (SMA 14-2) [0 %;100 % - absorção de betume]

Método de Compactação	Propriedade	Identificação das misturas betuminosas				
		SMA 14-2 5,5 %	SMA 14-2 6,0 %	SMA 14-2 6,5 %	SMA 14-2 7,0 %	SMA 14-2 7,5 %
Estudo de formulação laboratorial	ρ_a (%) ¹⁾	73,3	72,8	72,5	72,1	71,8
	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,351	2,359	2,367	2,346	2,347
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,504	2,429	2,420	2,393	2,386
	V _v (%)	6,1	2,9 (3,5 ²⁾)	2,2	2,0	1,6
	VMA (%)	18,7	16,6	17,2	17,9	18,7
	VFB (%)	67,2	82,7	87,0	89,0	91,3
Sem compactação	ρ_{ba} (Mg/m ³)	1,943;1,934	1,953;1,945	1,964;1,955	1,974;1,966	1,985;1,977
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,451	2,434	2,416	2,399	2,382
	V _v (%)	20,7;21,1	19,7;20,1	18,7;19,1	17,7;18,0	16,7;17,0
	VMA (%)	31,1;31,4	31,1;31,4	31,1;31,4	31,1;31,4	31,1;31,4
	VFB (%)	33,3;32,9	36,6;36,1	39,8;39,3	43,1;42,5	46,5;45,8
Compactação com varão (25 pancadas, 3 camadas)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,071;2,062	2,082;2,073	2,093;2,084	2,104;2,095	2,116;2,107
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,451	2,434	2,416	2,399	2,382
	V _v (%)	15,5;15,9	14,5;14,8	13,4;13,7	12,3;12,7	11,2;11,5
	VMA (%)	26,6;26,9	26,6;26,9	26,6;26,9	26,6;26,9	26,6;26,9
	VFB (%)	41,6;40,9	45,6;44,9	49,7;48,9	53,8;53,0	58,0;57,1
Compactação leve com Proctor "modificado" (25 pancadas, 3 camadas)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,093;2,084	2,104;2,095	2,116;2,107	2,127;2,118	2,139;2,130
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,451	2,434	2,416	2,399	2,382
	V _v (%)	14,6;15,0	13,5;13,9	12,4;12,8	11,3;11,7	10,2;10,6
	VMA (%)	25,8;26,1	25,8;26,1	25,8;26,1	25,8;26,1	25,8;26,1
	VFB (%)	43,3;42,6	47,5;46,8	51,8;50,9	56,1;55,2	60,4;59,5
Compactação pesada com Proctor (55 pancadas, 5 camadas)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,318;2,308	2,330;2,320	2,343;2,333	2,355;2,346	2,368;2,358
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,451	2,434	2,416	2,399	2,382
	V _v (%)	5,4;5,9	4,2;4,7	3,0;3,4	1,8;2,2	0,6;1,0
	VMA (%)	17,8;18,2	17,8;18,2	17,8;18,2	17,8;18,2	17,8;18,1
	VFB (%)	69,5;67,8	76,2;74,4	83,0;81,1	89,9;87,8	96,8;94,6
Compactação com roller compactor (15 passagens com vibração)	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,122;2,113	2,134;2,124	2,145;2,136	2,157;2,148	2,168;2,159
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,451	2,434	2,416	2,399	2,382
	V _v (%)	13,4;13,8	12,3;12,7	11,2;11,6	10,1;10,5	9,0;9,3
	VMA (%)	24,8;25,1	24,8;25,1	24,8;25,1	24,8;25,1	24,8;25,1
	VFB (%)	45,8;45,0	50,2;49,3	54,7;53,8	59,2;58,2	63,8;62,7

Legenda: 1) relativamente à massa total da mistura betuminosa; 2) porosidade média dos provetes prismáticos para avaliação da deformação permanente

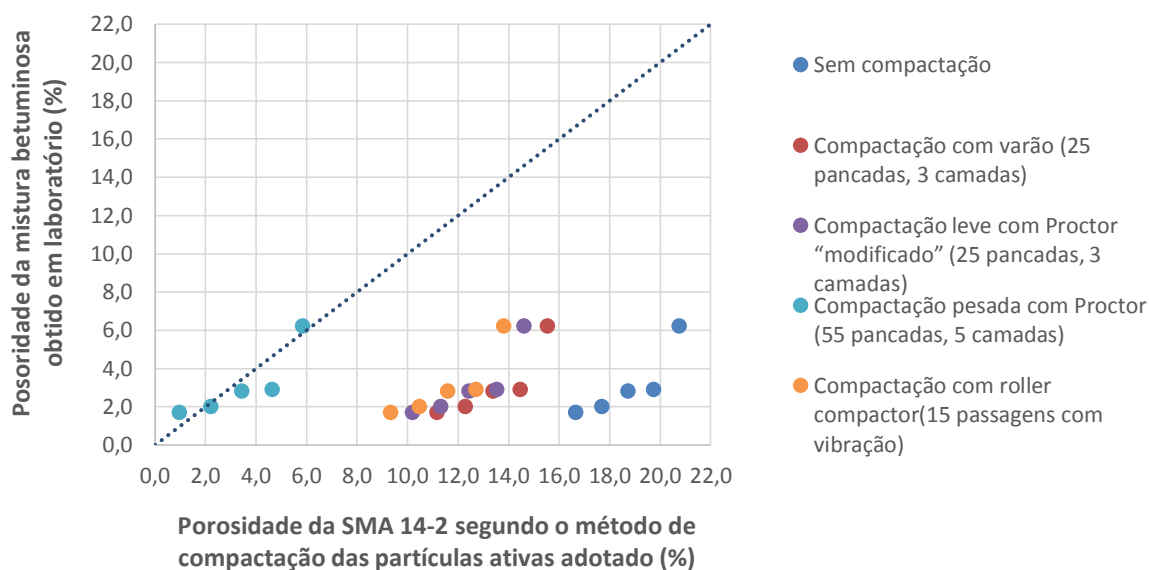


Figura 7.18 – Análise comparativa entre a porosidade obtida no estudo de formulação e nos diferentes métodos de compactação de partículas ativas (SMA 14-2)

Segundo o Quadro 7.17 e a Figura 7.18 é possível constatar dos diversos métodos de compactação avaliados que o método de compactação pesada com o Proctor (55 pancadas por cada uma das cinco camadas a compactar) corresponde ao método que resultados mais similares apresentou relativamente ao que foi obtido aquando da formulação em laboratório. Semelhante conclusão é obtida para os provetes prismáticos compactados para avaliação da deformação permanente com a percentagem ótima (6,0 %). É ainda possível constatar na Figura 7.18 que dos diversos métodos de compactação avaliados todos à exceção do método de compactação pesada com o Proctor apresentaram um volume de vazios superior ao obtido em laboratório, evidenciando um subcompactação das partículas ativas presentes na mistura SMA obtida através da metodologia analítica proposta. À semelhança do que foi observado na SMA 11, os resultados evidenciam que a percentagem de partículas ativas utilizada na SMA 14-2, a qual rondou valores entre 71,8 % e 73,3 % relativamente à massa total da mistura betuminosa, é passível de ser avaliada segundo o método de compactação pesada com o Proctor.

Considerando o Quadro 7.17, é ainda possível verificar que o volume de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume (*VFB*), para o método de compactação pesada com o Proctor, apresentou resultados similares aos obtidos em laboratório.

7.3.2 APRECIÇÃO SUCINTA DOS RESULTADOS OBTIDOS

Decorrente dos ensaios realizados e com o objetivo de permitir uma análise integrada, apresenta-se seguidamente de forma sucinta os resultados obtidos na análise comparativa da avaliação das características volumétricas dos provetes das misturas SMA (SMA 11, SMA 12.O, SMA 14-1.O, SMA 14-2) avaliadas na segunda fase do presente estudo experimental, relativamente à metodologia analítica proposta.

Na Figura 7.19 são apresentadas as diferenças médias observadas para os diversos métodos de compactação avaliados, comparativamente aos resultados obtidos em laboratório para as misturas SMA avaliadas na segunda fase do estudo (Fase 2). Para a análise foi considerada uma absorção de betume de 0 % e de 100%.

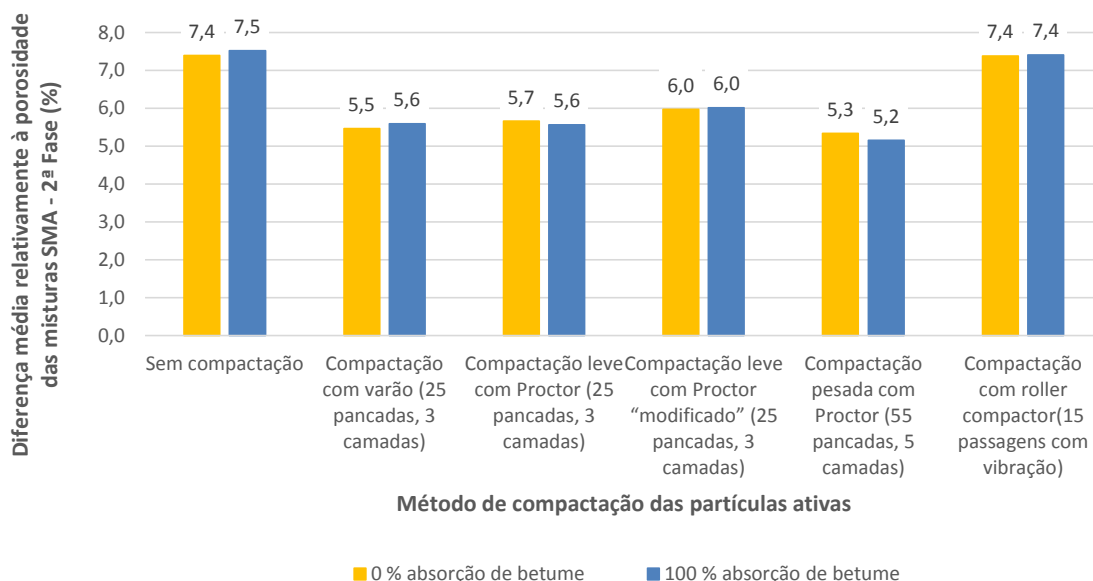


Figura 7.19 – Diferença entre a porosidade obtida no estudo de formulação e nos métodos de compactação de partículas ativas (0 % e 100 % de absorção de betume)

Segundo a Figura 7.19 parece, numa primeira análise, constatar-se que não existe um método de compactação passível de ser utilizado para a formulação de todas as misturas SMA avaliadas no presente estudo, sem que seja necessário o recurso à formulação através da compactação de provetes em laboratório. De acordo com a Figura 7.19 com os resultados obtidos para o volume de vazios, a compactação pesada com o Proctor (55 pancadas por cada uma das cinco camadas a compactar), corresponde à que menores diferenças médias apresentou, cerca de 5,3 % para as diferentes misturas SMA avaliadas. Inversamente, está o caso em que não se aplica compactação e a compactação com o roller compactor, ambos com uma diferença média correspondente a cerca de 7,4 %.

Para aferir os resultados anteriormente obtidos, na Figura 7.20 é efetuada uma análise comparativa entre a percentagem de partículas ativas utilizada em cada SMA e a baridade das partículas ativas requerida para que a metodologia analítica proposta determine uma porosidade igual à obtida para os provetes compactados em laboratório (percentagem ótima de betume) aquando da segunda fase do presente estudo.

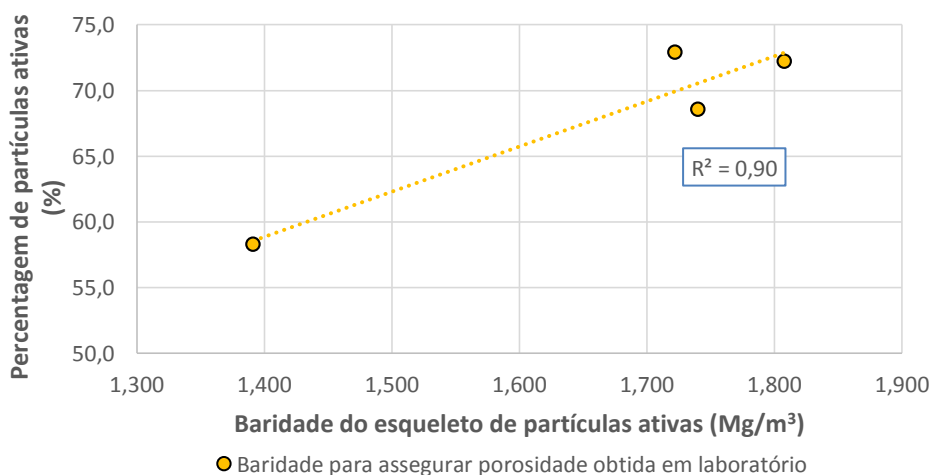


Figura 7.20 – Percentagem de partículas ativas relativamente à baridade requerida para obter a porosidade dos provetes compactados em laboratório com a percentagem ótima de betume

Os resultados apresentados na Figura 7.20 mostram que, a uma diminuição da percentagem de partículas ativas utilizada em cada SMA tende a corresponder uma diminuição na baridade requerida para o esqueleto de partículas ativas e conseqüentemente da energia de compactação necessária. É ainda possível verificar que, quando efetuado o rácio entre a baridade requerida para obter a porosidade dos provetes compactados em laboratório e a baridade das partículas ativas sem compactação se obtém um valor de: 1,14 (114 %) para a SMA 11; 0,97 (97 %) para a SMA 12.O; 1,10 (110 %) para a SMA 14-1.O e 1,21 (121 %) para a SMA 14-2.

Os resultados obtidos corroboram o que foi anteriormente constatado na Figura 7.12, evidenciando que a SMA 11 e SMA 14-2 apresentaram um rácio correspondente ao obtido para a compactação pesada com o Proctor, apesar de não terem a percentagem de partículas ativas otimizada. Do mesmo modo a SMA 14-1.O apresentou um rácio inferior ao obtido pela compactação pesada com o Proctor correspondente ao rácio obtido pelo método de compactação com o varão ou com compactação leve com o Proctor. Na Figura 7.21 (0 % de absorção de betume) e Figura 7.22 (100 % de absorção de betume) é efetuada a mesma análise que na Figura 7.20, porém apenas para os métodos de compactação das partículas ativas que melhor simularam as características volumétricas das SMA na metodologia analítica proposta.

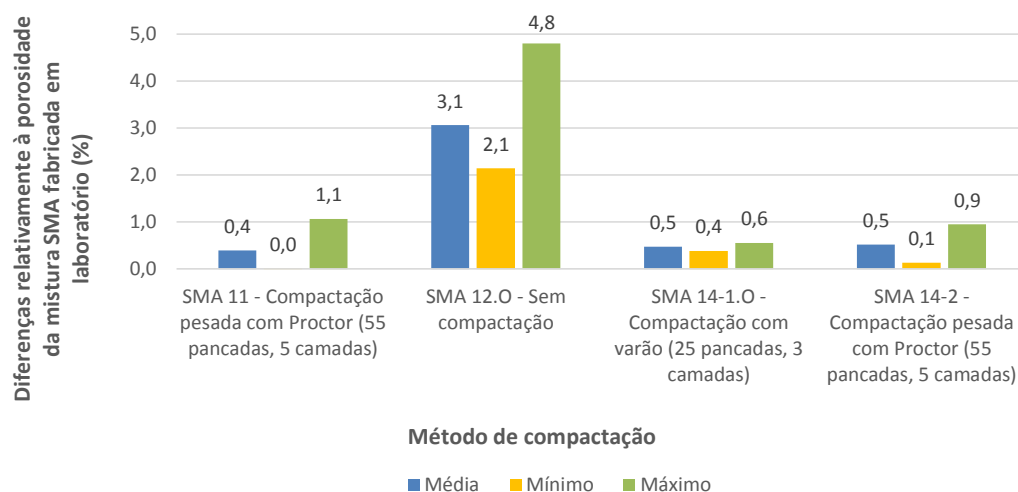


Figura 7.21 – Diferença entre a porosidade obtida no estudo de formulação e nos métodos de compactação de partículas ativas mais representativos (0% de absorção de betume)

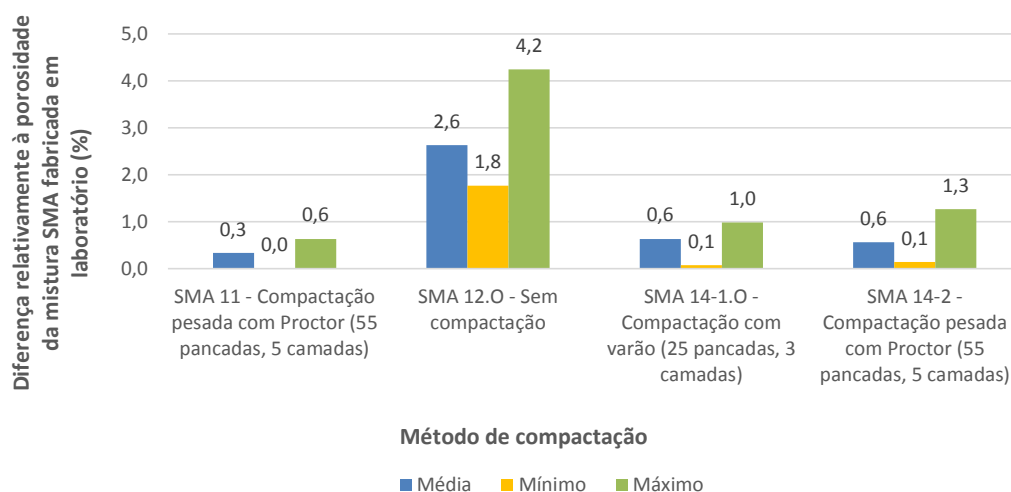


Figura 7.22 – Diferença entre a porosidade obtida no estudo de formulação e nos métodos de compactação de partículas ativas mais representativos (100% de absorção de betume)

Ao invés do que foi constatado na Figura 7.20, na Figura 7.21 e na Figura 7.22 é possível observar, caso não seja considerada a situação sem compactação, uma diferença máxima de 1,3 % para o método de compactação pesada com o Proctor (55 pancadas em cada uma das cinco camadas a compactar), apresentando o mesmo método o valor mínimo nulo para a diferença entre os resultados avaliados em laboratório e os estimados.

Do mesmo modo, segundo os resultados obtidos Figura 7.16 para a SMA 12.O e de acordo com a Figura 7.21 e Figura 7.22, observa-se que a utilização de uma reduzida percentagem de partículas ativas é traduzida numa reduzida baridade das partículas ativas, inferior à observada para a baridade das partículas ativas sem compactação.

Complementarmente na Figura 7.23 são apresentados apenas os resultados para as misturas SMA 11, SMA 14-1.O e SMA 14-2, uma vez que se considera que a percentagem de partículas ativas da SMA 12.O não permite a obtenção de um efeito de *stone-on-stone*, dado que a baridade das partículas ativas é inferior à obtida na avaliação sem compactação.

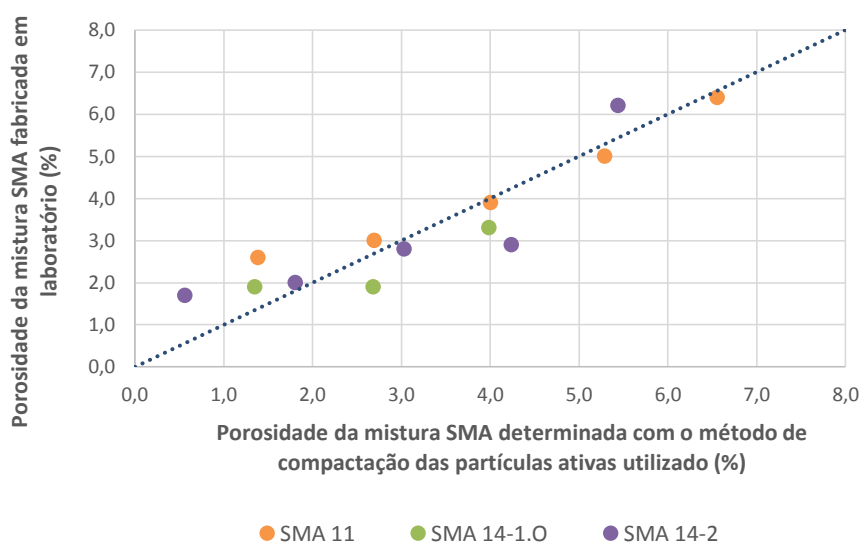


Figura 7.23 – Análise comparativa entre a porosidade (0 % de absorção de betume) obtida no estudo de formulação e nos métodos de compactação de partículas ativas mais representativos (SMA 11, SMA 14-1.O e SMA 14-2)

Os resultados apresentados na Figura 7.21 e na Figura 7.23 corroboram o que foi indicado por Vavrik (2000) e Yu (2012) no ponto 3.2.4, de que o arranjo estrutural que as partículas tomam depende do tipo e quantidade de energia de compactação utilizada. Assim o método de compactação utilizado deverá ser definido com o intuito de otimizar o efeito de *stone-on-stone*, assim como o desempenho global da mistura SMA.

Adicionalmente, os resultados obtidos permitem ainda corroborar de forma analítica, o que se havia constatado na revisão bibliográfica, para o método de Bailey (ponto 4.5.3), que refere a necessidade de se compactar misturas betuminosas contínuas com uma baridade inferior a 90 % relativamente à baridade das partículas ativas sem compactação, entre 95 % e 105 % para misturas ligeiramente descontínuas e entre 110 % e 125 % para misturas SMA.

De acordo com o que foi constatado na revisão bibliográfica o método de compactação com o varão segundo o procedimento proposto nos EUA, tende a contribuir para a formulação de misturas SMA

com uma maior quantidade de finos (granulometria mais contínua). Segundo a análise realizada, isso mesmo foi evidente com a SMA 14-1.O a ter cerca de 68 % de partículas ativas (método de compactação com o varão ou com compactação leve com o Proctor), ao contrário das misturas SMA 11 e SMA 14-2 que apresentaram uma percentagem de partículas ativas superior, cerca de 73 % (ambos representativos de uma compactação pesada com Proctor).

Os resultados obtidos evidenciam o que foi constatado nas conclusões da segunda fase do estudo experimental (Fase 2). A utilização de fusos granulométricos definidos em países em que é comum a aplicação de misturas SMA, não garante por si só, que a utilização de misturas formuladas dentro dos limites dos fusos recomendados, assegurem misturas SMA com um desempenho adequado. Acrescentando-se segundo as atuais conclusões que não existe igualmente a garantia de obtenção e/ou otimização do efeito de *stone-on-stone*, como é o caso da SMA 12.O ou que o mesmo esteja otimizado como o caso das restantes SMA, em especial a SMA 14-1.O.

7.3.3 CONCLUSÕES

De acordo com o estudo realizado sobre os métodos de compactação das partículas ativas e sua incorporação na metodologia analítica proposta para formular misturas SMA com um desempenho otimizado, no qual se inclui o efeito de *stone-on-stone* avaliado na presente fase do estudo experimental, conclui-se que:

- os métodos que melhor simularam as características volumétricas das misturas SMA avaliadas na metodologia analítica proposta, corresponderam ao método de compactação com o varão ou compactação leve com o Proctor e a compactação pesada com o Proctor. Dos três métodos, a compactação pesada com o Proctor é o método que permite obter uma maior percentagem de partículas ativas, comparativamente aos dois restantes métodos;
- a diminuição da baridade das partículas ativas, resulta da utilização de uma menor energia de compactação, a qual promove a diminuição da percentagem de partículas ativas utilizada nas SMA, assim como da espectável percentagem de betume requerida;
- no caso da formulação de misturas SMA, em que se pretende otimizar o efeito de *stone-on-stone* e a percentagem de betume, dos diversos métodos de compactação de partículas ativas avaliados o que maior potencial apresenta é o método de compactação pesada com o Proctor (55 pancadas por cada uma das cinco camadas a compactar). Para a fase posterior de otimização das misturas SMA (SMA 12.O e SMA 14-1.O) considerou-se como métodos de compactação, adicionalmente ao Proctor, o método de compactação com o varão (25 pancadas por cada uma das três camadas a compactar), para avaliar o método recomendado nos EUA e o *roller compactor* (15 passagens com vibração), este último por permitir em alguns casos, a utilização de uma maior percentagem de partículas ativas, o que poderá promover a utilização de uma maior percentagem de betume nas misturas SMA;
- não é espectável que a percentagem de partículas ativas da SMA 12.O permita a obtenção de um efeito de *stone-on-stone*, uma vez que a baridade das partículas ativas na mistura betuminosa é inferior à avaliada sem compactação. Os resultados obtidos para a SMA 12.O evidenciam o que foi concluído na segunda fase do estudo experimental (Fase 2), a utilização de fusos granulométricos definidos em países em que é comum a aplicação de misturas SMA, não garante por si só, que a utilização de misturas formuladas dentro dos limites dos fusos recomendados, assegurem misturas SMA que permitam a utilização de uma elevada percentagem de betume (superior a 6,0 %) e/ou que apresente um desempenho adequado.

Acrescentando-se segundo as atuais conclusões que não existe igualmente a garantia de obtenção e/ou otimização do efeito de *stone-on-stone*, como é o caso da SMA 12.O ou que o mesmo esteja otimizado como o caso das restantes SMA, em especial a SMA 14-1.O;

- os resultados obtidos permitem ainda concluir de forma analítica, o que se havia constatado na revisão bibliográfica, para o método de Bailey (ponto 4.5.3), que refere a necessidade de se compactar misturas betuminosas contínuas com uma baridade inferior a 90 % relativamente à baridade das partículas ativas sem compactação, entre 95 % e 105 % para misturas ligeiramente descontínuas e entre 110 % e 125 % para misturas SMA.

8 OTIMIZAÇÃO DAS MISTURAS SMA (FASE 4)

8.1 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

A presente quarta fase do estudo experimental contempla inicialmente, a formulação de diferentes misturas SMA a otimizar (do tipo SMA 12 e SMA 14), através da metodologia analítica e dos métodos de compactação das partículas ativas propostos no ponto 7.3.3 para incorporar o método de formulação proposto. Para as misturas SMA “otimizadas”, são posteriormente realizados os respectivos estudos de formulação segundo o método *Marshall*. Os estudos de formulação laboratorial tem como objetivo validar as características volumétricas obtidas para as misturas SMA, assim como a percentagem ótima de betume a adotar para cada SMA, comparativamente ao método de formulação proposto.

Posteriormente na presente fase procede-se à avaliação do desempenho das misturas SMA definidas anteriormente. A avaliação do desempenho mecânico das SMA incluiu, nomeadamente, a avaliação do escorrimento de material betuminoso, da resistência à água, da resistência à deformação permanente e da resistência ao fendilhamento por fadiga, assim como a avaliação da resistência ao envelhecimento. A avaliação contou ainda com a avaliação do desempenho funcional das misturas SMA formuladas, no que concerne à resistência à derrapagem através do pêndulo britânico e da macrotextura através do método volumétrico da mancha.

A avaliação do desempenho mecânico e funcional visa complementarmente ao *stone-on-stone* o desenvolvimento dos conceitos que são propostos de *mix-skeleton* e *tire-on-stone*, respetivamente, considerando os conceitos propostos de *mastic-within-stone* e a obtenção de um *i-performance*. Importa deste modo descrever os conceitos indicados para uma melhor compreensão da metodologia de formulação proposta no presente trabalho.

O sistema integrado de formulação e controlo de qualidade de uma SMA que se pretende desenvolver, assenta na definição da composição volumétrica ótima da mistura betuminosa que assegure um desempenho mecânico e funcional adequados, *i-performance* (*improved performance*).

Como constatado na revisão bibliográfica, a melhoria do comportamento à deformação permanente resulta da estrutura pétreia que uma mistura betuminosa oferece, a qual é fortemente baseada na utilização de uma curva granulométrica descontínua, contribuindo para um efeito de *stone-on-stone* entre as partículas ativas.

Contudo, a obtenção do efeito de *stone-on-stone* requer uma adequada formulação das misturas SMA de modo a que, o volume de vazios e de mastique betuminoso (partículas passivas, filler, aditivos estabilizantes e betume) seja inferior ao volume de vazios disponível entre as partículas ativas. Todavia esta premissa, não assegura que o efeito de *stone-on-stone* obtido esteja otimizado, ou que a mistura betuminosa apresente um desempenho global adequado. Tal resulta do facto dos métodos de formulação existentes assentarem na determinação de um volume de partículas ativas ou de partículas passivas a utilizar para assegurar, ou não afetar o efeito de *stone-on-stone*, respetivamente. Tal conduz a que seja aparentemente “irrelevante” qual a composição do volume de mastique betuminoso, a utilizar desde que asseguradas as características volumétricas pretendidas para a mistura SMA, uma vez que um adequado comportamento à deformação permanente é teoricamente assegurado pelo efeito de *stone-on-stone*.

A proposta do conceito de *mastic-within-stone* visa contribuir para responder à problemática anteriormente formulada. Após determinado o efeito de *stone-on-stone* o conceito de *mastic-within-stone* visa determinar a composição volumétrica dos diferentes materiais constituintes a utilizar no mastique betuminoso, sem com isso condicionar o efeito de *stone-on-stone*.

Para definição da composição volumétrica do mastique betuminoso (*mastic-within-stone*) são tidas em consideração de forma simultânea as características volumétricas pretendidas para a mistura SMA (segundo a metodologia analítica proposta no ponto 7.3), o seu desempenho mecânico e funcional, assim como a trabalhabilidade. Assim o conceito de *mastic-within-stone* integra os dois conceitos propostos de *mix-skeleton*, *tire-on-stone* e o conceito utilizado na Austrália de *free binder*.

O conceito de *mix-skeleton* que se propõe e que se pretende desenvolver no presente capítulo, visa contribuir para que a definição da composição do mastique betuminoso a utilizar na mistura SMA, seja baseado no desempenho da SMA e não apenas de forma exclusiva na resistência à deformação permanente. Assim o conceito de *mix-skeleton*, permite ao utilizador aquando da definição da composição do mastique betuminoso, compreender quais as consequências no que concerne à resistência à deformação permanente, à resistência ao fendilhamento por fadiga, assim como do módulo de deformabilidade da mistura SMA.

Complementarmente, uma mistura SMA de alto desempenho requer que seja assegurado simultaneamente a obtenção de um adequado desempenho funcional. O conceito de *tire-on-stone* que se propõe e que se pretende desenvolver no presente capítulo trabalho tem como intuito contribuir para uma adequada definição da composição volumétrica do mastique betuminoso considerando a obtenção de uma adequada profundidade média da textura.

Adicionalmente, considerou-se ainda importante que a formulação pudesse simultaneamente considerar a obtenção de misturas SMA com uma adequada trabalhabilidade, através da sua avaliação com o conceito de *free binder* utilizado na Austrália. O conceito de *free binder* avaliado no presente capítulo serve igualmente no método de formulação proposto como pressuposto na adequada definição da composição volumétrica do mastique betuminoso.

O método de formulação proposto pretende assim a formulação de misturas *i-SMA* (*improved SMA*) que assegurem simultaneamente o efeito de *stone-on-stone*, de *mastic-within-stone* (através dos efeitos de *mix-skeleton* e *tire-on-stone*) e de *free binder*, os quais contribuirão para permitir a um utilizador, uma adequada definição da composição volumétrica ótima da mistura SMA visando a obtenção de um *i-performance*.

Sendo o método fortemente baseado numa metodologia analítica, tal permite que o mesmo seja utilizado numa fase posterior à formulação, como método de controlo da qualidade das misturas fabricadas em laboratório e/ou aplicadas em obra no que concerne ao seu espectável desempenho.

No Quadro 8.1 são apresentadas as misturas SMA avaliadas na presente fase, assim como a respetiva avaliação realizada.

Quadro 8.1 – Misturas SMA utilizadas na quarta fase do estudo experimental e tipo de avaliação realizada

Fase do estudo experimental	Avaliação realizada	Tipo de mistura SMA									
		SMA 11	SMA 12				SMA 14-1			SMA 14-2	
			O	A	B	C	O	D	E		
4. ^a	4.1			■	■	■			■	■	
	4.2		■	■	■	■	■	■	■	■	■
	4.3		■		■	■	■	■	■	■	■
	4.4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	4.5	■	■	■	■	■	■		■	■	■
	4.6	■	■	■	■	■	■	■ ¹⁾	■	■	■
	4.7	■	■		■	■	■		■		
	4.8		■		■	■	■ ²⁾		■		
	4.9	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	4.10	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	4.11		■								
	4.12		■								
■	Ensaios desenvolvidos na segunda fase do estudo experimental										
■	Ensaios desenvolvidos na presente fase do estudo experimental (Fase 4)										

Legenda: 1) avaliado para uma percentagem de betume de 7,0 %; 2) amostras recolhidas de obra (fábrica da TEXSA)

O fabrico em laboratório e caracterização das misturas SMA foram realizados nas instalações do Núcleo de Infraestruturas Rodoviárias e Aeroportuárias do Departamento de Transportes do LNEC. No que concerne à avaliação dos ensaios de fadiga e de avaliação da resistência ao envelhecimento, os mesmos foram concretizados nas instalações do Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico.

8.2 ESTUDO DE FORMULAÇÃO DAS MISTURAS SMA A OTIMIZAR

Para a metodologia analítica proposta no ponto 7.3 foi efetuado o cálculo das características volumétricas das misturas SMA “otimizadas” (designadas por SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.D e SMA 14-1.E), considerando os materiais utilizados nas misturas SMA 12.O e SMA 14-1.O. Esta análise teve como objetivo a contínua validação da metodologia analítica proposta e os respetivos métodos de compactação das partículas ativas propostos no ponto 7.3.3:

- o método de compactação pesada com o Proctor (55 pancadas por cada uma das cinco camadas a compactar);
- o método de compactação com o varão (25 pancadas por cada uma das três camadas a compactar) e;
- o método de compactação com o *roller compactor* (15 passagens com vibração).

No caso da SMA 14-1 a avaliação apenas considerou o método de compactação pesada com o Proctor, dada a similaridade entre a curva granulométrica correspondente à mistura SMA 14-1.D (baridade determinada com a compactação pesada com o Proctor) é semelhante à obtida para a curva

granulométrica da mistura SMA 14-1.H2 (baridade determinada com a compactação com *roller compactor*). A mesma constatação foi obtida para a mistura SMA 14-1.H1 (baridade determinada com a compactação com o varão) a qual apresenta uma curva granulométrica semelhante à SMA 14-1.O.

8.2.1 MISTURAS A OTIMIZAR DO TIPO SMA 12

Para a otimização das misturas do tipo SMA 12, foram definidos os três métodos de compactação de partículas ativas anteriormente referidos, os quais serviram de base para a definição das baridades a utilizar para as partículas ativas. No Quadro 8.2 resumem-se as baridades das partículas ativas a utilizar, em função do método de compactação, que correspondem às previamente determinadas no ponto 7.2.

Quadro 8.2 – Baridades das partículas ativas utilizadas na otimização das misturas do tipo SMA 12

Identificação das misturas betuminosas	Método de compactação	Peneiro de referência (mm)	Resultados obtidos	
			Baridade (Mg/m ³)	Volume de vazios entre as partículas ativas (%)
SMA 12.A	Compactação com varão (25 pancadas, 3 camadas)	4	1,550	43,0
SMA 12.B	Compactação pesada com Proctor (55 pancadas, 5 camadas)		1,700	37,5
SMA 12.C	Compactação com <i>roller compactor</i> (15 passagens com vibração)		1,740	36,1

Tendo em consideração as baridades das partículas ativas apresentadas no Quadro 8.2 foram definidas as curvas granulométricas para se assegurar as baridades pretendidas, de acordo com a metodologia analítica proposta no ponto 7.3 para formulação das misturas SMA. Para a definição das curvas granulométricas, não foi tido em consideração a utilização de um fuso granulométrico específico, mas apenas os limites gerais que se apresentam no Quadro 8.3 para a composição granulométrica da mistura de agregados com D = 12 mm (especificados na norma de produto EN 13108-5).

Quadro 8.3 – Requisitos para os limites gerais do fuso granulométrico (EN 13108-5)

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (série "base+2") (mm)	Percentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)
	D = 12 mm
18	100
14	-
12,5	90 - 100
10	-
2	15 - 35
0,063	5,0 - 13,0

Para a metodologia analítica proposta, foram definidas as seguintes composições granulométricas para as misturas do tipo SMA 12, de acordo com o método de compactação de partículas ativas escolhido, as quais se indicam no Quadro 8.4 e cujas curvas granulométricas se representam na Figura 8.1. No Quadro 8.4 e na Figura 8.1 é ainda apresentada informação relativa à mistura SMA 12.O, aplicada na Avenida do Brasil, para efeitos comparativos.

Quadro 8.4 – Fórmulas de trabalho definidas para as misturas do tipo SMA 12

Fração	Identificação das misturas SMA e natureza dos agregados			
	SMA 12			
	O	A	B	C
	Granodioritos			
6/10 mm	64,5	73,0	80,0	82,0
0/4 mm	30,5	17,0	9,0	6,0
Fíler comercial	5,0	10,0	11,0	12,0

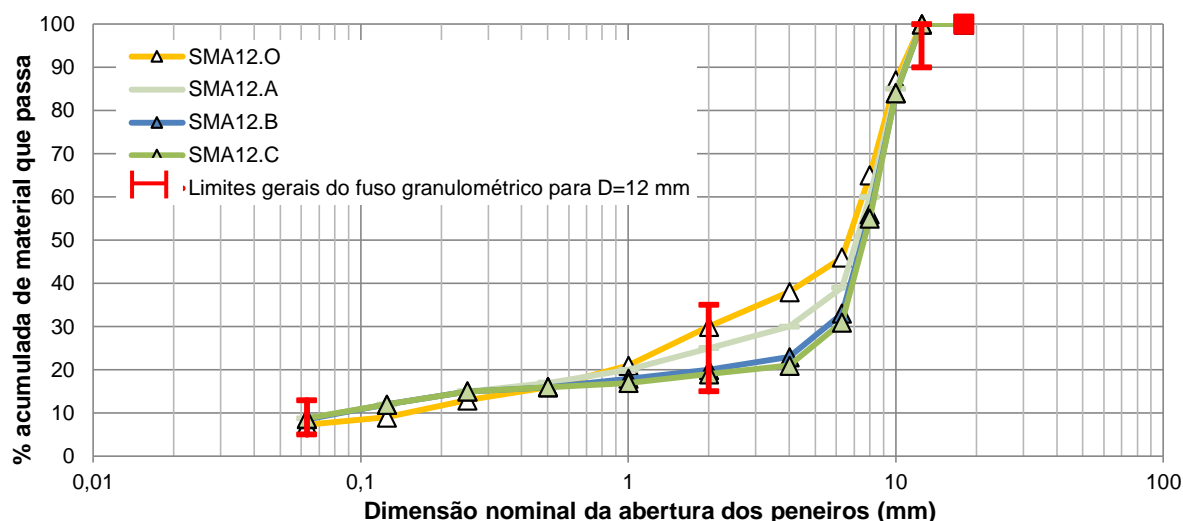


Figura 8.1 – Curvas granulométricas definidas para cada mistura do tipo SMA 12

Posteriormente, para cada curva granulométrica foram escolhidas três percentagens diferentes de betume, para um intervalo entre 5,5 % e 6,5 %, variando-se as percentagens entre si de 0,5 %. A exceção foi a mistura SMA 12.C em que foram utilizadas quatro percentagens distintas de betume (5,5 % e 7,0 %). O intervalo definido teve em consideração a percentagem mínima de betume proposta no Quadro 3.15 para uma mistura do tipo SMA 12 ($\geq 5,5$ %).

Adicionalmente para mitigar o escorrimento de material betuminoso, para cada mistura SMA (SMA 12.A, SMA 12.B e SMA 12.C) foi estimada uma percentagem preliminar entre 0,5 % ($D \leq 0,3$) e 0,6 % ($D \leq 0,2$) de fibras celulósicas de acordo com a equação (5.2) proposta no ponto 5.5 para o valor máximo (6,5 %) das percentagens de betume analisadas. Para o fabrico dos provetes optou-se pela utilização de uma percentagem de fibras celulósicas igual a 0,5 %, considerando os resultados que haviam sido obtidos anteriormente no Quadro 5.7 no ponto 5.5.

No Quadro 8.5 são apresentados os resultados decorrentes da metodologia analítica proposta no ponto 7.3 para a avaliação das características volumétricas dos provetes de mistura SMA. Os resultados são apresentados, por método de compactação, e têm por base o respetivo valor da baridade determinado para as partículas ativas segundo cada método proposto. Adicionalmente, são ainda apresentados os resultados considerando uma absorção de betume nula e igual a 100 %.

Quadro 8.5 – Características volumétricas estimadas para os provetes compactados em laboratório segundo a metodologia analítica proposta (SMA 12) [0 %;100 % - absorção de betume]

Método de Compactação	Propriedade	Identificação das misturas betuminosas			
		SMA 12.A 5,5 %	SMA 12.A 6,0 %	SMA 12.A 6,5 %	-
Compactação com varão (25 pancadas, 3 camadas)	p_a (%) ¹⁾	65,9	65,5	65,2	-
	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,357;2,346	2,370;2,359	2,382;2,372	-
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,474	2,456	2,438	-
	V_v (%)	4,7;5,2	3,5;3,9	2,3;2,7	-
	VMA (%)	17,3;17,7	17,3;17,7	17,3;17,7	-
	VFB (%)	72,7;70,8	79,8;77,7	86,9;84,7	-
Método de Compactação	Propriedade	SMA 12.B 5,5 %	SMA 12.B 6,0 %	SMA 12.B 6,5 %	-
Compactação pesada com Proctor (55 pancadas, 5 camadas)	p_a (%) ¹⁾	72,2	71,8	71,4	-
	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,356;2,346	2,369;2,359	2,381;2,371	-
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,483	2,463	2,444	-
	V_v (%)	5,1;5,5	3,8;4,2	2,6;3,0	-
	VMA (%)	17,7;18,1	17,6;18,0	17,6;17,9	-
	VFB (%)	71,1;69,4	78,3;76,5	85,3;83,4	-
Método de Compactação	Propriedade	SMA 12.C 5,5 %	SMA 12.C 6,0 %	SMA 12.C 6,5 %	SMA 12.C 7,0 %
Compactação com roller compactor (15 passagens com vibração)	p_a (%) ¹⁾	74,0	73,6	73,2	72,7
	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,349-2,340	2,362;2,353	2,375;2,365	2,387;2,378
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,484	2,465	2,447	2,428
	V_v (%)	5,4;5,8	4,2;4,6	3,0;3,3	1,7;2,0
	VMA (%)	18,0;18,3	17,9;18,3	17,9;18,3	17,9;18,2
	VFB (%)	69,9;68,3	76,7;75,0	83,5;81,7	90,7;88,8

Legenda: 1) relativamente à massa total da mistura betuminosa

Posteriormente, para validação dos resultados obtidos foi efetuada a formulação das misturas do tipo SMA 12 (SMA 12.A, SMA 12.B e SMA 12.C) anteriormente definidas, através do método *Marshall*, tendo a compactação dos provetes, sido realizada através do compactador de impacto, considerando 50 pancadas em cada topo dos provetes.

Para o estudo das misturas SMA 12, teve-se em consideração as composições granulométricas e as percentagens de betume e de aditivo previamente definidas. A adição das fibras celulósicas foi efetuada segundo o método a frio definido previamente no ponto 5.3.

— Mistura SMA 12.A —

Para os provetes fabricados de mistura SMA 12.A procedeu-se à sua posterior avaliação em laboratório, obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 8.6 e representados graficamente na Figura 8.2.

Quadro 8.6 – Resultados do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 12.A compactados com 50 pancadas

Propriedade		Identificação das misturas betuminosas		
		SMA 12.A 5,5 %	SMA 12.A 6,0 %	SMA 12.A 6,5 %
		Número de pancadas		
		50	50	50
Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)		2,435	2,429	2,422
Ensaio <i>Marshall</i>	Estabilidade, <i>S</i> (kN)	14,5	13,2	13,9
	Deformação, <i>F</i> (mm)	4,9	4,8	5,9
	Quociente <i>Marshall</i> , <i>Q</i> (kN/m)	3,0	2,8	2,5
Baridade máxima teórica, ρ_{mt} (Mg/m ³)		2,484	2,455	2,439
Porosidade, V_V (%)		2,0 (2,2 ²)	1,1	0,7
Percentagem de vazios na mistura de agregados, <i>VMA</i> (%)		15,0	15,2	16,0
Percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume, <i>VFB</i> (%)		86,7	92,9	95,6
Método Americano	VCA_{MIX} / VCA_{DRC} ¹⁾	0,95	0,97	0,98
Método Australiano	<i>Free binder</i> (%)	8,9	10,1	11,2

Legenda: 1) utilizando o método de compactação com o varão para compactar as partículas ativas;
2) provetes prismáticos para avaliação da deformação permanente e fendilhamento por fadiga

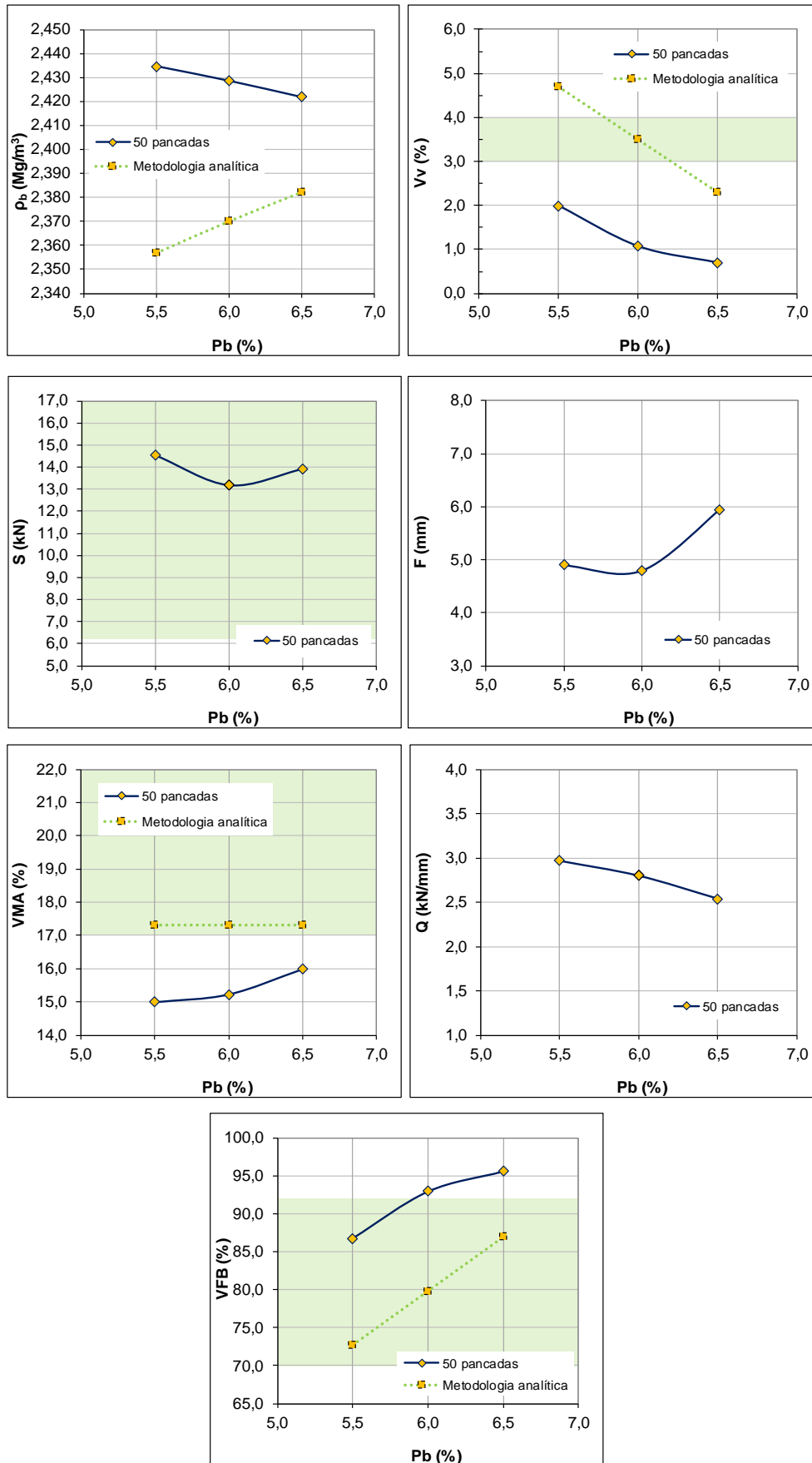


Figura 8.2 – Comparação entre os resultados da metodologia analítica e do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 12.A compactados com 50 pancadas (0% de absorção de betume)

Segundo o estudo de formulação efetuado, verifica-se que os provetes de mistura SMA 12.A tendem a apresentar uma porosidade e um volume de vazios na mistura de agregados (*VMA*) inferiores aos que seriam espectáveis de acordo com a metodologia analítica proposta. Semelhante conclusão é obtida se considerados os provetes compactados com o *roller compactor* para avaliação da deformação permanente (percentagem ótima de betume), onde a porosidade média é de 2,2 %, comparativamente a um intervalo de 4,7 % e 5,2 % para a metodologia analítica proposta. Apesar de ser possível modificar a relação entre os finos e filler, considerou-se que não seria espectável a obtenção de uma porosidade igual a 3,0 % para percentagens de betume superiores a 5,5 %.

Apesar de se ter obtido para os provetes compactados em laboratório, apenas uma porosidade igual a 2,0 % para 5,5 % de betume, considerou-se posteriormente a avaliação da sensibilidade à água e a avaliação do efeito de *stone-on-stone* através da avaliação da deformação permanente, assim como a profundidade média da textura e a resistência à derrapagem através do pêndulo britânico.

De acordo com a metodologia analítica e validação com o estudo de formulação *Marshall* e provetes prismáticos compactados com o *roller compactor* obteve-se a fórmula de trabalho para a mistura SMA 12.A (SMA 12 surf PmB 45/80-55), que se apresenta seguidamente por material:

- fração 6/10 mm 68,6 %;
- fração 0/4 mm 16,0 %;
- filer comercial 9,4 %;
- fibras celulósicas 0,5 %;
- betume modificado 5,5 %.

— Mistura SMA 12.B —

Para os provetes fabricados de mistura SMA 12.B procedeu-se à sua posterior avaliação em laboratório, obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 8.7 e representados graficamente na Figura 8.3.

Quadro 8.7 – Resultados do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 12.B compactados com 50 pancadas

Propriedade		Identificação das misturas betuminosas		
		SMA 12.B 5,5 %	SMA 12.B 6,0 %	SMA 12.B 6,5 %
		Número de pancadas		
		50	50	50
Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)		2,375	2,389	2,400
Ensaio <i>Marshall</i>	Estabilidade, <i>S</i> (kN)	11,2	13,0	11,7
	Deformação, <i>F</i> (mm)	2,8	4,5	3,9
	Quociente <i>Marshall</i> , <i>Q</i> (kN/m)	4,0	2,9	3,0
Baridade máxima teórica, ρ_{mt} (Mg/m ³)		2,514	2,493	2,485
Porosidade, V_v (%)		5,5	4,2	3,4 (2,6;2,9) ²⁾
Percentagem de vazios na mistura de agregados, <i>VMA</i> (%)		18,2	18,1	18,6
Percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume, <i>VFB</i> (%)		69,7	76,9	81,6
Método Americano	VCA_{MIX} / VCA_{PC} ¹⁾	0,98	0,99	0,99
Método Australiano	<i>Free binder</i> (%)	8,3	9,5	10,7

Legenda: 1) utilizando o método de compactação pesada com o Proctor para compactar as partículas ativas; 2) provetes prismáticos para avaliação da deformação permanente e fendilhamento por fadiga

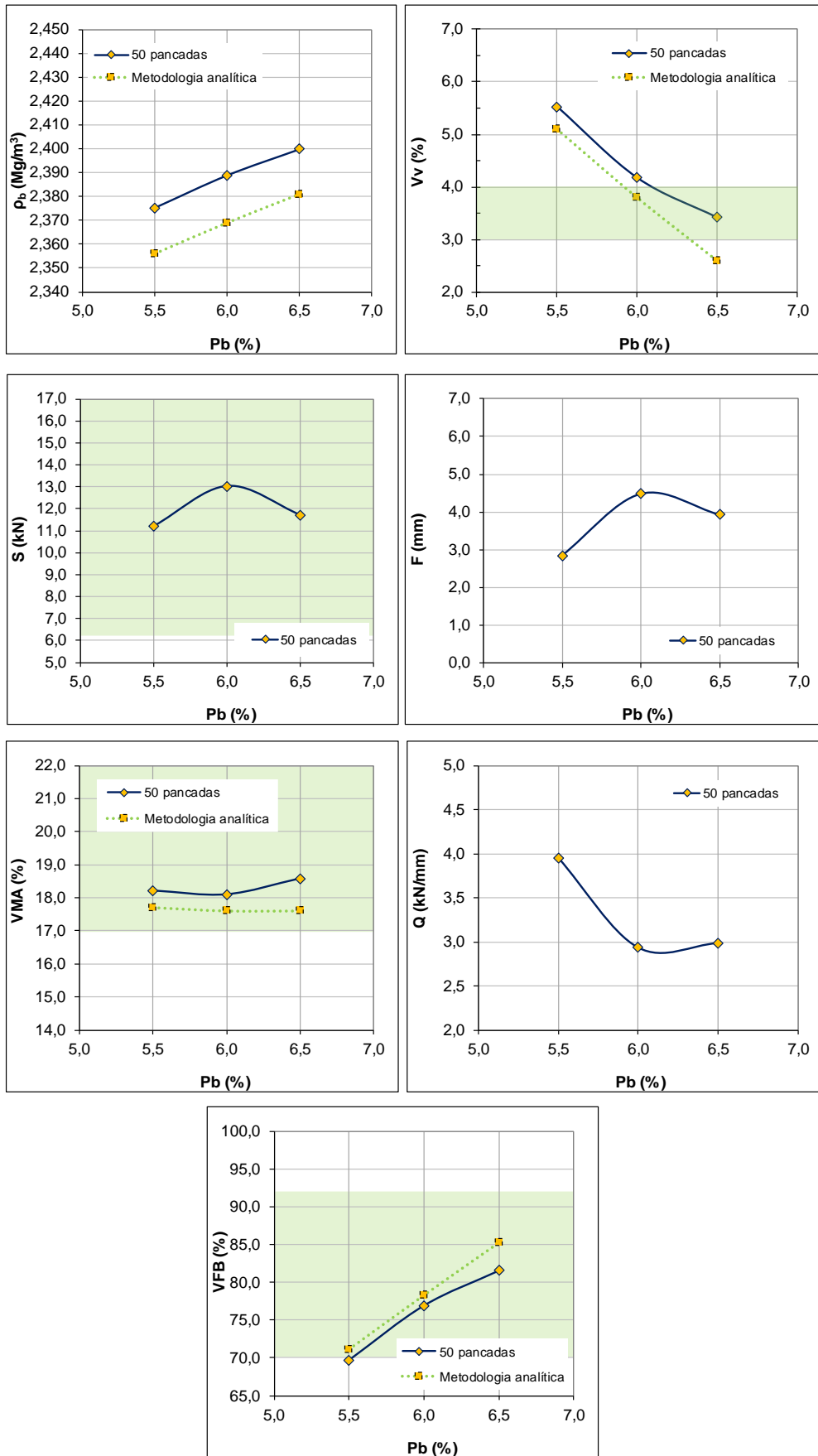


Figura 8.3 – Comparação entre os resultados da metodologia analítica e do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 12.B compactados com 50 pancadas (0% de absorção de betume)

Segundo o estudo de formulação efetuado, verifica-se que os provetes de mistura SMA 12.B, tendem a apresentar uma porosidade e um volume de vazios na mistura de agregados (*VMA*) semelhante ao que foi obtido de acordo com a metodologia analítica proposta. Os resultados são corroborados se considerados os provetes compactados com o *roller compactor* para avaliação da deformação permanente e do fendilhamento por fadiga (percentagem ótima de betume) onde a porosidade média variou entre 2,6 % e 2,9 %, respetivamente, comparativamente a um intervalo de 2,6 % e 3,0 % para a metodologia analítica proposta.

De acordo com a metodologia analítica e validação com o estudo de formulação *Marshall* e provetes prismáticos compactados com o *roller compactor* obteve-se a fórmula de trabalho para a mistura SMA 12.B (SMA 12 surf PmB 45/80-55), que se apresenta seguidamente por material:

- fração 6/10 mm 74,4 %;
- fração 0/4 mm 8,4 %;
- filer comercial 10,2 %;
- fibras celulósicas 0,5 %;
- betume modificado 6,5 %.

— Mistura SMA 12.C —

Para os provetes fabricados de mistura SMA 12.C procedeu-se à sua posterior avaliação em laboratório, obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 8.8 e representados graficamente na Figura 8.4.

Quadro 8.8 – Resultados do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 12.C compactados com 50 pancadas

Propriedade		Identificação das misturas betuminosas			
		SMA 12.C 5,5 %	SMA 12.C 6,0 %	SMA 12.C 6,5 %	SMA 12.C 7,0 %
		Número de pancadas			
		50	50	50	50
Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)		2,365	2,383	2,395	2,393
Ensaio <i>Marshall</i>	Estabilidade, <i>S</i> (kN)	12,9	10,6	9,6	8,6
	Deformação, <i>F</i> (mm)	4,2	3,7	3,6	3,0
	Quociente <i>Marshall</i> , <i>Q</i> (kN/m)	3,1	2,9	2,7	2,9
Baridade máxima teórica, ρ_{mt} (Mg/m ³)		2,526	2,491	2,484	2,472
Porosidade, V_v (%)		6,4	4,3	3,6 (2,9;2,8) ²⁾	3,2
Percentagem de vazios na mistura de agregados, <i>VMA</i> (%)		19,0	18,2	18,7	19,5
Percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume, <i>VFB</i> (%)		66,5	76,1	80,8	83,6
Método Americano	VCA_{MIX} / VCA_{RC} ¹⁾	0,99	0,99	0,99	1,00
Método Australiano	<i>Free binder</i> (%)	7,8	9,1	10,3	11,5

Legenda: 1) utilizando o método de compactação pesada com o *roller compactor* para compactar as partículas ativas; 2) provetes prismáticos para avaliação da deformação permanente e fendilhamento por fadiga

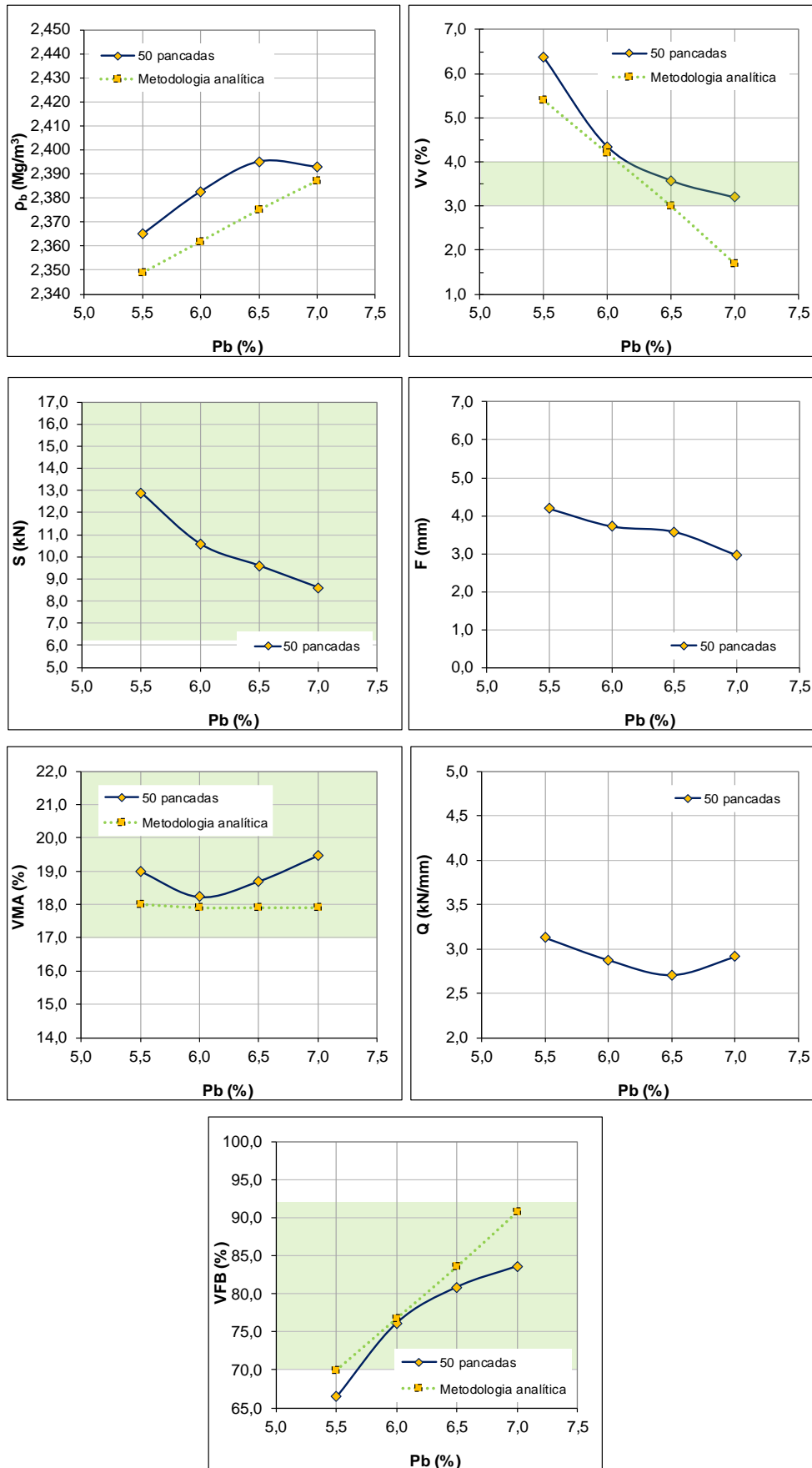


Figura 8.4 – Comparação entre os resultados da metodologia analítica e do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 12.C compactados com 50 pancadas (0% de absorção de betume)

Segundo o estudo de formulação efetuado, verifica-se que os provetes de mistura SMA 12.C, tendem a apresentar uma porosidade e um volume de vazios na mistura de agregados (*VMA*) semelhante ao que foi obtido de acordo com a metodologia analítica proposta. Os resultados são corroborados se considerados os provetes compactados com o *roller compactor* para avaliação da deformação permanente e do fendilhamento por fadiga (percentagem ótima de betume) onde a porosidade média variou entre 2,9 % e 2,8 %, respetivamente, comparativamente a um intervalo de 3,0 % e 3,3 % para a metodologia analítica proposta.













De acordo com a metodologia analítica e validação com o estudo de formulação *Marshall* e provetes prismáticos compactados com o *roller compactor* obteve-se a fórmula de trabalho para a mistura SMA 12.C (SMA 12 surf PmB 45/80-55), que se apresenta seguidamente por material:

- fração 6/10 mm 76,3 %;
- fração 0/4 mm 5,5 %;
- fíler comercial 11,2 %;
- fibras celulósicas 0,5 %;
- betume modificado 6,5 %.

— Aspeto geral dos provetes compactados em laboratório —

Com o objetivo de permitir um melhor enquadramento relativo aos diferentes métodos de compactação de partículas ativas utilizados na metodologia analítica proposta para determinação das características volumétricas, apresenta-se no Quadro 8.9 o aspeto da superfície dos provetes compactados em laboratório (compactador de impacto *Marshall*).

Quadro 8.9 – Aspeto geral da superfície dos provetes compactados em laboratório com o compactador Marshall (SMA 12.O, SMA 12.A, SMA 12.B SMA 12.C)

Mistura betuminosa	Percentagem de betume (%)		
	5,5 %	6,0 %	6,5 %
SMA 12.O			
SMA 12.A			
SMA 12.B			
SMA 12.C			

De acordo com o Quadro 8.9 é perceptível um aumento da profundidade média da textura com um aumento da baridade das partículas ativas (aumento da energia de compactação das partículas ativas). Segundo a visualização, verifica-se que os provetes de SMA formulada segundo o método de compactação com o varão apresentaram uma profundidade média da textura muito reduzida, semelhante à obtida para a mistura SMA 12.O. A profundidade média da textura tende a aumentar de forma muito perceptível para os provetes das SMA formuladas segundo o método de compactação pesada com o Proctor e com o *roller compactor*.

8.2.2 MISTURAS A OTIMIZAR DO TIPO SMA 14

De acordo com os métodos de compactação de partículas ativas utilizados na presente fase do estudo experimental (Fase 4), são apresentadas as baridades das partículas ativas que haviam sido anteriormente determinadas no ponto 7.2 e que se resumem no Quadro 8.10.

Quadro 8.10 – Baridades das partículas ativas utilizadas na otimização das misturas do tipo SMA 14

Identificação das amostras	Método de compactação	Peneiro de referência (mm)	Resultados obtidos	
			Baridade (Mg/m ³)	Volume de vazios nos agregados/partículas ativas (%)
SMA 14-1.D	Compactação pesada com Proctor (55 pancadas, 5 camadas)	4 ¹⁾	1,82	38,9
SMA 14-1.E				

Legenda: 1) avaliação realizada para o conjunto da fração 4/12 mm e 10/16 mm

Para as baridades das partículas ativas apresentadas no Quadro 8.10 foram definidas as curvas granulométricas para se assegurar as baridades pretendidas, de acordo com a metodologia analítica proposta no ponto 7.3 para formulação das misturas SMA. Para a definição das curvas granulométricas não foi tido em consideração a utilização de um fuso granulométrico específico, mas apenas os limites gerais que se apresentam no Quadro 8.11 para a composição granulométrica da mistura de agregados com D = 14 mm (especificados na norma de produto EN 13108-5).

Quadro 8.11 – Requisitos para os limites gerais do fuso granulométrico (EN 13108-5)

Dimensão nominal da abertura dos peneiros (série "base+2") (mm)	Percentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)
	D = 14 mm
20	100
16	-
14	90 - 100
2	15 - 35
0,063	5,0 - 12,0

Tendo em consideração a metodologia analítica proposta, foram definidas as seguintes composições granulométricas para as misturas do tipo SMA 14, de acordo com o método de compactação pesada com o Proctor, as quais se indicam no Quadro 8.12 e cujas curvas granulométricas se representam na Figura 8.5. No Quadro 8.12 e na Figura 8.5 é ainda apresentada informação relativa à mistura SMA 14-1.O, aplicada na TEXSA, para efeitos comparativos.

Quadro 8.12 – Fórmulas de trabalho definidas para as misturas SMA 14-1

Fração	Identificação das misturas SMA e natureza dos agregados		
	SMA 14-1		
	O	D	E
	Basaltos		
4/12 mm + 10/16 mm	-	80,0	80,0
10/16 mm	33,0	-	-
4/12 mm	41,0	-	-
0/4 mm	16,0	6,0	9,0
Fíler comercial	10,0	14,0	11,0

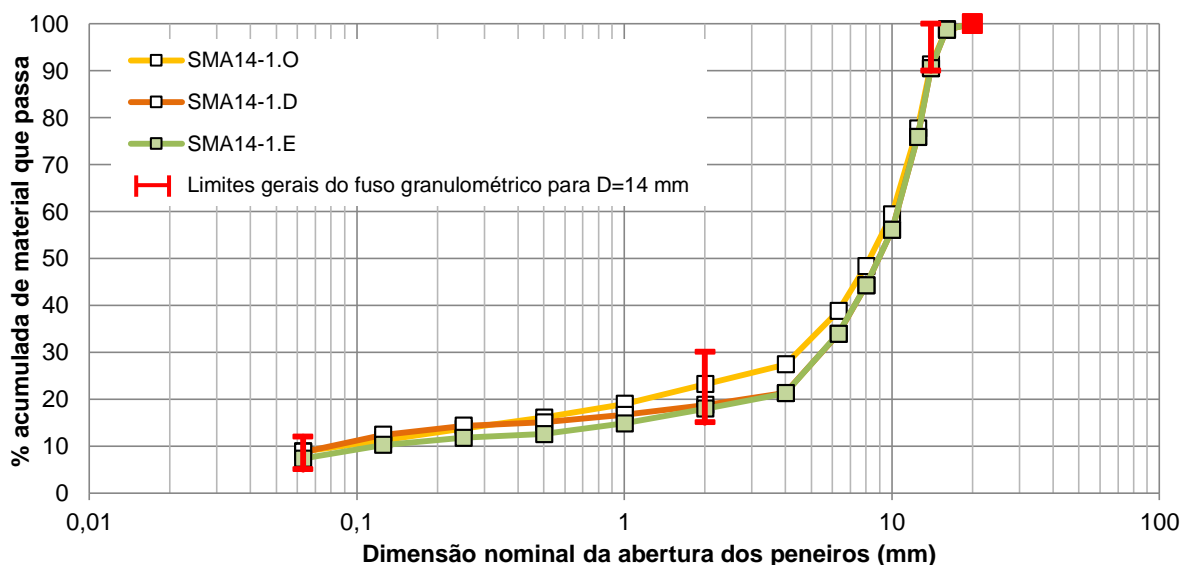


Figura 8.5 – Curvas granulométricas definidas para cada mistura do tipo SMA 14 (SMA 14-1)

Notar que a existência de duas misturas SMA 14-1 avaliadas segundo a compactação pesada com o Proctor, deriva do facto de numa primeira análise (SMA 14-1.D) se ter observado que os provetes compactados em laboratório não obtiveram a porosidade determinada através da metodologia analítica. Nesse sentido procedeu-se a uma alteração da relação fíler/partículas passivas para aumentar a porosidade dos provetes compactados em laboratório, como posteriormente se apresenta.

Para cada composição granulométrica definida foram escolhidas três percentagens diferentes de betume para um intervalo entre 6,0 % e 7,0 %, variando-se as percentagens entre si de 0,5 %.

O intervalo definido teve em consideração a percentagem mínima de betume proposta no Quadro 3.15 para uma mistura do tipo SMA 14 ($\geq 5,5$ %).

Adicionalmente para mitigar o escorrimento de material betuminoso, para cada mistura SMA (SMA 14-1.D e SMA 14-1.E) foi estimada uma percentagem preliminar entre 0,5 % ($D \leq 0,3$) e 0,6 % ($D \leq 0,2$) de fibras celulósicas de acordo com a equação (5.2) proposta no ponto 5.5 para percentagem de betume de 6,5 %. O intervalo de percentagens de betume definido na formulação variou até 7,0 %, observando-se que para essa percentagem de betume, a percentagem de fibras deveria ser de 0,7 %, à semelhança do que é requerido pela equação (5.2). Isso é posteriormente constatado no Quadro 8.16, onde é possível observar o aspeto dos provetes compactados em laboratório, sendo observado a desagregação de um provete com 7,0 % de betume. Para o fabrico dos provetes com uma percentagem de betume igual a 6,0 % e 6,5 % optou-se por utilizar uma percentagem de fibras celulósicas de 0,6 %, e 0,7 % para a percentagem de betume de 7,0 %. As percentagens de fibras celulósicas tiveram em consideração os resultados que haviam sido obtidos anteriormente no Quadro 5.7 no ponto 5.5.

No Quadro 8.13 são apresentados os resultados decorrentes da metodologia analítica proposta para a avaliação das características volumétricas dos provetes de mistura SMA. Os resultados apresentados, têm por base o respetivo valor da baridade determinado para as partículas ativas segundo o método proposto. Adicionalmente, são ainda apresentados os resultados considerando uma absorção de betume nula ou igual a 100 %.

Quadro 8.13 – Características volumétricas estimadas para os provetes compactados em laboratório segundo a metodologia analítica proposta (SMA 14-1) [0 %;100 % - absorção de betume]

Método de Compactação	Propriedade	Identificação das misturas betuminosas		
		SMA 14-1.D 6,0 %	SMA 14-1.D 6,5 %	SMA 14-1.D 7,0 %
Compactação pesada com Proctor (55 pancadas, 5 camadas)	p_a (%) ¹⁾	73,6	73,2	72,8
	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,476;2,463	2,489;2,477	2,505;2,493
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,615	2,594	2,571
	Vv (%)	5,3;5,8	4,0;4,5	2,6;3,0
	VMA (%)	73,0;71,2	79,6;77,6	87,0;84,8
	VFB (%)	19,7;20,1	19,7;20,1	19,6;20,0
Método de Compactação	Propriedade	SMA 14-1.E 6,0 %	SMA 14-1.E 6,5 %	SMA 14-1.E 7,0 %
Compactação pesada com Proctor (55 pancadas, 5 camadas)	p_a (%) ¹⁾	73,5	73,1	72,7
	ρ_{ba} (Mg/m ³)	2,474;2,461	2,487;2,475	2,503;2,491
	ρ_{mt} (Mg/m ³)	2,615	2,593	2,571
	Vv (%)	5,4;5,9	4,1;4,6	2,6;3,1
	VMA (%)	19,8;20,2	19,8;20,2	19,6;20,0
	VFB (%)	72,8;71,0	79,3;77,4	86,7;84,6

Legenda: 1) relativamente à massa total da mistura betuminosa

Posteriormente, para validação dos resultados obtidos foi efetuada a formulação das misturas SMA 14-1 (SMA 14-1.D e SMA 14-1.E) anteriormente definidas, através do método *Marshall*, tendo a compactação dos provetes, sido realizada através do compactador de impacto, com 50 pancadas em cada topo dos provetes.

Para o estudo das misturas SMA 14-1, teve-se em consideração as composições granulométricas e as percentagens de betume e de aditivo previamente definidas. A adição das fibras celulósicas foi efetuada segundo o método a frio definido previamente no ponto 5.3.

— Mistura SMA 14-1.D —

Para os provetes fabricados de mistura SMA 14-1.D procedeu-se à sua posterior avaliação em laboratório, obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 8.14 e representados graficamente na Figura 8.6.

Quadro 8.14 – Resultados do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 14-1.D compactados com 50 pancadas

Propriedade		Identificação das misturas betuminosas		
		SMA 14-1.D 6,0 %	SMA 14-1.D 6,5 %	SMA 14-1.D 7,0 %
		Número de pancadas		
		50	50	50
Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)		2,563	2,546	2,530
Ensaio <i>Marshall</i>	Estabilidade, <i>S</i> (kN)	12,5	10,6	10,8
	Deformação, <i>F</i> (mm)	4,3	5,0	5,1
	Quociente <i>Marshall</i> , <i>Q</i> (kN/m)	3,0	2,3	2,2
Baridade máxima teórica, ρ_{mt} (Mg/m ³)		2,628	2,596	2,587
Porosidade, V_v (%)		2,5	1,9	2,2 (2,5 ²)
Percentagem de vazios na mistura de agregados, <i>VMA</i> (%)		17,4	18,0	19,4
Percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume, <i>VFB</i> (%)		85,8	89,3	88,7
Método Americano	VCA_{MIX} / VCA_{PC} ¹⁾	0,95	0,96	0,98
Método Australiano	<i>Free binder</i> (%)	8,9	10,1	11,3

Legenda: 1) utilizando o método de compactação pesada com o Proctor para compactar as partículas ativas;
2) provetes prismáticos para avaliação da deformação permanente

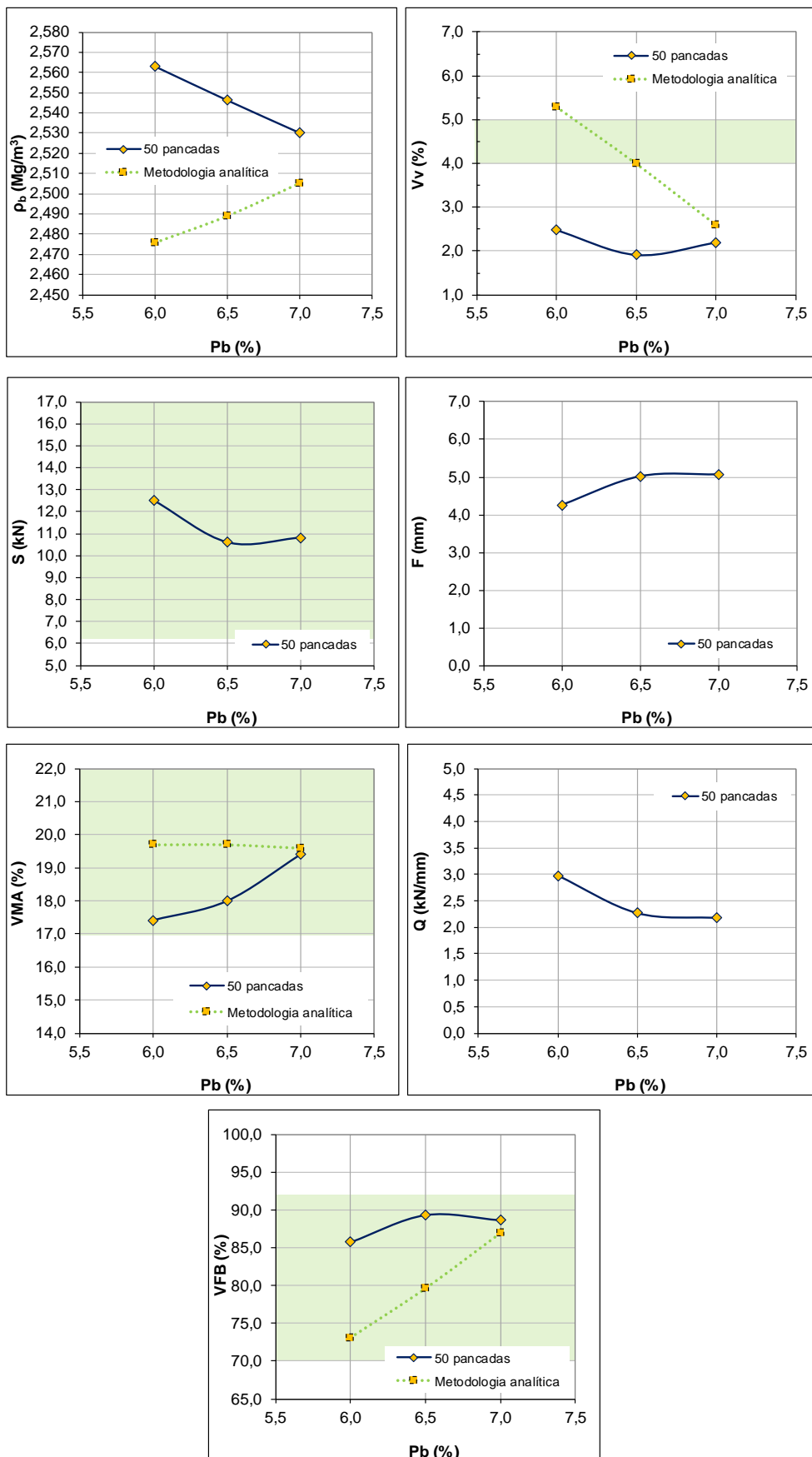


Figura 8.6 – Comparação entre os resultados da metodologia analítica e do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 14-1.D compactados com 50 pancadas (0% de absorção de betume)

Segundo o estudo de formulação efetuado, verifica-se que os provetes de mistura SMA 14-1.D tendem a apresentar uma porosidade e um volume de vazios na mistura de agregados (VMA) inferiores aos que seriam espectáveis de acordo com a metodologia analítica proposta. Semelhante conclusão é obtida se considerados os provetes compactados com o *roller compactor* para avaliação da deformação permanente (percentagem ótima de betume), onde a porosidade média foi de 2,5 %, comparativamente a um intervalo de 4,0 % e 4,5 % para a metodologia analítica proposta. Nesse sentido e tendo presente os resultados obtidos nas várias fases do estudo experimental, procedeu-se à modificação da relação entre os finos e fíler (Quadro 8.12), tendo-se para o efeito diminuído a percentagem de fíler e aumentado a percentagem de partículas passivas, mantendo-se inalterada a percentagem de partículas ativas.

Outra constatação obtida dos casos de “insucesso” no que concerne à obtenção de resultados similares aos obtidos através da metodologia analítica, corresponde ao facto da baridade dos provetes compactados em laboratório apresentar um andamento descendente corresponde a uma fase húmida, em que existe um adensamento da SMA). No caso da metodologia analítica o andamento dos valores da baridade da mistura betuminosa são sempre crescentes (correspondentes a uma fase seca, em que existe um preenchimento da SMA).

Apesar da mistura SMA 14-1.D na avaliação do desempenho ser substituída pela SMA 14-1.E, procedeu-se ainda assim à avaliação da deformação permanente no sentido de se avaliar o efeito de *stone-on-stone*. Esta avaliação terá como intuito avaliar a influência de uma maior massa de mastique betuminoso comparativamente à mistura SMA 14-1.E, utilizando-se uma percentagem de betume igual a 7,0 % (correspondente à percentagem ótima de betume acrescida de 0,5 %).

De acordo com a metodologia analítica e validação com o estudo de formulação *Marshall* e provetes prismáticos compactados com o *roller compactor* será utilizada para a avaliação da deformação permanente, a fórmula de trabalho para a mistura SMA 14-1.D (SMA 14 surf PmB 45/80-65), que se apresenta seguidamente por material:

- Conjunto da fração 4/12 mm e 10/16 mm 73,9 %;
- fração 0/4 mm 5,5 %;
- fíler comercial 12,9 %;
- fibras celulósicas 0,7 %;
- betume modificado 7,0 %.

— Mistura SMA 14-1.E —

Para os provetes fabricados de mistura SMA 14-1.E procedeu-se à sua posterior avaliação em laboratório, obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 8.15 e representados graficamente na Figura 8.7.

Quadro 8.15 – Resultados do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 14-1.E compactados com 50 pancadas

Propriedade		Identificação das misturas betuminosas		
		SMA 14-1.E 6,0 %	SMA 14-1.E 6,5 %	SMA 14-1.E 7,0 %
		Número de pancadas		
		50	50	50
Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)		2,533	2,538	2,519
Ensaio <i>Marshall</i>	Estabilidade, <i>S</i> (kN)	10,9	9,5	8,4
	Deformação, <i>F</i> (mm)	3,4	3,1	3,2
	Quociente <i>Marshall</i> , <i>Q</i> (kN/m)	3,3	3,0	2,6
Baridade máxima teórica, ρ_{mt} (Mg/m ³)		2,635	2,618	2,611
Porosidade, V_V (%)		3,9	3,1 (3,2;2,6) ²⁾	3,5
Percentagem de vazios na mistura de agregados, <i>VMA</i> (%)		18,5	19,1	20,7
Percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume, <i>VFB</i> (%)		79,1	84,0	82,9
Método Americano	$VCA_{MIX} / VCA_{PC}^{1)}$	0,96	0,97	0,99
Método Australiano	<i>Free binder</i> (%)	10,1	11,4	12,5

Legenda: 1) utilizando o método de compactação pesada com o Proctor para compactar as partículas ativas; 2) provetes prismáticos para avaliação da deformação permanente e fendilhamento por fadiga

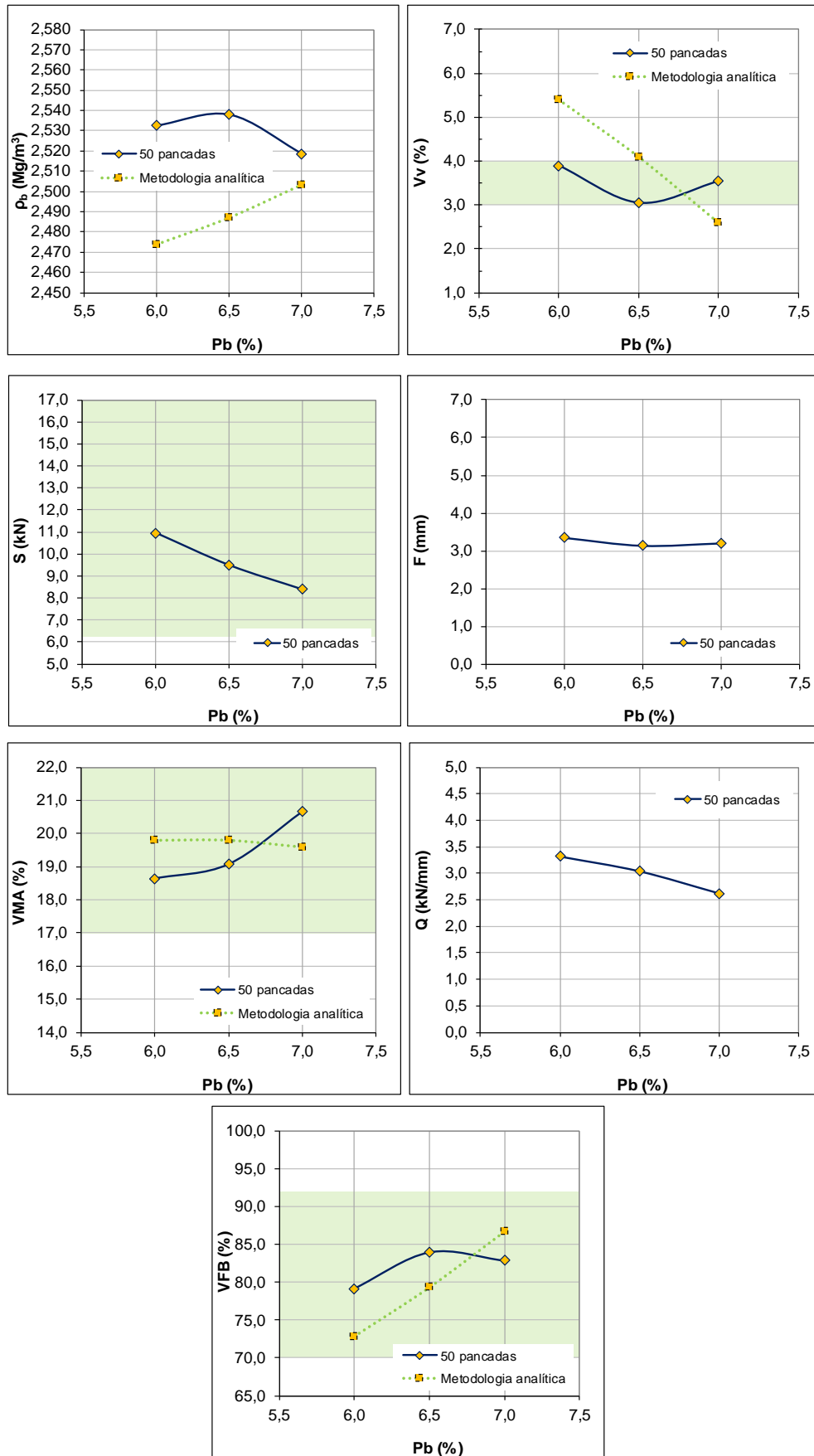


Figura 8.7 – Comparação entre os resultados da metodologia analítica e do estudo *Marshall* para os provetes da SMA 14-1.E compactados com 50 pancadas (0% de absorção de betume)

Segundo o estudo de formulação efetuado, verifica-se que os provetes de mistura SMA 14-1.E, tendem a apresentar uma porosidade e um volume de vazios na mistura de agregados (VMA) relativamente inferiores ao que seriam espectáveis de acordo com a metodologia analítica proposta. Semelhante conclusão é obtida se considerados os provetes compactados com o *roller compactor* para avaliação da deformação permanente e fendilhamento por fadiga (percentagem ótima de betume), onde a porosidade média foi de 2,6 % e 3,2 %, comparativamente a um intervalo de 4,1 % e 4,6 % para a metodologia analítica proposta. Tais resultados evidenciaram que seria possível proceder a uma nova alteração no rácio entre as partículas passivas e o filer, porém ainda assim considerou-se que tanto para a mistura SMA 14-1.E como para a SMA 14-1.D foi assegurada uma estrutura com efeito otimizado de *stone-on-stone*.








De acordo com a metodologia analítica e validação com o estudo de formulação *Marshall* e provetes prismáticos compactados com o *roller compactor* obteve-se a fórmula de trabalho para a mistura SMA 14-1.E (SMA 14 surf PmB 45/80-65), que se apresenta seguidamente por material:

- conjunto da fração 4/12 mm e 10/16 mm 74,3 %;
- fração 0/4 mm 8,4 %;
- filer comercial 10,2 %;
- fibras celulósicas 0,6 %;
- betume modificado 6,5 %.

— Aspeto geral dos provetes compactados em laboratório —

Com o objetivo de permitir um melhor enquadramento relativo aos diferentes métodos de compactação de partículas ativas utilizados na metodologia analítica proposta para determinação das características volumétricas, apresenta-se no Quadro 8.16 o aspeto da superfície dos provetes compactados em laboratório (compactador de impacto *Marshall*).

Quadro 8.16 – Aspeto geral da superfície dos provetes compactados em laboratório com o compactador *Marshall* (SMA 14-1.O, SMA 14-1.D, SMA 14-1.E)

Mistura betuminosa	Percentagem de betume (%)		
	6,0 %	6,5 %	7,0 %
SMA 14-1.O		-	-
SMA 14-1.D			
SMA 14-1.E			

De acordo com o Quadro 8.16 e à semelhança do que foi observado para as misturas SMA 12 (SMA 12.A, SMA 12.B e SMA 12.C) é perceptível um aumento da profundidade média da textura com um aumento da baridade das partículas ativas (aumento da energia de compactação das partículas ativas). No Quadro 8.16 verifica-se que os provetes de SMA 14-1.O cuja curva granulométrica é semelhante à que se obteria para o método de compactação com o varão, apresenta uma profundidade média da textura muito reduzida, aumentando de forma mais perceptível para os provetes de SMA formulada segundo o método de compactação pesada com o Proctor. Porém, observou-se que a modificação da relação entre as partículas passivas e o fíler aplicada para a mistura SMA 14-1.E permitiu um aumento da profundidade média da textura relativamente à mistura SMA 14-1.D.

A avaliação da profundidade média da textura será realizada posteriormente no ponto 8.4, para provetes prismáticos fabricados em laboratório utilizados para avaliação da resistência à deformação permanente ou do fendilhamento à fadiga. A avaliação a realizar, terá como intuito aferir a profundidade média da textura obtida nas misturas SMA através de um método de compactação similar ao que é utilizado em obra (*roller compactor*).

Ainda segundo o Quadro 8.16, em consequência da utilização de uma percentagem de fibras celulósicas reduzida, observou-se para a SMA 14-1.D, com uma percentagem de betume de 7,0 %, a desagregação de um provete compactado. Nesse sentido para a SMA 14-1.E, passou-se a adotar uma percentagem de 0,7 % de fibras celulósicas para a percentagem de betume de 7,0 %.

8.2.3 APRECIÇÃO SUCINTA DOS RESULTADOS OBTIDOS

Decorrente dos ensaios realizados e com o objetivo de permitir uma análise integrada, apresenta-se seguidamente de forma sucinta os resultados obtidos no estudo de formulação das misturas SMA “otimizadas”, no que concerne às suas características volumétricas e respetivos métodos utilizados para a compactação das partículas ativas.

Na Figura 8.8, é apresentada uma análise comparativa da porosidade dos provetes compactados em laboratório (compactador de impacto *Marshall*) com a porosidade obtida através da metodologia analítica proposta para formular volumetricamente misturas SMA.

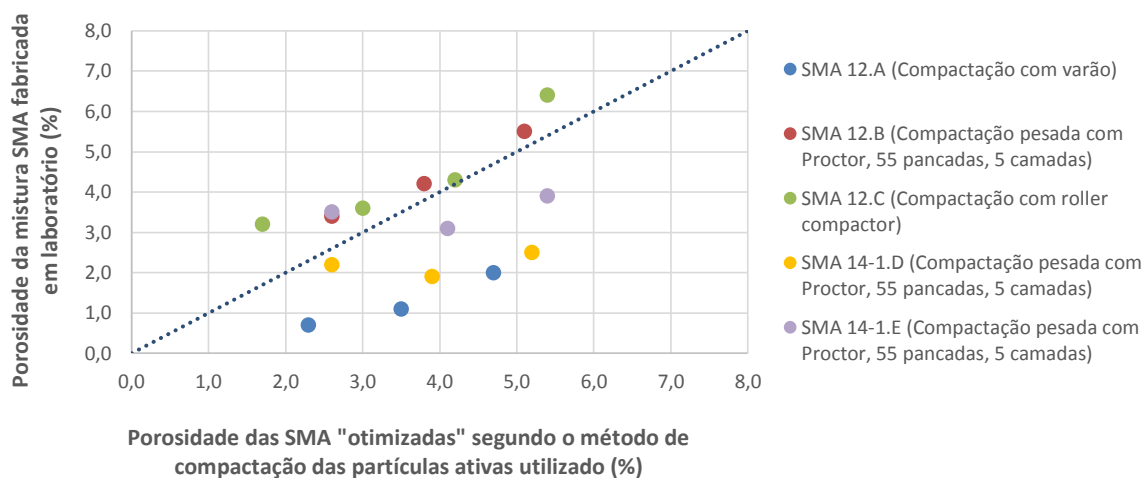


Figura 8.8 – Análise comparativa entre a porosidade obtida no estudo de formulação das misturas SMA “otimizadas” e nos métodos de compactação de partículas ativas

Os resultados apresentados na Figura 8.8 evidenciam que a compactação pesada com o Proctor tende, quando incorporada na metodologia analítica proposta, a permitir estimar de forma aproximada as características volumétricas dos provetes compactados em laboratório, corroborando as conclusões obtidas na Fase 3 do estudo experimental. A exceção corresponde à mistura SMA 14-1.D, (Proctor) a qual aparenta ter um rácio inadequado entre as partículas passivas e o filer utilizados, promovendo uma diminuição da porosidade da mistura betuminosa face aos resultados estimados. Os resultados obtidos para as restantes misturas SMA “otimizadas com o Proctor tendem a ser reforçados quando se compara as porosidades obtidas na metodologia analítica com as porosidades respetivas obtidas nos provetes prismáticos utilizados para a avaliação da deformação permanente e do fendilhamento por fadiga.

Ainda de acordo com a Figura 8.8 é possível observar que a SMA 12.A avaliada segundo o método de compactação com o varão tende a apresentar em laboratório valores de porosidade inferiores aos obtidos segundo a metodologia analítica proposta.

Semelhantes resultados foram obtidos para a mistura SMA 14-1.D, que apesar de ser formulada pelo método de compactação com o Proctor tende a apresentar uma porosidade inferior à obtida segundo a metodologia analítica proposta. Os resultados obtidos para a mistura SMA 12.A e SMA 14-1.D resultam de sua inadequada definição volumétrica da composição do mástico betuminoso, no que concerne nomeadamente à relação entre as partículas passivas (entre 0,063 mm e 4 mm) e de fíler. Os resultados obtidos evidenciam que a percentagem de fíler terá um papel mais significativo no controlo da porosidade ao contrário do que foi constatado no ponto 3.3.1. Contudo e tendo, em consideração a otimização da percentagem de partículas ativas utilizada, assim como de mástico betuminoso importa assegurar que as misturas SMA formuladas segundo o método de formulação proposto apresentam uma adequada trabalhabilidade das misturas SMA. Assim avalia-se posteriormente o conceito de *free binder* especificado na Austrália.

Tal constatação evidencia que a formulação de uma mistura SMA não poderá assentar, como efetuado atualmente a nível internacional, exclusivamente na garantia de obtenção de um efeito de *stone-on-stone*, sendo fundamental ter em consideração qual a influência/volume de cada um dos constituintes do mástico betuminoso (através do conceito proposto no presente trabalho de *mastic-within-stone*). O estudo da composição volumétrica ótima da mistura SMA, para os seus diferentes materiais constituintes, será posteriormente feita aquando da avaliação do desempenho das misturas SMA “otimizadas” (ponto 8.4). Adicionalmente na Figura 8.9 e na Figura 8.10 (0% e 100 % de absorção de betume, respetivamente) são apresentadas as diferenças observadas (laboratório relativamente ao método analítico proposto) para os diversos métodos de compactação avaliados, considerando as misturas SMA “otimizadas” na quarta fase do estudo experimental.

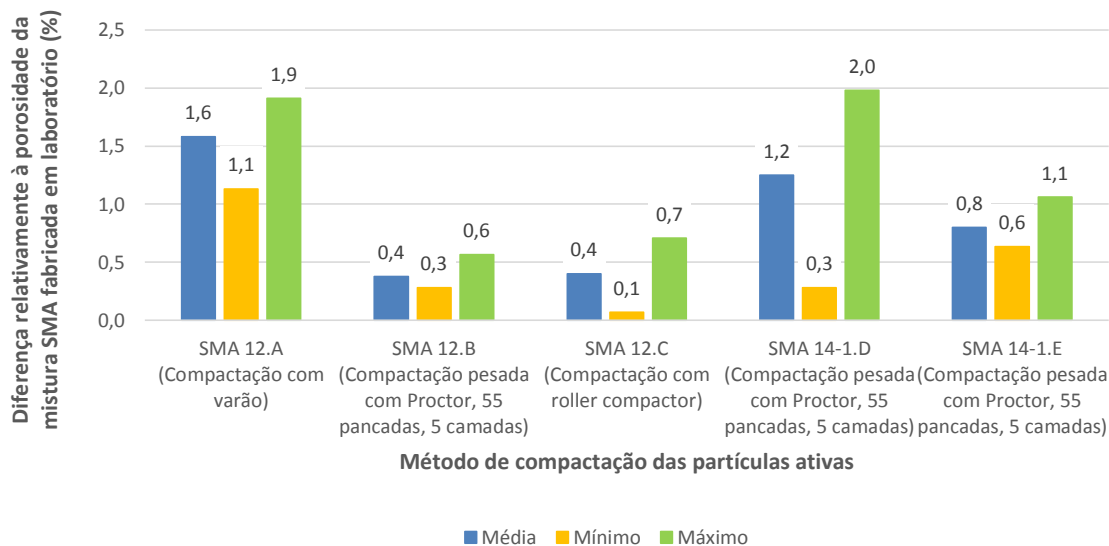


Figura 8.9 – Diferença entre o volume de vazios obtido no estudo de formulação das SMA “otimizadas” e nos métodos de compactação de partículas ativas (0% de absorção de betume)

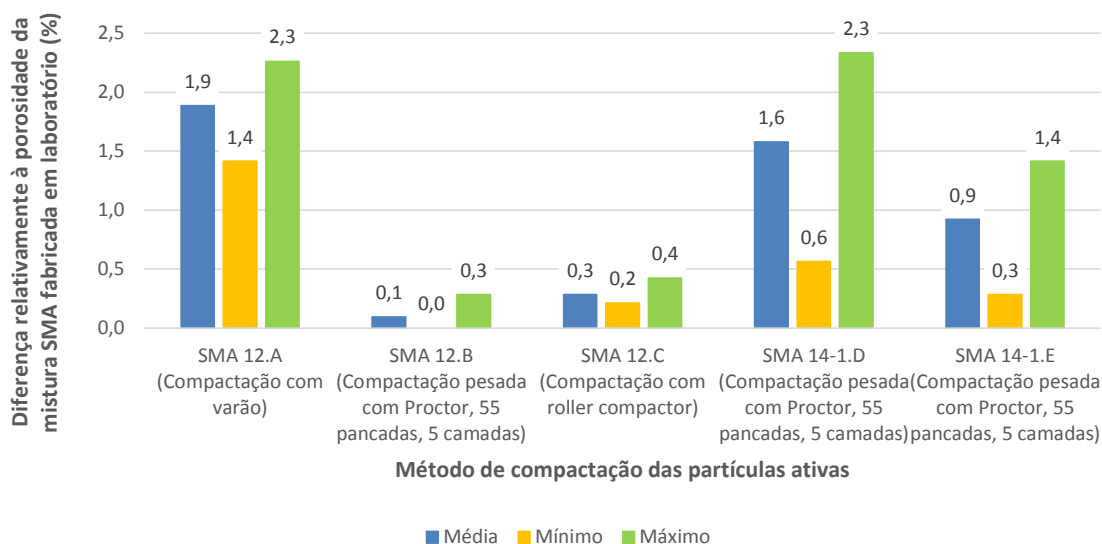


Figura 8.10 – Diferença entre o volume de vazios obtido no estudo de formulação das SMA “otimizadas” e nos métodos de compactação de partículas ativas (100% de absorção de betume)

Segundo a Figura 8.9 e Figura 8.10, o método de compactação de partículas ativas com o Proctor (compactação pesada com 55 pancadas em cada uma das cinco camadas a compactar), parece, ser o que melhores resultados permite obter com uma diferença máxima de 1,4 %, se não considerada a mistura SMA 14-1.D (diferença de 2,3 %). O valor máximo da diferença é igual ao que já foi obtido no ponto 7.3.2, aquando da formulação das misturas SMA avaliadas na terceira fase do estudo experimental (Fase 3). Notar que o valor máximo apenas tende a ocorrer para uma das percentagens de betume avaliadas, sendo o valor da diferença observada manifestamente inferior para as restantes percentagens de betume. A utilização da compactação pesada com o Proctor tende como observado no ponto 7.3.2 a promover a utilização de uma elevada percentagem de partículas ativas comparativamente aos restantes métodos de compactação de partículas ativas avaliados, o que permite otimizar o efeito de *stone-on-stone*.

Porém, e como constatado no ponto 3.2.4 da revisão bibliográfica a utilização de uma elevada percentagem de partículas ativas inadequada pode contribuir para um aumento da permeabilidade, assim como uma diminuição da trabalhabilidade das misturas SMA. Assim, complementarmente procede-se ainda a uma análise:

- do rácio entre o *VCA* na mistura SMA compactada e o *VCA* na mistura de partículas ativas proposta no método de formulação de misturas SMA desenvolvido nos EUA com o intuito de continuamente validar a obtenção de um efeito de *stone-on-stone* ($VCA_{MIX}/VCA_{DRC} < 1$);
- do conceito de *free binder* especificado na Austrália (ver ponto 3.4) e que visa a formulação de misturas SMA com uma melhor trabalhabilidade, ao invés de uma preocupação apenas com o desempenho da mistura SMA ($8\% \leq \text{free binder} \leq 11\%$).

No Quadro 8.17 é apresentada uma análise global dos resultados obtidos para as misturas avaliadas na segunda e quarta fase do estudo experimental. Na análise do rácio entre o *VCA* na mistura compactada e o *VCA* na mistura de partículas ativas, o *VCA* na mistura de partículas ativas corresponde ao valor obtido com o respetivo método de compactação de partículas ativas, em vez do método de compactação com o varão.

Quadro 8.17 – Resultados da avaliação do efeito de *stone-on-stone* e do conceito de *free binder* para as misturas SMA estudadas [0 %;100 % - absorção de betume]

Propriedade	Identificação das misturas betuminosas				
	SMA 11 4,5 %	SMA 11 5,0 %	SMA 11 5,5 %	SMA11 6,0 %	SMA11 6,5 %
$VCA_{MIX} / VCA_{PC}^{1)}$	0,91	0,91	0,91	0,92	0,93
<i>Free binder</i> (%)	8,3;2,0	9,6;3,3	10,9;4,5	12,1;5,8	13,3;7,0
Propriedade	SMA 12.O 5,0 %	SMA 12.O 5,5 %	SMA 12.O 6,0 %	SMA12.O 6,5 %	SMA12.O 7,0 %
$VCA_{MIX} / VCA^{1)}$	1,11	1,11	1,12	1,13	1,14
<i>Free binder</i> (%)	9,7;5,1	11,0;6,4	12,2;7,6	13,3;8,7	14,4;9,8
Propriedade	SMA 14-1 5,5 %	SMA 14-1 6,0 %	SMA 14-1 6,5 %	-	-
$VCA_{MIX} / VCA_{DRC}^{1)}$	1,00	1,00	1,01	-	-
<i>Free binder</i> (%)	8,0;3,6	9,3;4,9	10,5;6,1	-	-
Propriedade	SMA 14-2 5,5 %	SMA 14-2 6,0 %	SMA 14-2 6,5 %	SMA14-2 7,0 %	SMA14-2 7,5 %
$VCA_{MIX} / VCA_{PC}^{1)}$	0,82	0,83	0,84	0,85	0,85
<i>Free binder</i> (%)	8,6;5,5	9,8;6,7	10,9;7,8	12,0;8,9	13,2;10,1
Propriedade	SMA 12.A 5,5 %	SMA 12.A 6,0 %	SMA 12.A 6,5 %	-	-
$VCA_{MIX} / VCA_{DRC}^{1)}$	0,95	0,97	0,98	-	-
<i>Free binder</i> (%)	8,9;5,2	10,1;6,4	11,2;7,6	-	-
Propriedade	SMA 12.B 5,5 %	SMA 12.B 6,0 %	SMA 12.B 6,5 %	-	-
$VCA_{MIX} / VCA_{PC}^{1)}$	0,98	0,99	0,99	-	-
<i>Free binder</i> (%)	8,3;5,3	9,5;6,5	10,7;7,7	-	-
Propriedade	SMA 12.C 5,5 %	SMA 12.C 6,0 %	SMA 12.C 6,5 %	SMA 12.C 7,0 %	-
$VCA_{MIX} / VCA_{RC}^{1)}$	0,99	0,99	0,99	1,00	-
<i>Free binder</i> (%)	7,8;5,2	9,1;6,4	10,3;7,6	11,5;8,8	-
Propriedade	SMA 14-1.D 6,0 %	SMA 14-1.D 6,5 %	SMA 14-1.D 7,0 %	-	-
$VCA_{MIX} / VCA_{PC}^{1)}$	0,95	0,96	0,98	-	-
<i>Free binder</i> (%)	8,9;6,5	10,1;7,7	11,3;8,9	-	-
Propriedade	SMA 14-1.E 6,0 %	SMA 14-1.E 6,5 %	SMA 14-1.E 7,0 %	-	-
$VCA_{MIX} / VCA_{PC}^{1)}$	0,96	0,97	0,99	-	-
<i>Free binder</i> (%)	10,1;7,4	11,4;8,7	12,5;9,9	-	-

Legenda: 1) utilizando o respetivo método de compactação de partículas ativas

No que concerne à avaliação da obtenção do efeito de *stone-on-stone*, de acordo com a análise apresentada no Quadro 8.17 verifica-se que as misturas “otimizadas” (SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.D e SMA 14-1.E) segundo o método do Varão, Proctor ou *roller compactor* apresentaram uma relação entre o VCA_{MIX} e o VCA_{DRC} , próxima da unidade, como definido no método de formulação proposto no presente trabalho (ver ponto 7.3) e inferior a um como estipulado no método desenvolvido nos EUA. Os resultados evidenciam que o método de formulação proposto permite assegurar a obtenção do efeito de *stone-on-stone* sem que seja necessário o recurso ao fabrico de provetes em

laboratório independentemente do método de compactação de partículas ativas utilizado, considerando-se que o mesmo é otimizado através da compactação pesada com o Proctor. Tal análise permite eliminar/mitigar o comum processo iterativo de fabrico de misturas SMA durante a formulação laboratorial para se alcançar o efeito de *stone-on-stone* e determinar a percentagem ótima de betume.

Quando analisadas as SMA avaliadas na segunda fase do estudo experimental (SMA 11, SMA 12.O, SMA 14-1.O, SMA 14-2) verifica-se que estas tendem a apresentar um rácio de valor inferior à unidade, à exceção da SMA 12.O que apresentou um rácio superior à unidade, o que é representativo de um excesso de mastique betuminoso comparativamente ao volume de vazios disponível entre as partículas ativas. Esta conclusão apenas reforça o que foi anteriormente constatado no ponto 7.3.2, que a utilização de uma curva granulométrica que respeite um determinado fuso granulométrico não é passível de assegurar por si só um efeito de *stone-on-stone* ou um desempenho adequado.

Relativamente à avaliação do conceito de *free binder* proposto na Austrália verifica-se as misturas SMA avaliadas (na Fase 2 e 4 do estudo experimental) tendem a apresentar um valor de *free binder* compreendido entre 7,8 % e 14,4 %, sendo o intervalo recomendado entre 8 % e 11 %. Porém se consideradas apenas as percentagens ótimas de betume de cada SMA avaliada, verifica-se que o intervalo tende a variar entre 8,9 % e 11,5 %, sendo esse valor variável entre 9,8 % e 11,5 % no caso das misturas SMA passíveis de avaliar com a compactação pesada com o Proctor (SMA 11, SMA 14-2, SMA 12.B, SMA 14-1.D e SMA 14-1.E).

Os resultados obtidos mostram que a metodologia analítica proposta:

- considerando o método de compactação pesada com o Proctor permite a formulação de misturas SMA, em que se assegura e otimiza o efeito de *stone-on-stone*, assim como uma adequada percentagem de “betume livre” o qual contribui para uma adequada trabalhabilidade das misturas SMA (melhorando o fabrico e a aplicação);
- dos vários métodos de compactação, a compactação com o varão corresponde das misturas SMA “otimizadas” à que menor trabalhabilidade apresentou segundo o conceito de *free binder*, ainda assim de acordo com o intervalo especificado;
- apresenta como uma das vantagens, permitir a utilização de diferentes conceitos para apoiar na formulação das misturas SMA.

8.2.4 CONCLUSÕES

De acordo com o estudo realizado no âmbito da otimização de misturas SMA conclui-se que:

- a metodologia analítica proposta para a formulação de misturas SMA permite assegurar a obtenção do efeito de *stone-on-stone* independentemente do método de compactação de partículas ativas utilizado. Tal permite eliminar/mitigar o comum processo iterativo de fabrico de misturas SMA durante a formulação laboratorial (i.e. *Marshall* ou giratório) para se alcançar o efeito de *stone-on-stone* e a percentagem ótima de betume;
- a utilização da compactação pesada com o Proctor, tende a promover a utilização de uma percentagem de partículas ativas comparativamente aos restantes métodos de compactação de partículas ativas avaliados o que permite otimizar o efeito de *stone-on-stone*;
- a utilização da metodologia analítica associada ao método de compactação com o Proctor com o intuito de otimizar o efeito de *stone-on-stone* não garante por si só a obtenção da

porosidade pretendida nas misturas SMA, sendo fundamental uma adequada definição da composição do mastique betuminoso no que concerne, nomeadamente, ao rácio entre as partículas passivas e o filler. Tal constatação evidencia que a formulação de uma mistura SMA não poderá assentar exclusivamente na obtenção e otimização do efeito de *stone-on-stone*, sendo fundamental ter em consideração qual a influência/volume a adotar para cada um dos constituintes do mastique betuminoso (através do conceito proposto no presente trabalho de *mastic-within-stone*), o qual será posteriormente estudada nos pontos 8.3 e 8.4 aquando da avaliação do desempenho das misturas SMA “otimizadas”.

8.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO PARA DESENVOLVIMENTO DO CONCEITO DE MASTIC-WITHIN-STONE (MIX-SKELETON)

No presente ponto serão avaliadas as misturas SMA contempladas anteriormente no Quadro 8.1 e que foram previamente formuladas no ponto 8.2, as quais correspondem às misturas SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.D e SMA 14-1.E.

A avaliação visa aferir o desempenho “mecânico” das misturas SMA, tendo-se avaliado o escorrimento de material betuminoso, a sensibilidade à água, a resistência à deformação permanente, o módulo de deformabilidade, a resistência ao fendilhamento por fadiga e ao envelhecimento.

Pretende-se com a avaliação realizada o desenvolvimento do conceito proposto de *mastic-within-stone* considerando no presente caso o desempenho mecânico das misturas SMA, o qual visa a definição da composição volumétrica ótima baseada na otimização do desempenho mecânico da SMA através da obtenção do efeito de *mix-skeleton* complementarmente ao efeito de *stone-on-stone*.

8.3.1 AVALIAÇÃO DO ESCORRIMENTO DE MATERIAL BETUMINOSO

— Amostras estudadas —

No ensaio de avaliação do escorrimento de material betuminoso através do método do copo, as amostras a ensaiar, consistiram em misturas betuminosas com as composições baseadas nas fórmulas de trabalho definidas no ponto 8.2 aquando do estudo de formulação das misturas SMA a otimizar.

As amostras avaliadas foram colocadas numa estufa a uma temperatura de ensaio de 180 °C e 185 °C (misturas do tipo SMA 12 e SMA 14, respetivamente) durante um período de 60 minutos. O valor da temperatura de ensaio utilizada corresponde à temperatura para realização da “amassadura” recomendada pelo fabricante do betume acrescida de 15 °C.

— Apresentação e análise de resultados —

Neste ponto são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de avaliação do escorrimento realizados nas misturas do tipo SMA 12 e SMA 14. Das misturas do tipo SMA 12 e SMA 14, não se procedeu ao ensaio da SMA 12.A e da SMA 14-1.D, por diversos motivos, entre os quais, de acordo com o estudo realizado nos pontos 8.2.1 e 8.2.2, respetivamente, as misturas não cumpriram o

requisito mínimo de porosidade igual a 3,0 %, pelo que a avaliação do desempenho destas misturas SMA será limitado à avaliação da sensibilidade à água e à deformação permanente. Como consequência optou-se por utilizar a mesma percentagem de fibras definida para as misturas SMA 12.B e SMA 14-1.E, respetivamente.

No Quadro 8.18 são apresentados os principais resultados obtidos na avaliação do escorrimento das misturas do tipo SMA 12.B, SMA 12.C e SMA 14-1.E.

Quadro 8.18 – Resultados da avaliação do escorrimento da SMA 12.B, SMA 12.C e SMA 14-1.E segundo o método do copo indicado na EN 12697-18

Identificação das amostras	Percentagem de betume, P_b (%)	Percentagem de fibras celulósicas, (%)	Resultados obtidos		Percentagem de material escorrido, D_n (%)
			Percentagem mínima de fibras celulósicas a utilizar segundo a equação proposta (5.2)		
			$D \leq 0,2$	$D \leq 0,3$	
SMA 12.B-E1	6,5	0,5	0,6 (0,55)	0,5 (0,51)	0,17
SMA 12.B-E2					0,27
Média					0,22
SMA 12.C-E1	6,5	0,5	0,6 (0,55)	0,5 (0,51)	0,23
SMA 12.C-E2					0,25
Média					0,24
SMA 14-1.E-E1	6,5	0,6	0,6 (0,55)	0,5 (0,51)	0,19
SMA 14-1.E-E2					0,20
Média					0,20

Da análise do Quadro 8.18, é possível concluir que as diversas misturas SMA 12.B, SMA 12.C e SMA 14-1.E com uma percentagem de betume de 6,5 % e 0,5 % e 0,6 % de fibras celulósicas, apresentaram um bom comportamento relativamente à sensibilidade ao escorrimento, com um valor inferior a 0,3 % ($D_{0,3}$), como recomendado no Quadro 4.4.

No Quadro 8.18 se analisada a equação (5.2) proposta no ponto 5.5 (Fase 1 do estudo experimental), para estimar a percentagem mínima de fibras celulósicas a utilizar, para assegurar um escorrimento de material igual a 0,3 %, verificou-se que a percentagem mínima de fibras estimada a adotar seria de 0,51 %, passando esse valor a 0,55 % se pretendido um escorrimento de material igual a 0,2 %. Assim considera-se que os resultados corroboram as percentagens de fibras celulósicas determinadas analiticamente, evidenciando o potencial da equação (5.2) como análise estimativa da percentagem de fibras celulósicas a utilizar numa SMA.

8.3.2 AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE À ÁGUA

— Amostras estudadas —

A avaliação da sensibilidade à água das misturas SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C e SMA 14-1.E, foi realizada segundo o método de ensaio descrito na norma EN 12697-12, para as mesmas condições que foram definidas no capítulo 6 (Fase 2 do estudo experimental). As misturas betuminosas avaliadas

utilizam as composições baseadas nas fórmulas de trabalho definidas no ponto 8.2 aquando do estudo de formulação das misturas SMA “otimizadas”.

— Apresentação e análise de resultados —

No Quadro 8.19 é apresentado um resumo dos principais resultados apresentados no Anexo III, obtidos na avaliação comportamento à sensibilidade à água das misturas SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.E comparativamente à mistura SMA 12.O, assim como as respetivas características volumétricas. Na Figura 8.11 são apresentados graficamente os resultados para as misturas SMA avaliadas na presente fase do estudo experimental (Fase 4), complementados com a mistura SMA 12.O e a mistura escolhida de controlo (AC 14 surf 35/50) estudada por Pimentel (2013). No Anexo III é igualmente apresentada a avaliação do tipo de rotura (EN 12697-23) que se observou nos provetes ensaiados segundo a norma EN 12697-12, no que concerne ao estado do revestimento na superfície do agregado e à presença de agregado fraturado ou esmagado.

Quadro 8.19 – Resumo dos resultados da avaliação da sensibilidade à água obtidos para as misturas SMA (SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.E) comparativamente à SMA 12.O e SMA 14-1.O segundo a EN 12697-12

Identificação do grupo	Identificação das amostras	Resultados obtidos			
		Baridade média, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade média, Vv (%)	Resistência à tração indireta, ITS (kPa)	Resistência conservada em tração indireta, ITSR (%)
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA12.O ($P_b = 5,5\%$)	2,445	3,4	1710	88
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C		2,443	3,5	1504	
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA12.A ($P_b = 5,5\%$)	2,452	1,3	1508	100 (104)
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C		2,455	1,2	1572	
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA12.B ($P_b = 6,5\%$)	2,381	4,2	1496	86
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C		2,397	3,6	1281	
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA 12.C ($P_b = 6,5\%$)	2,376	4,4	1339	75
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C		2,373	4,5	1008	
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA14-1.O ($P_b = 6,0\%$)	2,495	4,7 [3,6 ¹]	1737	100 (101)
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C		2,494	4,7 [3,6 ¹]	1755	
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA14-1.E ($P_b = 6,5\%$)	2,524	3,6	1532	100 (101)
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C		2,530	3,4	1550	

Legenda: 1) valor da porosidade assumindo a mesma baridade máxima teórica do estudo da Pragosa S.A. (2,588 Mg/m³)

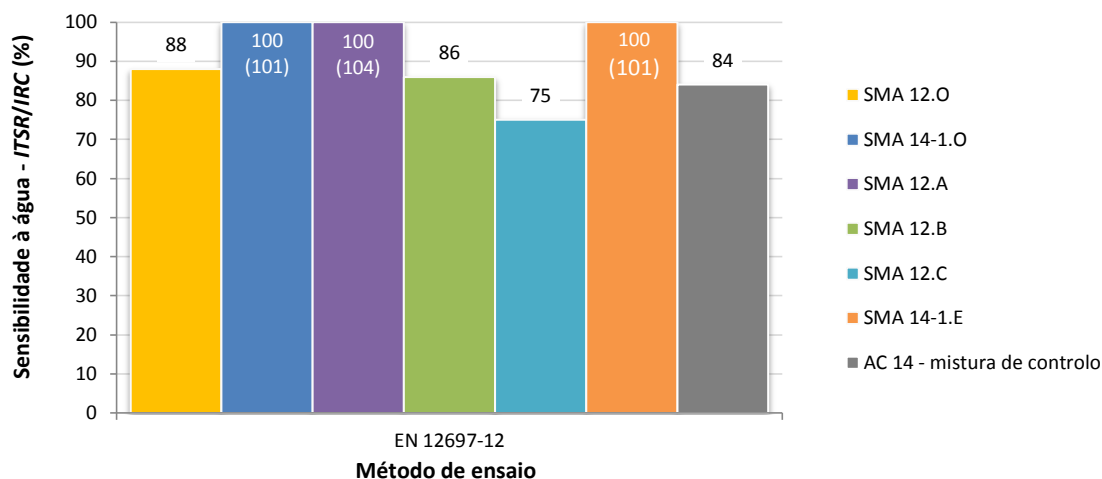


Figura 8.11 – Resultados da sensibilidade à água da SMA 12.O, SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.O e SMA 14-1.E e mistura de controlo segundo o método EN 12697-12

De acordo com o Quadro 8.19 e Figura 8.11 observa-se que a mistura SMA 12.A, apresentou uma resistência conservada em tração indireta igual 100 % (104 %). Este valor foi manifestamente superior ao observado para as restantes misturas SMA 12 (88 % - SMA 12.O, 86 % - SMA 12.B e 75 % - SMA 12.C). No caso das misturas do tipo SMA 14, verificou-se o mesmo comportamento com um valor de 100 % (101 %) para a SMA 14-1.O, SMA 14-1. Em ambos os tipos de misturas SMA verificou-se aparentemente que a sensibilidade à água não está diretamente relacionada com a percentagem de betume utilizada. Todas as misturas SMA “otimizadas” (SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 14-1.E) à exceção da SMA 12.C apresentaram uma menor sensibilidade à água comparativamente à mistura de controlo (AC 14).

Observou-se ainda um aumento da sensibilidade à água (*ITSR*) para um aumento da percentagem de partículas ativas utilizada a qual também se reflete numa redução dos valores obtidos para a resistência conservada em tração indireta.

Em suma, os resultados, segundo a norma EN 12697-12, para as SMA “otimizadas” evidenciaram misturas betuminosas com reduzida sensibilidade à água. Os resultados obtidos enquadram-se, pois nos limites especificados no Quadro 4.4 para as propriedades das misturas SMA, à exceção da SMA 12.C com um valor inferior a 80 %.

Os resultados apresentados no Anexo III para as SMA “otimizadas” demonstram, o que foi constatado no capítulo 6, para as SMA originais, que não se observaram deficiências significativas no revestimento e reduzida expressão de agregados fraturados ou esmagados nos provetes ensaiados. A rotura durante o ensaio tende a ocorrer, portanto, essencialmente na ligação entre o mastique betuminoso e os agregados grossos.

8.3.3 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

— Amostras estudadas —

No ensaio de simulação em pista de laboratório segundo a EN 12697-22, as condições de fabrico e compactação dos provetes, assim como de ensaio correspondem às que haviam sido definidas

no capítulo 6 (Fase 2 do estudo experimental). As misturas SMA fabricadas utilizam as composições baseadas nas fórmulas de trabalho definidas no ponto 8.2 aquando do estudo de formulação das misturas SMA “otimizadas”. Todas as misturas SMA foram fabricadas para a percentagem ótima de betume, à exceção da mistura SMA 14-1.D, onde se utilizou a percentagem ótima de betume acrescida de 0,5 %. A utilização de uma percentagem de betume superior à ótima, visa para uma porosidade inferior a 3,0 %, avaliar o efeito de um contacto menos eficiente entre partículas ativas (efeito de *stone-on-stone*).

— Apresentação e análise de resultados —

No Quadro 8.20 são apresentados os principais resultados obtidos na avaliação do comportamento à deformação permanente das misturas SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.D, SMA 14-1.E, assim como as respetivas características volumétricas.

Quadro 8.20 – Resultados da avaliação da resistência à deformação permanente obtidos para as misturas SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.D e SMA 14-1.E

Identificação das amostras	Resultados obtidos				
	Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_v (%)	Deformação máxima (profundidade de rodeira a 10000 ciclos), RD_{AIR} (mm)	Taxa de deformação, WTS_{AIR} (mm/10 ³ ciclos)	Percentagem de profundidade de rodeira a 10000 ciclos, PRD_{AIR} (%)
SMA 12.O	2,432	4,0	2,3	0,05	4,7
SMA 12.A-L1	2,428	2,3	2,6	0,05	5,2
SMA 12.A-L2	2,433	2,1	2,5	0,04	4,9
Média	2,430	2,2	2,5	0,05	5,1
SMA 12.B-L1	2,427	2,3	3,0	0,08	6,1
SMA 12.B-L2	2,414	2,9	3,0	0,09	6,0
Média	2,420	2,6	3,0	0,09	6,0
SMA 12.C-L1	2,402	3,3	3,0	0,11	5,9
SMA 12.C-L2	2,424	2,4	2,8	0,09	5,6
Média	2,413	2,9	2,9	0,10	5,8
SMA14-1.PR ¹⁾	2,319 ²⁾	-	2,7	0,07	4,3
SMA 14-1.D-L1	2,521	2,6	3,8	0,09	7,5
SMA 14-1.D-L2	2,526	2,4	3,8	0,12	7,5
Média	2,523	2,5	3,8	0,10	7,5
SMA 14-1.E-L1	2,533	3,3	2,5	0,07	5,0
SMA 14-1.E-L2	2,538	3,1	2,7	0,07	5,5
Média	2,535	3,2	2,6	0,07	5,2

Legenda: 1) mistura avaliada no estudo da Pragosa, S.A.; 2) baridade geométrica

Na Figura 8.12 (SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C) e na Figura 8.13 (SMA 14-1.D, SMA 14-1.E) são apresentados os resultados da evolução da deformação permanente, onde se relaciona a deformação

permanente acumulada e o número de ciclos de carga. Adicionalmente é igualmente representada a evolução da deformação permanente para a mistura SMA 12.O (Figura 8.12) e para a SMA 14-1.PR (avaliada no estudo da Pragosa, S.A), SMA 14-1.O, SMA 14-2 (Figura 8.13) e uma mistura de controlo AC 14 proveniente do estudo realizado por Pimentel (2013) para ambas as figuras (Figura 8.12 e Figura 8.13).

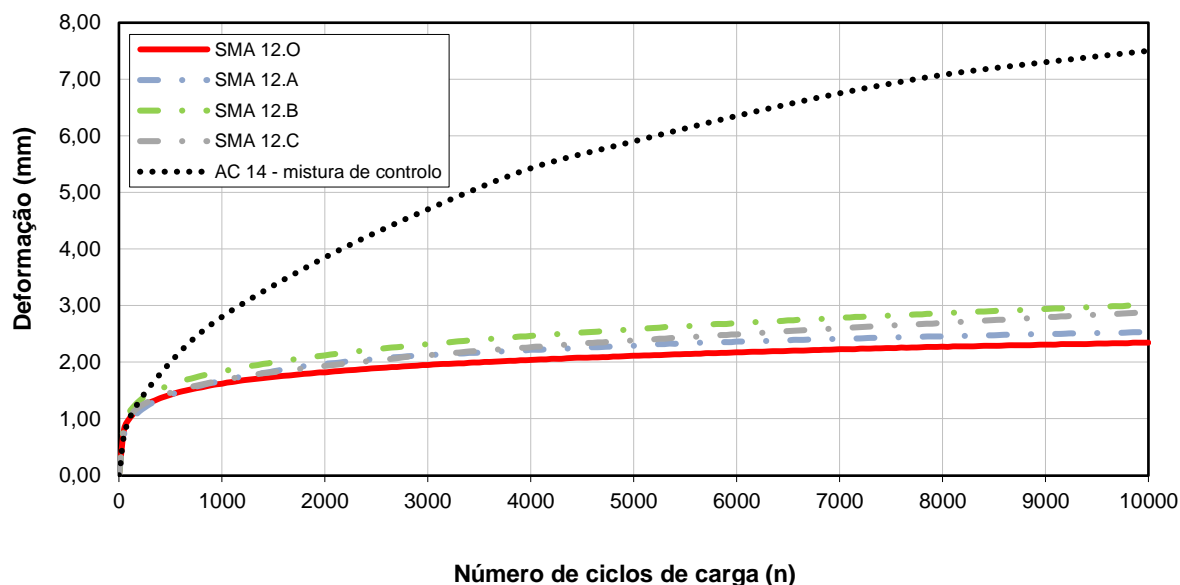


Figura 8.12 – Evolução da deformação permanente das misturas SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 12.O e da mistura de controlo

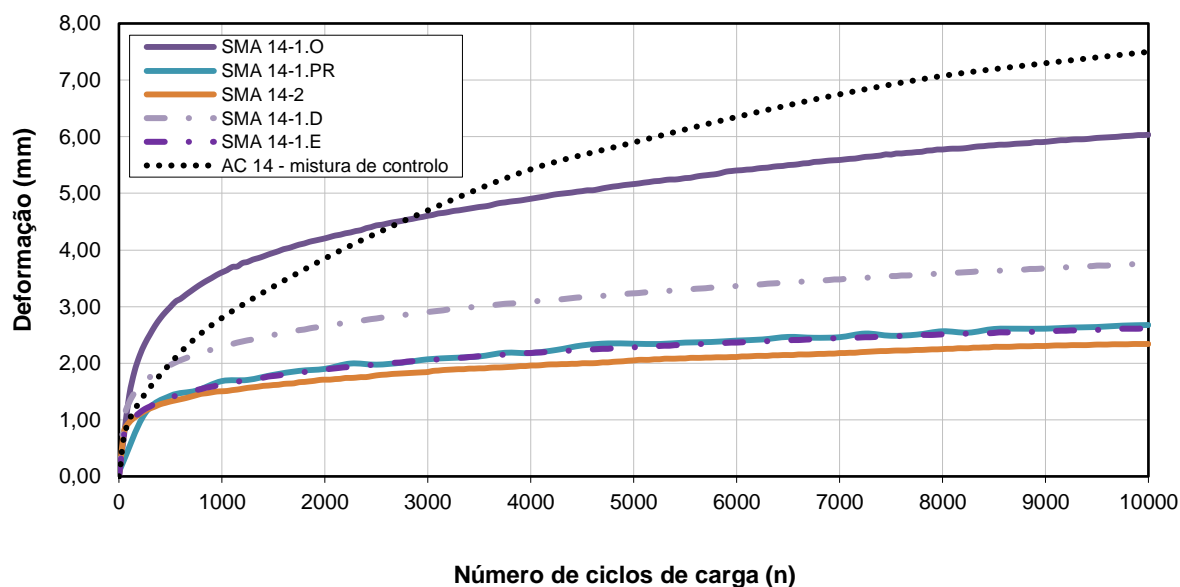


Figura 8.13 – Evolução da deformação permanente das misturas SMA 14-1.D, SMA 14-1.E, SMA 14-1.O, SMA14-1.PR, SMA 14-2 e da mistura de controlo (AC 14)

Da análise da Figura 8.12 e do Quadro 8.20, observa-se que todas as misturas do tipo SMA 12 (SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C) e SMA 14 (SMA 14-1.D, SMA 14-1.E) apresentaram um excelente comportamento à deformação permanente comparativamente à mistura betuminosa de controlo (AC 14 surf 35/50).

No caso das misturas do tipo SMA 12 (SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C) as mesmas apresentaram uma reduzida deformação que em média variou de 2,5 a 3,0 mm para 10000 ciclos de carga. Relativamente à taxa de deformação e percentagem de profundidade de rodeira a 10000 ciclos apresentou valores médios entre 0,05 e 0,10 mm/10³ ciclos e de 5,1 a 6,0 %, respetivamente. Das SMA “otimizadas” a SMA 12.A corresponde à que melhor comportamento à deformação permanente apresentou. Porém, o seu comportamento é equivalente ao da SMA 12.O, apesar do acréscimo de partículas ativas de 58,3 % para 65,9 %, o que não parece evidenciar uma otimização do efeito de *stone-on-stone* obtido segundo o método de compactação de partículas ativas com o varão, assim como da percentagem de betume utilizada. No caso da SMA 12.B e SMA 12.C, a que melhores resultados apresentou corresponde à SMA 12.C, contudo muito semelhantes entre si. O mesmo poderia ser referido relativamente às misturas SMA 12.O e SMA 12.A, porém para a mistura SMA 12.B e SMA 12.C foi utilizada uma percentagem de betume igual a 6,5 %.

No que concerne às misturas do tipo SMA 14 (SMA 14-1.D e SMA 14-1.E), verificou-se um comportamento semelhante ao obtido para as misturas SMA 12, com uma reduzida deformação que em média variou de 2,6 a 3,8 mm para 10000 ciclos de carga. Relativamente à taxa de deformação e percentagem de profundidade de rodeira a 10000 ciclos apresentaram valores médios entre 0,07 e 0,10 mm/10³ ciclos e de 5,2 a 7,5 %, respetivamente. Das misturas SMA avaliadas a que melhor comportamento apresentou corresponde à SMA 14-1.E, cujo o comportamento é equivalente ao obtido para a SMA 14-1.PR. Contudo, para a SMA 14-1.E utilizou-se uma percentagem de betume igual a 6,5 %, quando na SMA 14-1.PR esse valor foi de 6,0 %, evidenciando uma otimização do efeito de *stone-on-stone*. Foi ainda possível constatar que mesmo para uma porosidade reduzida de 2,5 % e com uma percentagem de betume igual a 7,0 % (SMA 14-1.D) a redução da resistência à deformação permanente foi limitada, sendo ainda assim francamente superior (cerca do dobro no que concerne à deformação máxima) relativamente à mistura de controlo AC 14.

Os resultados evidenciam que o método de formulação proposto no ponto 7.3 com a utilização da compactação pesada com o Proctor para as partículas ativas permite a obtenção de misturas SMA otimizadas no que concerne ao efeito de *stone-on-stone* permitindo acomodar uma percentagem de betume mais elevada, sem com isso reduzir significativamente a resistência à deformação permanente. Os resultados obtidos para as diversas SMA “otimizadas” enquadram-se, nos limites especificados no Quadro 4.4 considerando-se ser possível torna-los eventualmente mais restritivos, pelo que se considera pertinente ter em consideração os resultados obtidos e os de trabalhos futuros no sentido de reformular os limites especificados para a realidade nacional.

8.3.4 AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE E RESISTÊNCIA AO FENDILHAMENTO POR FADIGA

— Amostras estudadas —

No ensaio de avaliação do módulo de deformabilidade e do fendilhamento por fadiga segundo a norma EN 12697-26 e EN 12697-24, respetivamente, as condições de fabrico e compactação dos provetes, assim como de ensaio correspondem às que haviam sido definidas no capítulo 6 (Fase 2 do estudo experimental).

Para cada SMA foram fabricadas duas lajetas as quais permitem obter por corte, um conjunto de dez provetes prismáticos com cerca de 50 mm de altura, 50 mm de largura e 400 mm de comprimento. As misturas fabricadas (SMA 12.B, SMA 12.C e SMA 14.E) utilizam a composição baseada nas fórmulas de trabalho definidas no ponto 8.2 aquando do estudo de formulação das misturas SMA “otimizadas”.

Relativamente aos ensaios para avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga das misturas SMA 12.B, SMA 12.C e SMA 14-1.E, foram realizados em extensão controlada, aplicando um carregamento sinusoidal com uma frequência de 10 Hz. Os valores da extensão imposta nos ensaios variaram entre 500×10^{-6} e 700×10^{-6} .

— Apresentação e análise de resultados —

No Quadro 8.21 apresentam-se as características volumétricas dos provetes sujeitos a ensaio, bem como os respetivos valores médios dos módulos de deformabilidade em flexão obtidos em ensaios realizados à temperatura de 20 °C, para cada uma das frequências de carregamento aplicadas. Adicionalmente são apresentados os valores da extensão de tração das misturas SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.E para um milhão de aplicações de carga (ϵ_6), assim como o valor da inclinação da lei da fadiga (p).

Quadro 8.21 – Resultados do módulo de deformabilidade e vida à fadiga para as vigas ensaiadas à flexão (SMA 12.B, SMA 12.C e SMA 14-1.E)

Identificação das amostras	Resultados obtidos a 20 °C								
	Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_v (%)	Módulo de deformabilidade médio (MPa)					ϵ_6 ($\times 10^{-6}$ m/m)	Inclinação da lei de fadiga, p
			1 Hz	4 Hz	8 Hz	10 Hz	30 Hz		
F.S12.B	2,415	2,8	1375	2389	2971	3161	4437	400	-6,7
Desvio padrão (σ)	0,005	0,2	353	79	130	95	129	-	-
Coefficiente de variação (%)	0,2	7,1	25,7	3,3	4,4	3,0	2,9	-	-
F.S12.C	2,415	2,8	1493	2489	3030	3248	4509	425	-8,3
Desvio padrão (σ)	0,004	0,2	149	136	99	73	135	-	-
Coefficiente de variação (%)	0,2	5,8	10,0	5,5	3,3	2,2	3,0	-	-
F.S14-1.E	2,540	3,0	1766	2943	3564	3839	5270	459	-9,0
Desvio padrão (σ)	0,003	0,1	100	111	112	145	198	-	-
Coefficiente de variação (%)	0,1	3,3	5,7	3,8	3,1	3,8	3,8	-	-

Na Figura 8.14 é representada a evolução do módulo de deformabilidade das misturas SMA “otimizadas” (SMA 12.B e SMA 12.C e SMA 14-1.E) para as diferentes frequências utilizadas, assim como da mistura utilizada de controlo (AC14 surf 35/50) estudada por Pimentel (2013). Adicionalmente, para efeitos comparativos apresenta-se também a evolução do módulo de deformabilidade das misturas SMA utilizadas inicialmente (SMA 12.O e SMA 14-1.O).

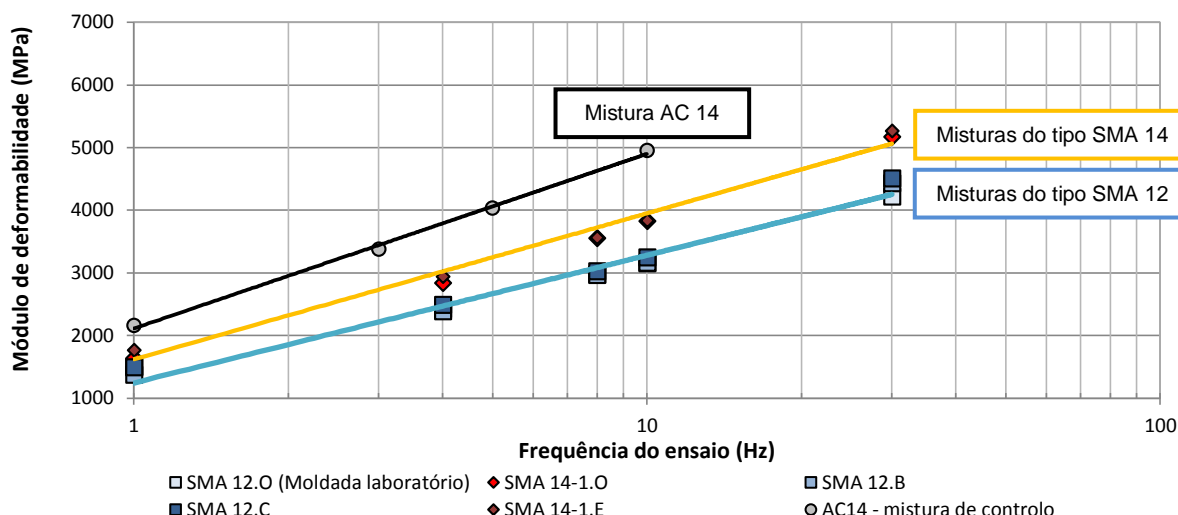


Figura 8.14 – Evolução do módulo de deformabilidade para diferentes frequências (misturas SMA 12.O, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.O, SMA 14-1.E e mistura de controlo AC 14)

Segundo a Figura 8.14 observa-se que as vigas ensaiadas de cada mistura SMA 12.B, SMA 12.C e SMA 14-1.E apresentaram um comportamento semelhante entre si, relativamente à avaliação do módulo de deformabilidade, com um coeficiente de variação aproximadamente nulo.

Das misturas SMA avaliadas verifica-se que a mistura SMA 14-1.E apresentou um módulo de deformabilidade ligeiramente superior ao observado para as misturas SMA 12.B e SMA 12.C, as quais são semelhantes entre si. Quando se compara os resultados com os obtidos para as misturas inicialmente utilizadas (SMA 12.O e SMA 14-1.O) verificou-se que o módulo de deformabilidade tende a manter-se inalterado, ou quando se observa uma ténue alteração, a mesma tende a ocorrer com um aumento do módulo de deformabilidade para um aumento da percentagem de partículas ativas utilizada na SMA. À semelhança do que se havia verificado na segunda fase do estudo experimental, as misturas SMA “otimizadas” tendem a apresentar um menor módulo de deformabilidade comparativamente à mistura de controlo (AC14) para as diferentes frequências utilizadas. A mistura AC14 apresenta para uma frequência de 10 Hz, um módulo de deformabilidade de cerca de 5000 MPa, comparativamente a cerca de 3200 MPa (SMA 12.B e SMA 12.C) e 3800 MPa (SMA 14-1.E).

Na Figura 8.15 apresentam-se as leis de fadiga obtidas nos ensaios com provetes das misturas SMA 12.B, SMA 12.C e SMA 14-1.E. Adicionalmente são apresentadas as leis de fadiga referentes a duas misturas betuminosas [mistura de controlo, AC14 surf 35/50 (Pimentel, 2013) e uma mistura de alto desempenho, MBR-BBA com 18 % de borracha e cerca de 7,0 % de betume, mistura aplicada em 1999 na primeira obra realizada com BBA em Portugal].

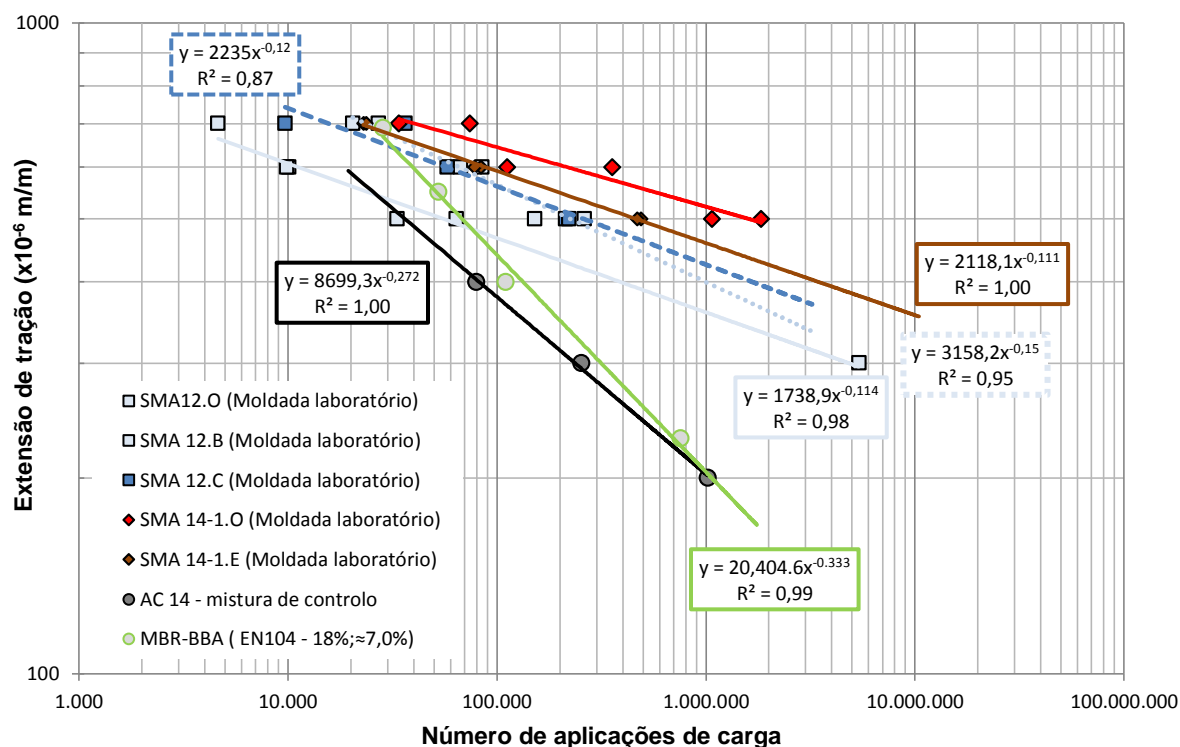


Figura 8.15 – Leis de fadiga das misturas SMA 12.O, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.O, SMA 14-1.E, mistura de controlo AC14 e MBR-BBA

Da análise da Figura 8.15 e do Quadro 8.21 constata-se que todas as misturas SMA “otimizadas” (SMA 12.B, SMA 12.C e SMA 14-1.E) tendem a apresentar um bom comportamento à fadiga com uma extensão correspondente a uma extensão de tração para um milhão de aplicações de carga (ϵ_6) variável entre 400×10^{-6} e 459×10^{-6} . Este intervalo de valores é superior ao valor obtido para a SMA 12.O (ϵ_6 igual a 337×10^{-6}), porém inferior ao valor obtido para a SMA 14-1.O no qual se obteve um ϵ_6 igual a 525×10^{-6} , a qual tinha uma porosidade de apenas 1,1 %. Das diferentes misturas “otimizadas” a SMA 14-1.E foi a que melhor desempenho demonstrou, seguida da SMA 12.C e da SMA 12.B. Tais resultados poderão estar relacionados com um aumento da percentagem de partículas ativas, uma vez que as misturas SMA 14-1.E e SMA 12.C apresentaram uma percentagem de cerca de 73 % de partículas ativas, comparativamente a cerca de 71 % no caso da SMA 12.B como anteriormente indicado nos Quadros 8.5 e Quadro 8.13.

Quando comparados os resultados com os obtidos para a mistura de controlo (AC14 com 5,0 % de betume) e MBR-BBA com cerca de 7,0 % de betume, as quais apresentaram um ϵ_6 aproximado de 200×10^{-6} , constatou-se que as misturas SMA “otimizadas” apresentaram um excelente comportamento ao fendilhamento por fadiga.

Relativamente ao andamento das leis de fadiga, verificou-se que nos ensaios efetuados a 10 Hz, a inclinação das leis de fadiga (ρ) das misturas SMA “otimizadas” variou entre -6,7 e -9,0. A mistura SMA 14-1.E é das misturas “otimizadas” a que apresentou um valor mais elevado para a inclinação da lei de fadiga, à semelhança do que já havia sucedido para a SMA 14-1.O.

8.3.5 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO ENVELHECIMENTO

— Amostras estudadas —

Na presente fase do estudo experimental (Fase 4) a avaliação do desempenho, contemplou ainda a avaliação da resistência ao envelhecimento das misturas SMA fabricadas e compactadas em laboratório (SMA 12.O, SMA 12.B, SMA 12.C e SMA 14-1.E).

Para cada mistura foram utilizadas duas lajetas as quais permitem obter por corte, um conjunto de dez provetes prismáticos com cerca de 50 mm de altura, 50 mm de largura e 400 mm de comprimento.

Posteriormente, para todos os provetes procedeu-se ao seu envelhecimento em laboratório segundo o método de LTOA (*Long-term Oven Aging*) de acordo com a norma AASHTO R30-02. Este método pretende simular o envelhecimento a longo prazo em laboratório, através do aquecimento em estufa dos provetes de mistura SMA compactada, durante um período de 5 dias, a uma temperatura de 85 °C, o qual é previamente antecedido de um período de homogeneização da temperatura dos provetes correspondente a 4 horas.

Adicionalmente, para realização de uma análise comparativa com os resultados obtidos em laboratório, foram ainda recolhidos provetes envelhecidos em obra (trecho experimental do LNEC e TEXSA) para a avaliação das misturas SMA 12.O e SMA 14-1.O, respetivamente. Os provetes prismáticos foram recolhidos dois e quatro anos após a aplicação em obra das misturas SMA 14-1.O e SMA 12.O, respetivamente.

Posteriormente para a avaliação da resistência ao envelhecimento das misturas SMA foram realizados ensaios para a avaliação do módulo de deformabilidade e do fendilhamento por fadiga segundo a norma EN 12697-26 e EN 12697-24, respetivamente, e de acordo com as condições de ensaio utilizadas anteriormente no presente estudo experimental (Fase 2 e 4).

— Apresentação e análise de resultados —

No Quadro 8.22 apresentam-se os valores médios das características volumétricas dos provetes sujeitos a ensaio, bem como os respetivos módulos de deformabilidade em flexão obtidos nos ensaios realizados à temperatura de 20 °C, para cada uma das frequências de carregamento aplicadas. Adicionalmente são apresentados os valores da extensão de tração das misturas SMA 12.O, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.O e SMA 14-1.E para um milhão de aplicações de carga (ϵ_6), assim como o valor da inclinação das respetivas leis de fadiga (p).

Quadro 8.22 – Resultados do módulo de deformabilidade e vida à fadiga para as vigas envelhecidas ensaiadas à flexão (SMA 12.O, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.O e SMA 14-1.E)

Identificação das amostras	Resultados obtidos a 20 °C								ϵ_6 ($\times 10^{-6}$ m/m)	Inclinação da lei de fadiga, p
	Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_V (%)	Módulo de deformabilidade médio (MPa)							
			1 Hz	4 Hz	8 Hz	10 Hz	30 Hz			
F.e.S12.O	2,467	2,5	5214	7074	8265	8592	10508	212 ³⁾	-5,7	
Desvio padrão (σ)	0,003	0,2	307	191	206	214	190	-	-	
Coefficiente de variação (%)	0,1	6,1	5,9	2,7	2,5	2,5	1,8	-	-	
F.te.S12.O	2,292	9,5	3886	4882	5314	5456	5901	157 ¹⁾	-12,2	
Desvio padrão (σ)	0,007	0,3	436	423	602	588	1087	-	-	
Coefficiente de variação (%)	0,3	2,8	11,2	8,7	11,3	10,8	18,4	-	-	
F.e.S12.B	2,435	2,0	1846	2917	3570	3819	5193	410 ³⁾	-8,3	
Desvio padrão (σ)	0,003	0,05	90	160	154	156	246	-	-	
Coefficiente de variação (%)	0,1	2,3	4,9	5,5	4,3	4,1	4,7	-	-	
F.e.S12.C	2,354	2,2	3240	4782	5600	5938	7428	248 ³⁾	-6,2	
Desvio padrão (σ)	0,012	0,1	250	365	383	369	451	-	-	
Coefficiente de variação (%)	0,5	6,0	7,7	7,6	6,8	6,2	6,1	-	-	
F.te.S14-1.O	2,417	6,7	1998	2773	3283	3542	4159	282 ²⁾	-4,9	
Desvio padrão (σ)	0,012	0,5	55	52	44	74	65	-	-	
Coefficiente de variação (%)	0,5	7,4	2,8	1,9	1,3	2,1	1,6	-	-	
F.e.S14-1.E	2,558	2,3	2222	3490	4244	4540	6082	432 ³⁾	-13,9	
Desvio padrão (σ)	0,006	0,2	160	159	213	237	307	-	-	
Coefficiente de variação (%)	0,2	9,8	7,2	4,6	5,0	5,2	5,0	-	-	

Legenda: 1) recolhida do trecho experimental após quatro anos em serviço; 2) recolhida na TEXSA após dois anos em serviço; 3) envelhecida em laboratório a 85 °C, durante 5 dias

Complementarmente na Figura 8.16 é apresentada uma comparação da evolução do módulo de deformabilidade das misturas (SMA 12.O, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.O e SMA 14-1.E) sem envelhecimento e após envelhecidas em laboratório e em obra, para as diferentes frequências utilizadas, assim como de uma mistura de controlo (AC14 surf 35/50 estudada por Pimentel (2013).

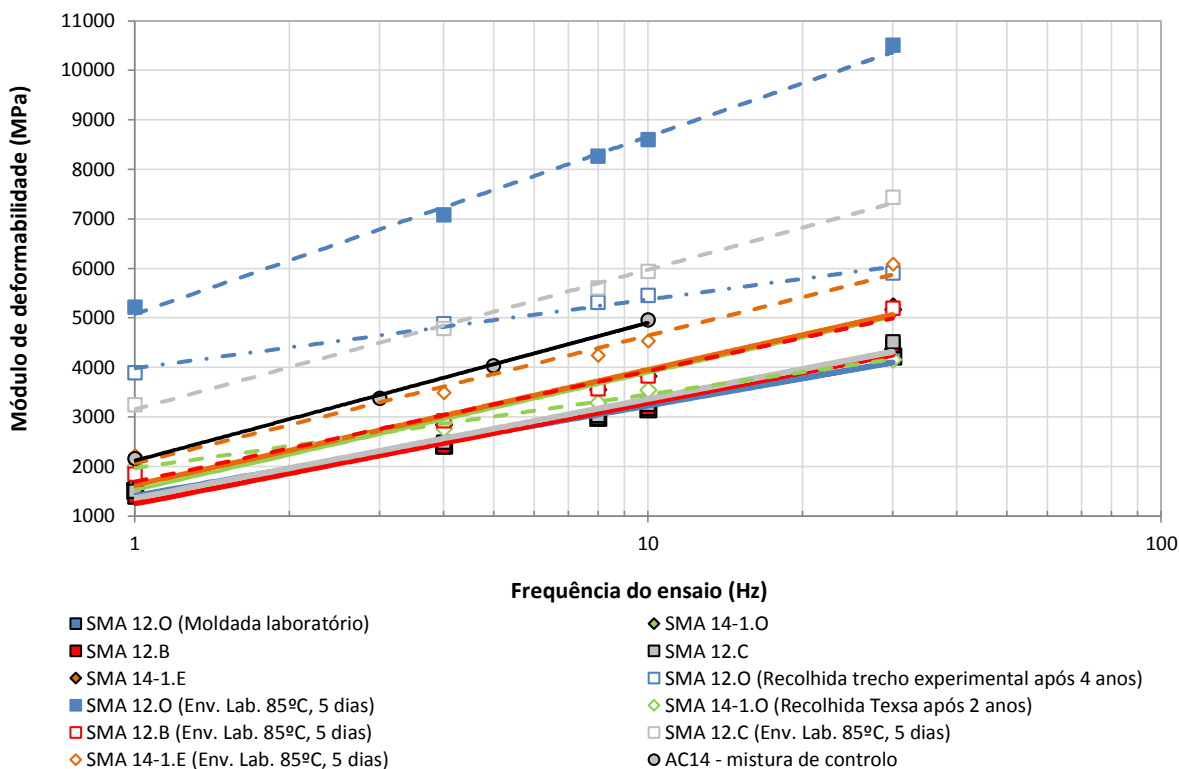


Figura 8.16 – Evolução do módulo de deformabilidade para diferentes frequências (misturas SMA 12.O, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.O, SMA 14-1.E e mistura de controlo AC14)

De acordo com o Quadro 8.22 e a Figura 8.16 todas as SMA apresentaram um aumento do módulo de deformabilidade a 20 °C para todas as frequências ensaiadas (1, 4, 8, 10 e 30 Hz). Segundo os resultados é possível constatar que todas as misturas SMA envelhecidas tendem a apresentar um módulo de deformabilidade para uma frequência de 10 Hz, compreendido entre 3500 MPa e 8600 MPa. Se consideradas as misturas SMA 12.B e SMA 14-1.E o intervalo do módulo de deformabilidade está compreendido entre 3800 MPa e 4500 MPa, respetivamente. Quando se aumenta a percentagem de partículas ativas (SMA 12.C) passa-se para um módulo de deformabilidade de aproximadamente 5900 MPa. De acordo com a revisão bibliográfica (ponto 3.2.4), o aumento da percentagem de partículas ativas tende a promover um aumento da permeabilidade das misturas SMA, o que também pode ter contribuído para um aumento do envelhecimento.

Do mesmo modo, é possível verificar para a SMA 12.O, que o envelhecimento promovido em laboratório foi superior ao observado em obra (trecho experimental) apesar da elevada porosidade observada na SMA aplicada no trecho experimental. Semelhante resultado foi obtido por Batista *et al.* (2006), onde concluiu que para uma mistura rugosa com 7 % de BBA, este método de envelhecimento LTOA simulou de forma adequada o envelhecimento das misturas aplicadas em obra após 7 anos em serviço.

Na Figura 8.17 apresentam-se as leis de fadiga obtidas nos ensaios com provetes de misturas SMA 12.O, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.O e SMA 14-1.E (a traço interrompido corresponde às misturas SMA envelhecidas e traço contínuo às respetivas SMA sem envelhecimento). Adicionalmente são apresentadas as leis de fadiga referentes a duas misturas betuminosas [mistura de controlo, AC14 surf 35/50 (Pimentel, 2013) e uma mistura de alto desempenho, MBR-BBA com 18 % de borracha e cerca de 7,0 % de betume, mistura aplicada em 1999 na primeira obra realizada com BBA em Portugal].

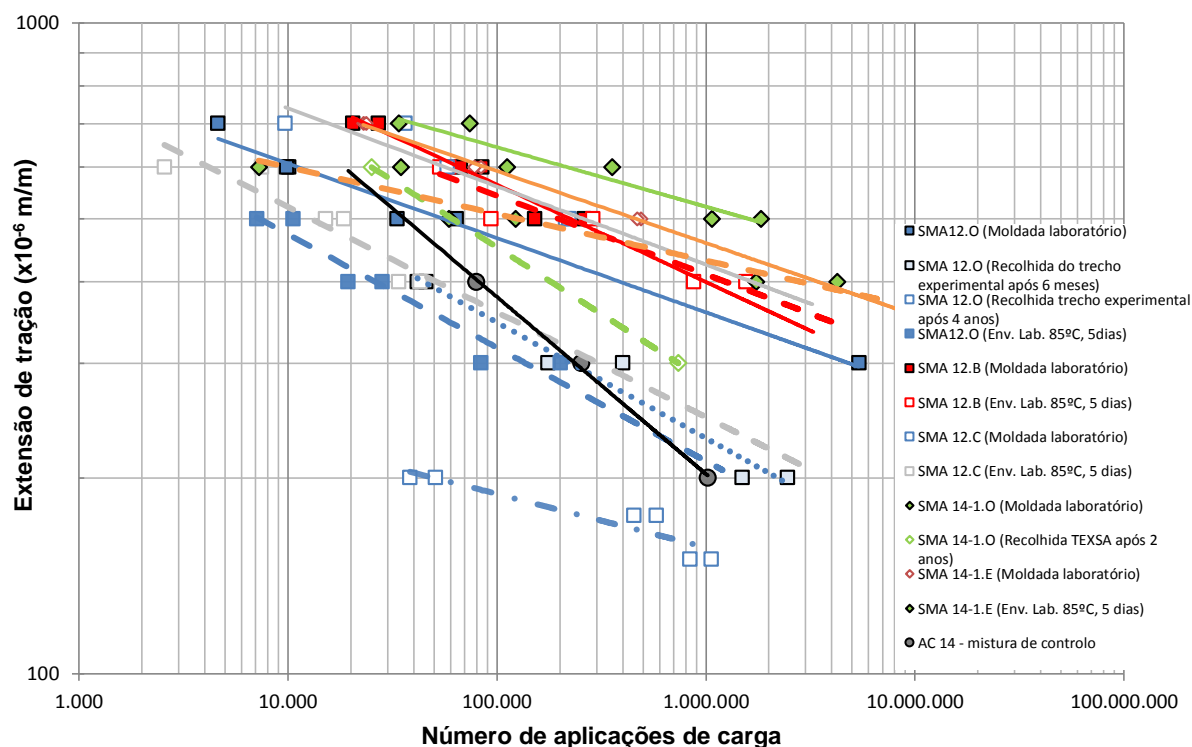


Figura 8.17 – Leis de fadiga das misturas SMA 12.O, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.O e SMA 14-1.E, mistura de controlo (AC 14)

Da análise da Figura 8.17 e do Quadro 8.22, à semelhança do que foi observado para o módulo de deformabilidade, a SMA 12.B e a SMA 14-1.E apresentaram um comportamento à fadiga quase que inalterado após envelhecimento com uma extensão de tração para um milhão de aplicações de carga (ε_6) de aproximadamente 410×10^{-6} e 430×10^{-6} , respetivamente.

Se analisada a mistura SMA 14-1.O que foi recolhida de obra após 2 anos em serviço, apesar de apresentar um módulo de deformabilidade semelhante ao da SMA 14-1.O fabricada em laboratório tende a apresentar uma menor extensão de tração com um ε_6 de aproximadamente 280×10^{-6} . Porém neste caso teria de se ter avaliado ao envelhecimento a SMA 14-1.O para se poder comparar o real envelhecimento que ocorre em laboratório face ao que ocorreu na mistura SMA que foi recolhida de obra. É ainda possível constatar que o valor obtido para SMA 14-1.O recolhida da TEXSA após 2 anos em serviço (porosidade de 6,7%), consegue ainda assim ser superior ao obtido para a mistura SMA 12.C que apresentou um ε_6 de aproximadamente 250×10^{-6} .

No que concerne à mistura SMA 12.O foi das diversas misturas SMA avaliadas a que maior sensibilidade ao envelhecimento apresentou, ainda assim de uma forma genérica com uma extensão de tração com valores de ε_6 entre aproximadamente 160×10^{-6} e 210×10^{-6} , o que é significativo comparativamente à mistura de controlo não envelhecida do tipo AC 14 estudada em Pimentel (2013).

Relativamente ao andamento das leis de fadiga, verifica-se que nos ensaios efetuados a 10 Hz, a inclinação das leis de fadiga (ρ) da mistura SMA ensaiada variou entre -4,9 e -13,9.

8.3.6 APRECIÇÃO SUCINTA DOS RESULTADOS OBTIDOS

— Avaliação do escoamento de material betuminoso —

Relativamente à avaliação do escoamento de material betuminoso considera-se ter sido efetuada uma adequada análise integrada dos resultados, pelo que se remete para maior detalhe para o ponto 8.3.1, onde se constatou ser possível aferir uma boa adequabilidade da equação proposta (5.2) para determinação da percentagem mínima de fibras celulósicas a adotar em função da percentagem de betume.

— Avaliação da sensibilidade à água —

No caso específico da avaliação da sensibilidade à água foram quatro as misturas SMA “otimizadas” (SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C e SMA 14-1.E) avaliadas segundo a norma EN 12697-12, as quais se apresentam na Figura 8.18. Adicionalmente, na Figura 8.18 são ainda apresentados os resultados para as misturas SMA avaliadas na segunda fase do estudo experimental (Fase 2) assim como da mistura betuminosa convencional (AC 14) utilizada como mistura de controlo obtida do estudo realizado por Pimentel (2013).

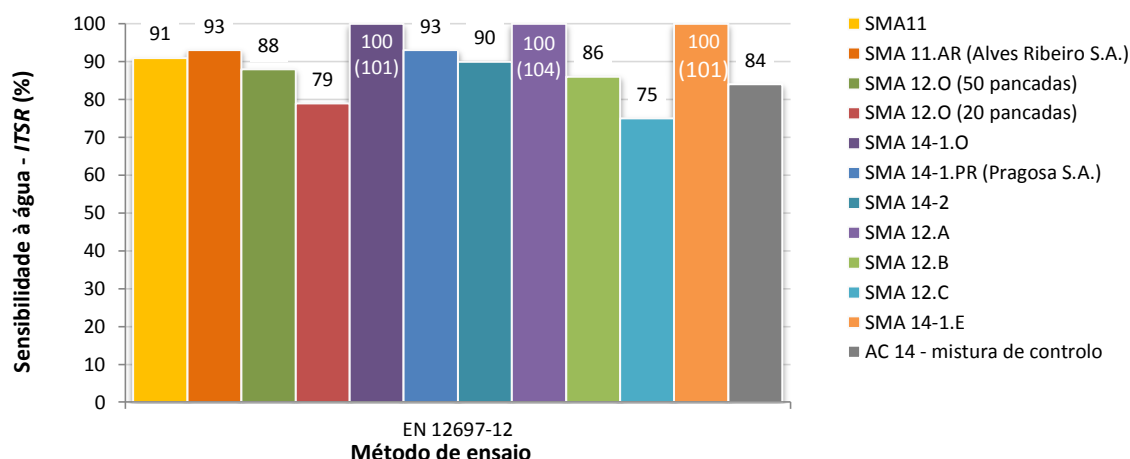


Figura 8.18 – Compilação global dos resultados da sensibilidade à água segundo a norma EN 12697-12

Segundo os resultados compilados na Figura 8.18, em termos dos valores obtidos para a resistência conservada em tração indireta (*ITSr*), verificou-se que todas as misturas SMA, apresentaram valores similares com o *ITSr* a variar normalmente entre 86 % e 93 %, porém casos existem (SMA 14-1.O, SMA 12.A e SMA 14-1.E), em que o *ITSr* foi superior a 100 %, o que pode evidenciar que a utilização de um mastic betuminoso com uma elevada percentagem de partículas passivas, comparativamente à percentagem de partículas ativas, tende a contribuir para uma diminuição da sensibilidade à água.

Semelhante conclusão foi obtida para a mistura SMA 12.C, a qual tende a apresentar uma resistência conservada em tração indireta inferior ao obtido para a mistura de controlo (AC 14), valor esse que é semelhante ao obtido para a mistura SMA 12.O (compactada com 20 pancadas em cada um dos topos do provete). Tal resultado parece estar relacionado um aumento da percentagem de partículas ativas tornando a SMA mais permeável e dessa forma mais sensível à água, apesar da reduzida porosidade.

Porém quando efetuada a avaliação da influência de cada material constituinte na composição das misturas SMA relativamente à sensibilidade à água, não se observa uma correlação adequada com os

resultados da sensibilidade à água, todavia se não for considerada a mistura SMA 12.O é possível obter correlações mínimas, como as que se apresentam da Figura 8.19 à Figura 8.22.

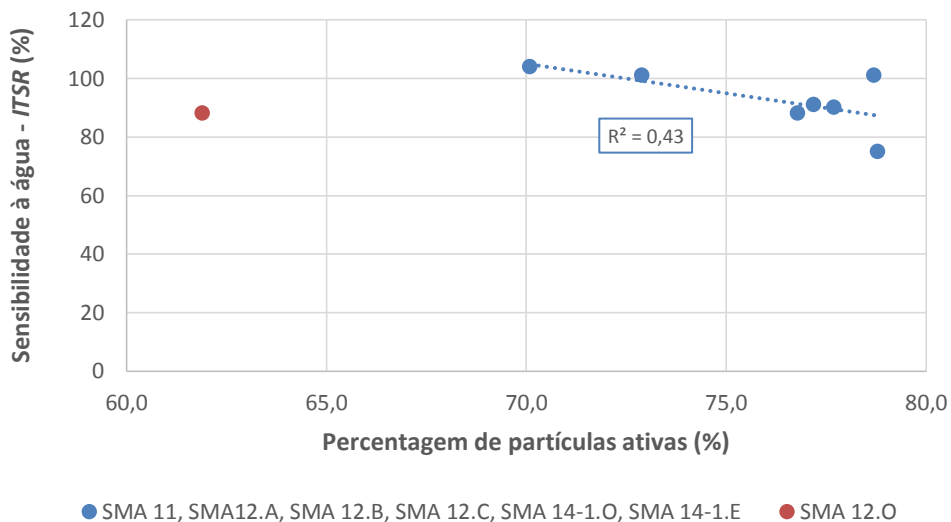


Figura 8.19 – Relação entre a sensibilidade à água e a porcentagem de partículas ativas

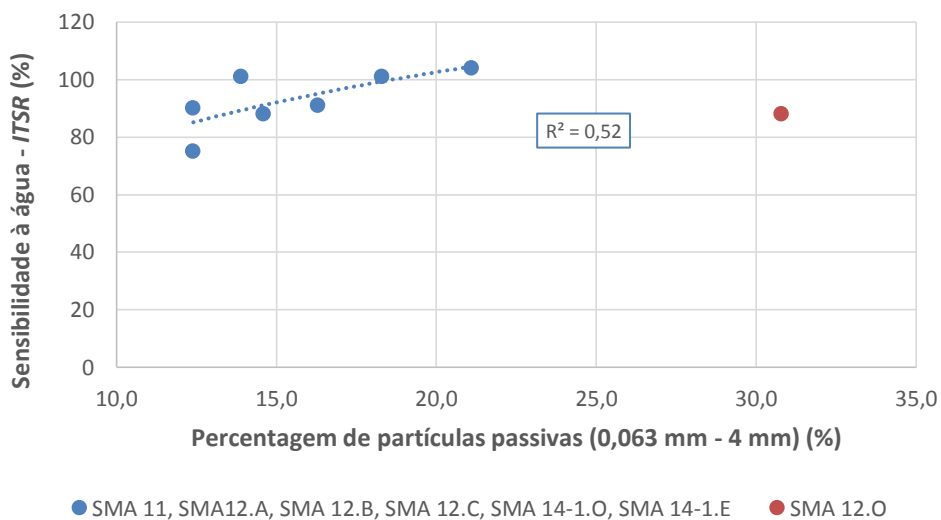


Figura 8.20 – Relação entre a sensibilidade à água e a porcentagem de partículas passivas de dimensão entre 0,063 mm e 4 mm

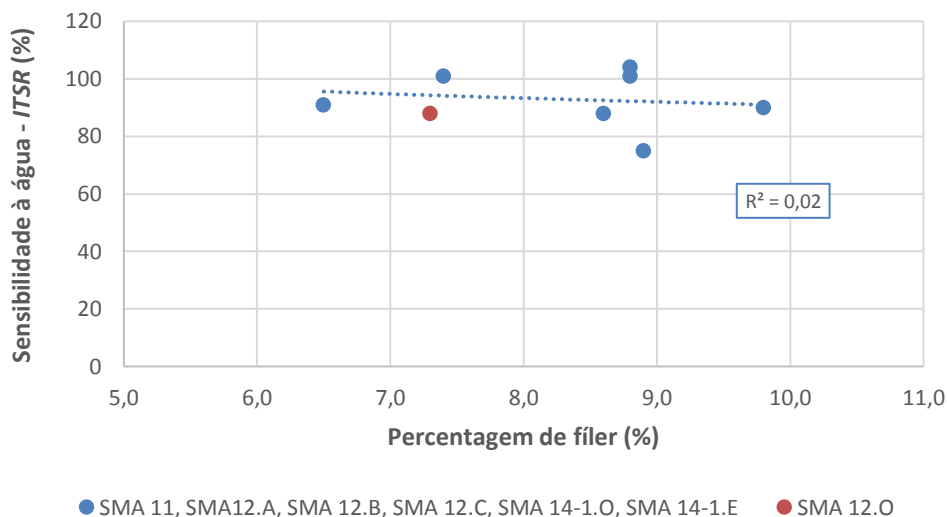


Figura 8.21 – Relação entre a sensibilidade à água e a percentagem de filler

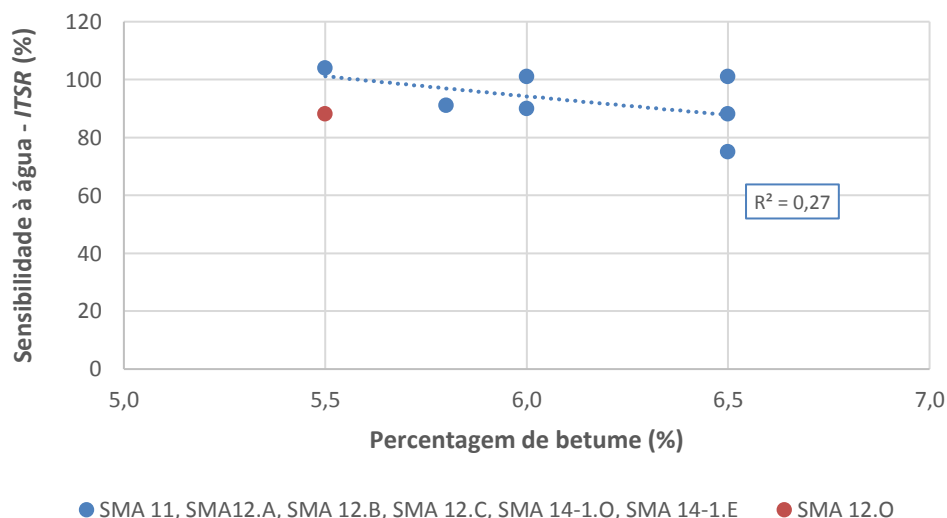


Figura 8.22 – Relação entre a sensibilidade à água e a percentagem de betume

De acordo com a análise realizada, observou-se que a sensibilidade à água tende a ser influenciada pela percentagem de partículas ativas (Figura 8.19) e pela percentagem de partículas passivas (Figura 8.20), com um coeficiente de correlação de apenas 0,43 e 0,52, respetivamente. No que concerne à percentagem de betume verificou-se uma reduzida influência na sensibilidade à água, observando-se uma grande variação para cada percentagem utilizada, evidenciando a conclusão anterior. Isso mesmo foi também possível de verificar quando avaliada a influência do filler de forma individual, não sendo evidente uma correlação com a sensibilidade à água.

Ainda de acordo com a análise realizada, verificou-se uma tendência para um aumento da sensibilidade à água com o aumento da percentagem de partículas ativas (Figura 8.19), consequência de um possível aumento da permeabilidade da mistura SMA, resultante de uma menor percentagem de partículas passivas (dimensão inferior a 4 mm). Isso pode ser observado na Figura 8.20 onde a utilização de uma maior percentagem de partículas passivas (entre 0,063 mm e 4 mm) corresponde a uma diminuição da sensibilidade à água. Os resultados obtidos parecem

corroborar, a conclusão que foi obtida no ponto 6.7 relativa ao facto das misturas SMA terem um mastique betuminoso rico em betume, o que pode eventualmente contribuir para um aumento da sensibilidade à água dos provetes quando se aumenta a temperatura de ensaio (de 15 °C para 60 °C no ensaio de *ITSR* relativamente ao ensaio de *IRC*) consequência de uma diminuição da rigidez do mastique betuminoso.

— Avaliação da resistência à deformação permanente —

No presente ponto, apresenta-se uma compilação dos resultados dos ensaios para avaliação da resistência à deformação permanente realizados sobre as misturas SMA 12.A, SMA 12.B, SMA 12.C, SMA 14-1.D e SMA 14-1.E (Quadro 8.23 e Figura 8.23), segundo o método de acondicionamento dos provetes ao ar (método B), preconizado na norma EN 12697-22. Adicionalmente na Figura 8.23 são ainda representados os resultados obtidos para as restantes misturas SMA avaliadas no presente estudo (SMA 11, SMA 12.O, SMA 14-1.O e SMA 14-2) assim como para a SMA 14-1.PR, avaliada no estudo realizado pela Pragosa, S.A. e uma mistura AC14 escolhida como mistura de controlo obtida do estudo realizado por Pimentel (2013).

Quadro 8.23 – Compilação global dos resultados da avaliação da resistência à deformação permanente segundo a norma EN 12697-22

Identificação das misturas betuminosas	Resultados obtidos (valores médios)				
	Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_v (%)	Deformação máxima (profundidade de rodeira a 10000 ciclos), RD_{AIR} (mm)	Taxa de deformação, WTS_{AIR} (mm/10 ³ ciclos)	Percentagem de profundidade de rodeira a 10000 ciclos, PRD_{AIR} (%)
SMA 11	2,483	5,1	2,4	0,06	4,9
SMA 12.O	2,432	4,0	2,3	0,05	4,7
SMA 14-1.O	2,578	1,5	6,0	0,17	12,1
SMA 14-1.PR	2,319 ¹⁾	-	2,7	0,07	4,3
SMA 14-2	2,344	3,5	2,3	0,06	4,7
SMA 12.A	2,430	2,2	2,5	0,05	5,1
SMA 12.B	2,420	2,6	3,0	0,09	6,0
SMA 12.C	2,413	2,9	2,9	0,10	5,8
SMA 14-1.D	2,523	2,5	3,8	0,10	7,5
SMA 14-1.E	2,535	3,2	2,6	0,07	5,2

Legenda: 1) baridade geométrica

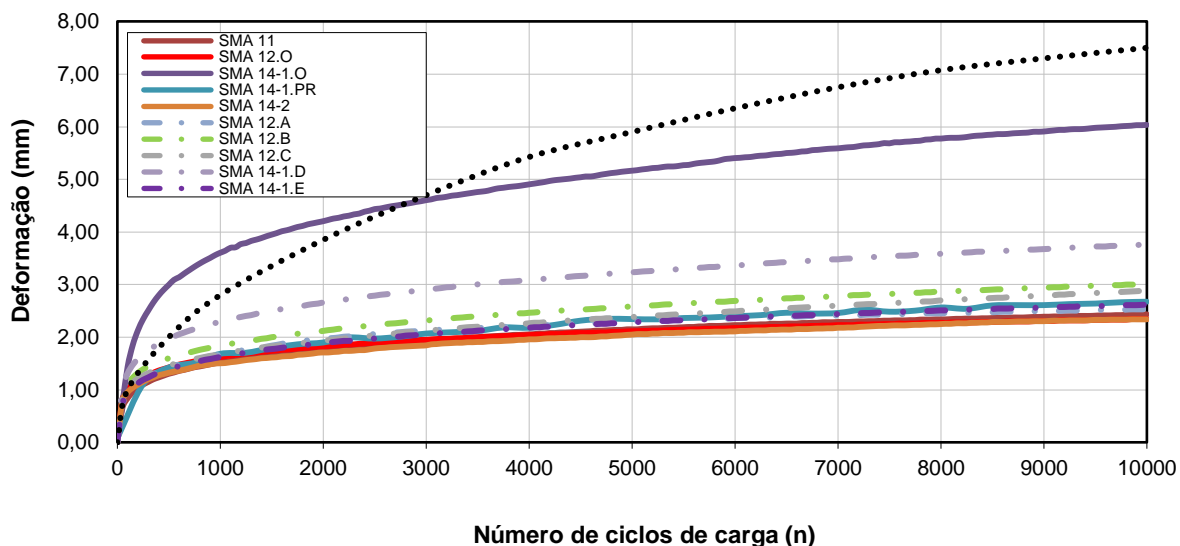


Figura 8.23 – Compilação global das curvas obtidas para a resistência à deformação permanente segundo a norma EN 12697-22

Segundo a análise do Quadro 8.23 e Figura 8.23 verifica-se que as nove misturas SMA avaliadas tendem a ter um comportamento à deformação permanente muito semelhante entre si, apresentando uma deformação máxima (profundidade de rodeira a 10000 ciclos), variável entre 2,3 mm e 3,0 mm, sendo a exceção a mistura SMA 14-1.D com um valor de 3,8 mm, em que se utilizou uma percentagem de betume de 7,0 % (0,5 % acima da percentagem ótima de betume) e a SMA 14-1.O com um valor 6,0 mm (a qual apresenta um porosidade reduzida, cerca de 1,5 %).

A resistência à deformação permanente é ainda reforçada pelos resultados obtidos relativamente à taxa de deformação, com os valores a variarem entre 0,05 e 0,10 mm/10³ ciclos, sendo a exceção apenas a SMA 14-1.O com um valor de 0,17 mm/10³ ciclos. No que concerne à percentagem de profundidade de rodeira a 10000 ciclos, verificou-se ainda que os valores variaram entre 4,3 % e 6,0 %, excetuando a SMA 14-1.O com um valor de 12,1 %. Como já referido anteriormente, um comportamento relativamente distinto da mistura SMA 14-1.O pode estar eventualmente relacionado com a utilização de um excesso de material no fabrico das lajetas, ou com a utilização de um fíler distinto, contribuindo assim para uma maior instabilidade estrutural da mistura SMA.

Apesar da menor resistência à deformação permanente apresentada pela mistura SMA 14-1.O relativamente às restantes misturas SMA avaliadas, verificou-se que a mesma, ainda assim, apresenta um melhor comportamento que o evidenciado pela mistura de controlo escolhida (AC 14 surf 35/50), que apresenta os seguintes resultados no que concerne à deformação máxima (cerca de 7,5 mm), taxa de deformação (0,35 mm/10³ ciclos) e percentagem de profundidade de rodeira (19,2 %).

Se comparados os resultados obtidos para as diversas misturas SMA relativamente à mistura de controlo constata-se que as misturas SMA têm uma elevada resistência à deformação permanente, apesar de utilizarem uma maior percentagem de betume comparativamente à mistura de controlo (5,0 %).

Do mesmo modo se analisados os resultados comparativamente ao que é recomendado no Quadro 4.4 para as propriedades das misturas SMA a utilizar em Portugal, conclui-se que todas as misturas SMA avaliadas asseguram os limites recomendados, sendo importante quando existente um maior conhecimento a nível nacional sobre as misturas SMA, tornar eventualmente mais restritivos os limites a utilizar para a deformação permanente.

Seguidamente são avaliados os resultados obtidos considerando a relação entre o volume das partículas ativas, partículas passivas, do fíler e do betume relativamente à resistência à deformação permanente (deformação máxima, taxa de deformação e percentagem de profundidade de rodeira a 10000 ciclos). Dados os diferentes resultados a analisar e com o intuito de sintetizar a análise apenas serão apresentados os resultados para os quais se observa uma correlação adequada. Porém, da análise realizada não parece existir uma relação linear entre os volumes utilizados dos diferentes constituintes das misturas SMA e a resistência à deformação permanente, pelo que também se considerou complementarmente o rácio entre a espessura da película de betume e a porosidade, que é posteriormente considerada na avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga e ao envelhecimento. A espessura da película de betume foi determinada segundo a metodologia proposta em ASTM (1992).

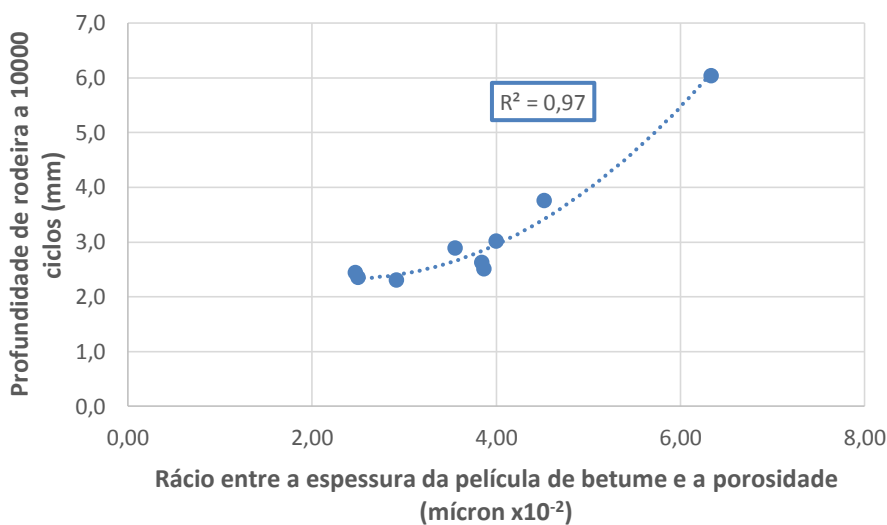


Figura 8.24 – Relação entre a profundidade de rodeira a 10000 ciclos (RD_{AIR}) e o rácio entre a espessura da película de betume e a porosidade

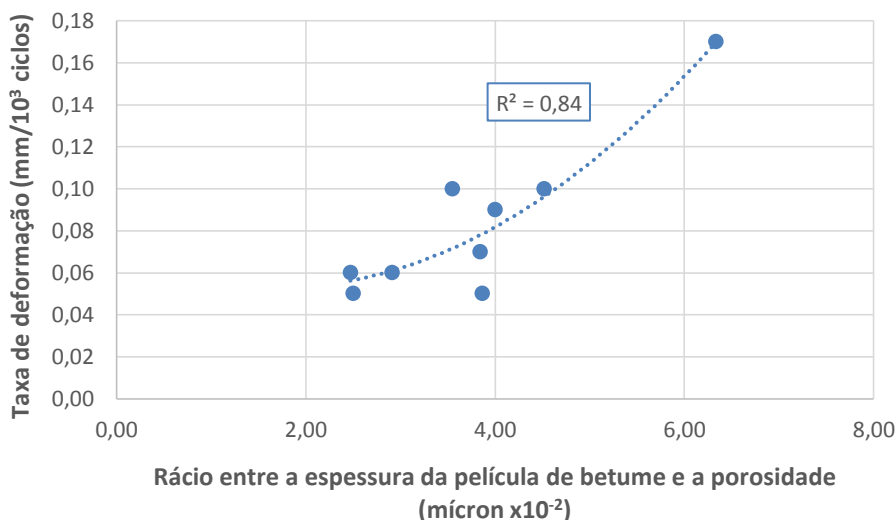


Figura 8.25 – Relação entre a taxa de deformação (WTS_{AIR}) e o rácio entre a espessura da película de betume e a porosidade

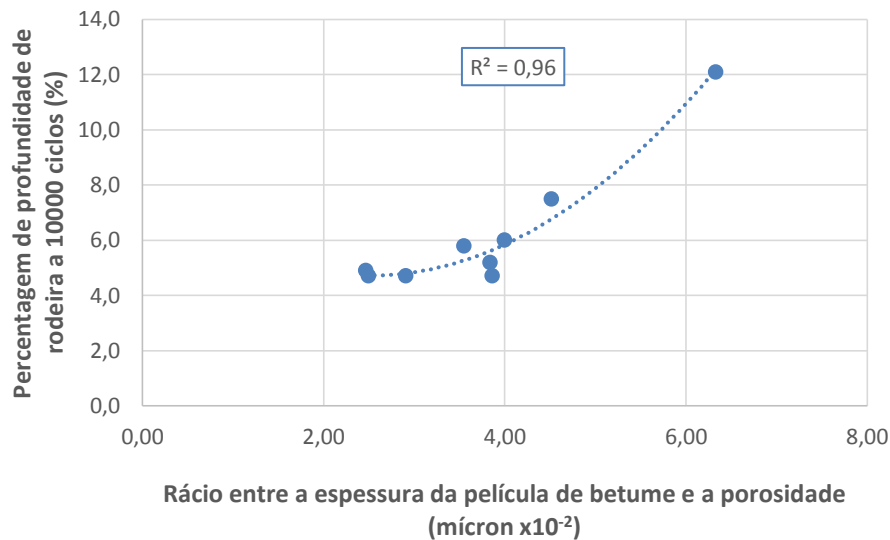


Figura 8.26 – Relação entre a percentagem de profundidade de rodeira a 10000 ciclos (PRD_{AIR}) e o rácio entre a espessura da película de betume e a porosidade

De acordo com a análise realizada na Figura 8.24 à Figura 8.26, observa-se que a deformação permanente através da RD_{AIR} , WTS_{AIR} e da PRD_{AIR} apresentou uma adequada correlação com valores entre 0,84 e 0,97. De acordo com os resultados a deformação permanente tende a aumentar para um aumento do rácio entre a espessura da película de betume e a porosidade. Particular atenção deve ser dada na utilização dos resultados para outros tipos de misturas betuminosas, uma vez que o volume de vazios apenas variou entre 1,5 % e 5,1 %.

— Avaliação do módulo de deformabilidade e resistência ao fendilhamento por fadiga e resistência ao envelhecimento —

No Quadro 8.24 apresenta-se uma análise global dos resultados dos ensaios para avaliação do módulo de deformabilidade e da resistência ao fendilhamento por fadiga das misturas SMA com e sem envelhecimento, aferidos com equipamentos de flexão em quatro pontos a extensão controlada de acordo com o procedimento preconizado nas normas EN 12697-24 e EN 12697-26, respetivamente.

Quadro 8.24 – Compilação global dos resultados da avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga e do módulo de deformabilidade segundo a norma EN 12697-24 e EN 12697-26

Identificação das misturas betuminosas	Proveniência da mistura	Resultados obtidos a 20 °C						
		Módulo de deformabilidade médio (MPa)					ε_6 ($\times 10^{-6}$ m/m)	Inclinação da lei de fadiga, p
		1 Hz	4 Hz	8 Hz	10 Hz	30 Hz		
SMA 11	Moldadas em laboratório	2067	3050	3673	3908	5140	273	-6,9
SMA 12.O		1534	2460	3017	3181	4273	337	-8,6
SMA 14-1.O		1643	2845	3559	3827	5173	525	-11,0
SMA 12.B		1375	2389	2971	3161	4437	400	-6,7
SMA 12.C		1493	2489	3030	3248	4509	425	-8,3
SMA 14-1.E		1766	2943	3564	3839	5270	459	-9,0
SMA 12.O	Recolhida do trecho experimental após 6 meses	2757	3801	4374	4571	5537	230	-5,6
Média		1805	2854	3455	3676	4906	378	-8,0
Desvio padrão (σ)		476	491	504	516	489	104	1,8
Coefficiente de variação (%)		26,4	17,2	14,6	14,0	10,0	27,6	22,3
SMA 12.O	Recolhida do trecho experimental após 4 anos	3886	4882	5314	5456	5901	157	-12,2
F.te.S14-1.O	Recolhida da TEXSA após 2 anos	1998	2773	3283	3542	4159	282	-4,9
SMA12.O	Envelhecida em laboratório 85 °C, 5 dias	5214	7074	8265	8592	10508	212	-5,7
F.e.S12.B		1846	2917	3570	3819	5193	410	-8,3
F.e.S12.C		3240	4782	5600	5938	7428	248	-6,2
F.e.S14-1.E		2222	3490	4244	4540	6082	432	-13,9
Média		3068	4320	5046	5315	6545	290	-8,5
Desvio padrão (σ)		1316	1623	1826	1851	2220	110	3,7
Coefficiente de variação (%)		42,9	37,6	36,2	34,8	33,9	37,8	43,5

Segundo o Quadro 8.24 observa-se que em média as diversas misturas SMA avaliadas sem envelhecimento apresentaram uma extensão de tração para um milhão de aplicações de carga (ε_6) de aproximadamente 378×10^{-6} (variável entre 230×10^{-6} e 525×10^{-6}), comparativamente a um valor médio de 290×10^{-6} (variável entre 157×10^{-6} e 432×10^{-6}) para as misturas SMA envelhecidas em laboratório e recolhidas de obra após dois e quatro anos.

No que concerne ao módulo de deformabilidade para uma frequência de 10 Hz foi obtido um valor médio para as diversas misturas SMA avaliadas sem envelhecimento de cerca de 3650 MPa (variável entre 3156 MPa e 4446 MPa), aumentando para aproximadamente 5300 MPa (variável entre 3542 MPa e 8592 MPa), no caso das misturas SMA envelhecidas em laboratório e recolhidas de obra após dois e quatro anos.

Relativamente ao andamento das leis de fadiga, verificou-se que nos ensaios efetuados a 10 Hz, a inclinação das leis de fadiga (p) das misturas SMA avaliadas sem envelhecimento foi em média -8,0 (variável entre -5,6 e -11,0), passando para um valor médio de -8,5 (variável entre -4,9 e -13,9) no caso das misturas SMA envelhecidas em laboratório e recolhidas de obra após dois e quatro anos.

Seguidamente são avaliados os resultados obtidos considerando a relação entre os volumes das partículas ativas, partículas passivas, do fíler e do betume relativamente à resistência ao fendilhamento por fadiga e ao envelhecimento (em termos do módulo de deformabilidade e da extensão de tração para um milhão de aplicações de carga). À semelhança do que foi constatado na avaliação à deformação permanente não foi evidente uma relação linear entre os resultados obtidos e os diferentes volumes utilizados dos constituintes das misturas SMA. Nesse sentido considerou-se a relação entre a extensão de tração e: o rácio entre a espessura da película de betume e a porosidade; a porosidade e; o módulo de deformabilidade.

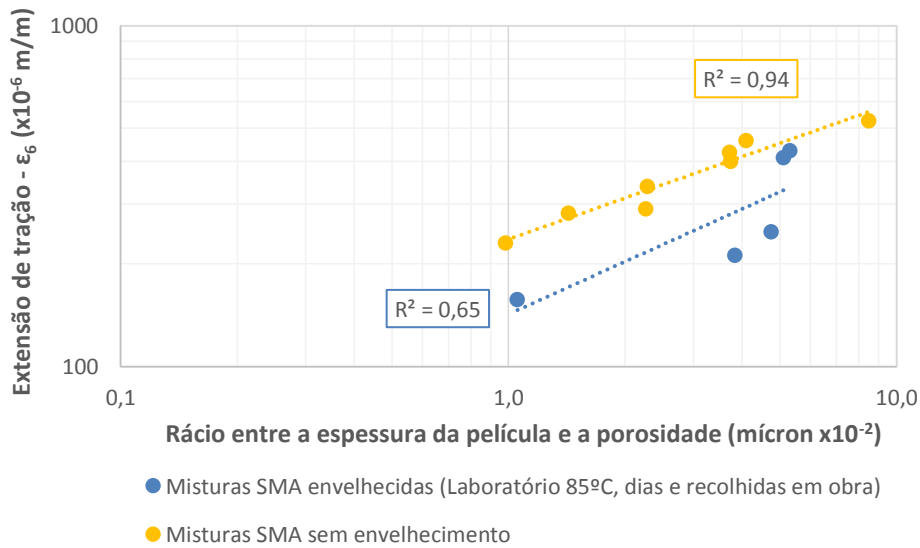


Figura 8.27 – Relação entre a extensão de tração (ϵ_6) e o rácio entre a espessura da película de betume e a porosidade

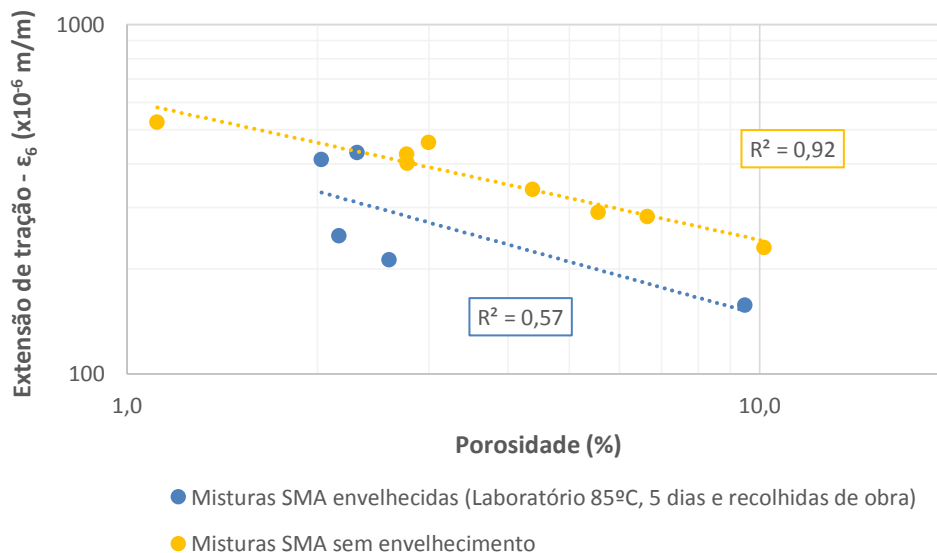


Figura 8.28 – Relação entre a extensão de tração (ϵ_6) e a porosidade

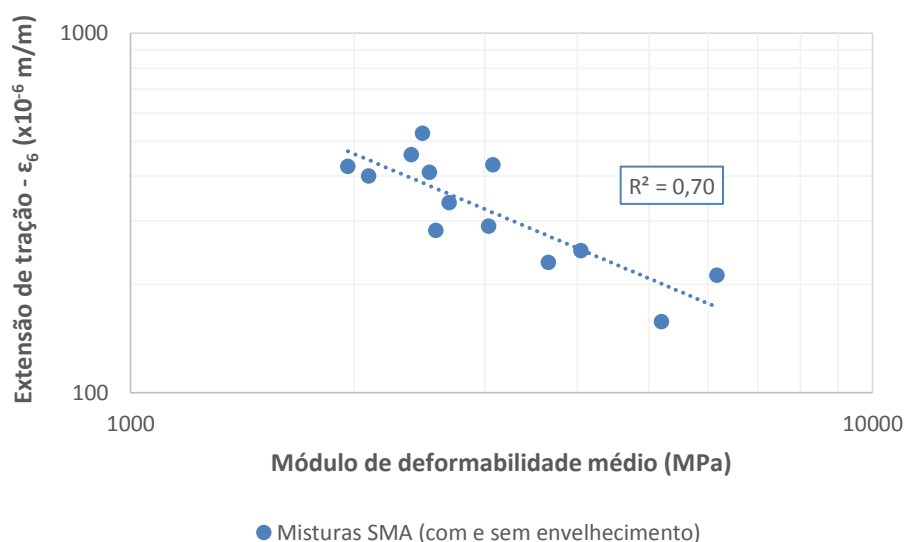


Figura 8.29 – Relação entre a extensão de tração (ϵ_6) e o módulo de deformabilidade médio

De acordo com a análise realizada na Figura 8.27 à Figura 8.29, observa-se que a vida à fadiga (com ou sem envelhecimento) expressa através da extensão de tração para um milhão de aplicações carga apresentou uma adequada correlação (valores entre 0,57 e 0,94) com: o rácio entre a espessura da película de betume e a porosidade; com a porosidade e ; com o módulo de deformabilidade médio das SMA.

A relação que melhor correlação apresentou corresponde ao rácio entre a espessura da película de betume e a porosidade, em que se observa para um aumento desse rácio, um aumento do valor obtido de extensão de tração para um milhão de aplicações de carga. Tais resultados demonstram que um aumento da percentagem de betume e/ou diminuição do volume de vazios corresponde um aumento da extensão de tração, o que no caso da deformação permanente avaliada anteriormente correspondia a uma diminuição da resistência à deformação permanente. Quando considerada a relação da porosidade de forma individual com a extensão de tração (ϵ_6) verifica-se na Figura 8.28, como espectável uma diminuição da extensão de tração para um aumento da porosidade das misturas SMA.

No que concerne às misturas SMA envelhecidas, os resultados obtidos na Figura 8.27 e na Figura 8.28, não são tão evidentes como consequência do limitado envelhecimento que ocorreu nas misturas SMA 12.B e SMA 14-1.E, ainda assim mantêm-se as tendências observadas para as misturas SMA sem envelhecimento.

Adicionalmente, observa-se na Figura 8.29 que o módulo de deformabilidade tende a apresentar uma adequada correlação com a extensão de tração, verificando-se como seria espectável uma diminuição da extensão de tração (ϵ_6) para um aumento do módulo de deformabilidade.

8.3.7 CONCLUSÕES

De acordo com o estudo realizado sobre o desempenho das misturas SMA apresentam-se as principais conclusões obtidas. No que concerne à avaliação do escorrimento de material betuminoso:

- confirma-se o que foi concluído nos pontos 7.3.3 e 8.2.4 relativamente à adequabilidade da equação (5.2) para estimar a percentagem mínima de fibras celulósicas a adotar em função da percentagem de betume.

A avaliação da sensibilidade à água das misturas SMA com fibras celulósicas permitiu obter as seguintes conclusões principais:

- as diversas misturas SMA avaliadas tendem a apresentar um valor de *ITSR* a 15 °C compreendido entre 86 e 93 %, podendo existir casos onde esse valor foi superior a 100 %, o que de acordo com os resultados obtidos parece ser resultado da utilização de um mastique betuminoso com uma percentagem mais elevada de partículas passivas;
- semelhante conclusão foi obtida quando se aumenta a percentagem de partículas ativas, a qual tende a promover um aumento da sensibilidade à água, mesmo para porosidades dos provetes reduzidas e elevadas percentagens de betume, corroborando o que tinha sido concluído por Cooley & Brown (2003) (ver ponto 3.2.4) onde um aumento do peneiro de referência promove um aumento da permeabilidade da SMA;
- a utilização de uma elevada percentagem de betume em conjunto com a utilização de uma temperatura de ensaio de 60 °C, tende a promover uma diminuição da influência do betume na sensibilidade à água através do *ITSR* relativamente ao IRC, tornando a sensibilidade à água da SMA mais dependente da composição volumétrica (partículas ativas e passivas) à semelhança do que foi obtido no ponto 6.7. Esta conclusão parece evidenciar por um lado a importância de se considerar a permeabilidade na avaliação da sensibilidade à água, mais do que a avaliação da resistência conservada em tração indireta, e por outro lado a necessidade de se utilizar uma maior percentagem de partículas passivas em camadas com SMA inferiores à camada de desgaste, com o intuito de maximizar a resistência ao corte e onde as características superficiais não são requeridas.

Relativamente à avaliação da resistência à deformação permanente a 60 °C das misturas SMA com fibras celulósicas, foi possível obter as seguintes conclusões principais:

- as nove misturas SMA avaliadas tendem a apresentar um comportamento à deformação permanente muito semelhante entre si, evidenciando um efeito de *stone-on-stone* adequado. A deformação máxima observada (profundidade de rodeira a 10000 ciclos), foi variável entre 2,3 mm e 3,0 mm, sendo exceção a mistura SMA 14-1.D com um valor de 3,8 mm, em que se utilizou uma percentagem de betume de 7,0 % (0,5 % acima da percentagem ótima) e a SMA 14-1.O com um valor 6,0 mm (a qual apresenta uma porosidade reduzida cerca de 1,5 %). A resistência à deformação permanente é ainda reforçada pelos resultados obtidos relativamente à taxa de deformação, os valores variam entre 0,05 e 0,10 mm/10³ ciclos, sendo a exceção apenas a SMA 14-1.O com um valor de 0,17 mm/10³ ciclos. No que concerne à percentagem de profundidade de rodeira a 10000 ciclos, verificou-se ainda que os valores variam entre 4,3 % e 6,0 %, excetuando a SMA 14-1.O com um valor de 12,1 %;

- as diversas misturas SMA apresentaram uma elevada resistência à deformação permanente relativamente à mistura de controlo (AC 14), apesar de adotarem uma maior percentagem de betume comparativamente à mistura de controlo (5,0 %). O aumento da resistência à deformação permanente, traduzida por uma redução da deformação máxima registada, corresponde entre cerca de 50 % a 70 % comparativamente à mistura de controlo (AC 14). O intervalo obtido foi superior ao indicado por CDOT (2004), Lord (2004) e Austroads (2009) como comum uma redução entre 33 % e 50 %;
- não foi constatada uma relação linear entre os diferentes volumes dos materiais constituintes das misturas SMA e a resistência à deformação permanente, à exceção do rácio entre a espessura da película de betume e a porosidade.

Relativamente à avaliação do módulo de deformabilidade e resistência ao fendilhamento por fadiga e ao envelhecimento das misturas SMA com fibras celulósicas (ensaios realizados a 20 °C), foram obtidas as seguintes conclusões principais:

- em média as diversas misturas SMA avaliadas sem envelhecimento apresentaram uma extensão de tração para um milhão de aplicações de carga (ϵ_6) de aproximadamente 378×10^{-6} (variável entre 230×10^{-6} e 525×10^{-6}), comparativamente a um valor médio de 290×10^{-6} (variável entre 157×10^{-6} e 432×10^{-6}) para as misturas SMA envelhecidas em laboratório e recolhidas de obra após dois e quatro anos; A vida à fadiga das misturas SMA foi manifestamente superior (entre três e doze vezes) ao obtido para a mistura de controlo em que o ϵ_6 corresponde a cerca de 200×10^{-6} . Segundo (Stephenson & Bullen, 2001) a vida à fadiga é cerca de sete vezes superior comparativamente a uma mistura convencional;
- o módulo de deformabilidade para uma frequência de 10 Hz tende a apresentar um valor médio para as diversas misturas SMA avaliadas sem envelhecimento de aproximadamente 3650 MPa (variável entre 3156 MPa e 4446 MPa), aumentando para aproximadamente 5300 MPa (variável entre 3542 MPa e 8592 MPa), no caso das misturas SMA envelhecidas em laboratório e recolhidas de obra após dois e quatro anos;
- relativamente ao andamento das leis de fadiga, conclui-se que nos ensaios efetuados a 10 Hz, a inclinação das leis de fadiga (p) das misturas SMA avaliadas sem envelhecimento foi em média -8,0 (variável entre -5,6 e -11,0), passando para um valor médio de -8,5 (variável entre -4,9 e -13,9) no caso das misturas SMA envelhecidas em laboratório e recolhidas de obra após dois e quatro anos;
- não foi constatada não foi constada uma relação linear entre os diferentes volumes dos materiais constituintes das misturas SMA e o módulo de deformabilidade, ou a resistência ao fendilhamento por fadiga, à exceção do rácio entre a espessura da película de betume e a porosidade, à semelhança do que sucedeu para a resistência à deformação permanente.

8.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO FUNCIONAL PARA DESENVOLVIMENTO DO CONCEITO DE MASTIC-WITHIN-STONE (TIRE-ON-STONE)

O conceito de *mastic-within-stone* pretende, em simultâneo, a otimização do desempenho mecânico (*mix-skeleton*) e funcional (*tire-on-stone*), assim como da trabalhabilidade aquando da definição da composição ótima da SMA. No presente caso (*tire-on-stone*) este pode ser condicionado, nomeadamente, por dois factores principais:

- a utilização de um mastique betuminoso com uma elevada percentagem de betume, o qual é potenciado pela utilização de aditivos que mitigam o escorrimento de material betuminoso, que promovem, simultaneamente, um aumento da espessura da película de betume que envolve os agregados;
- a comum aplicação de betumes modificados que por sua vez, promovem uma melhoria significativa na adesividade entre o betume e os agregados.

A resistência à derrapagem a curto prazo é inicialmente condicionada pela superfície da mistura de betume, fíler e aditivos, a qual com a abrasão promovida pelos rodados dos veículos expõe as partículas ativas e passivas, responsáveis pela resistência à derrapagem a médio e longo prazo (Nicholls, 1998, Bastow *et al.*, 2005 e Woodward *et al.*, 2005).

Assim, se os factores inicialmente mencionados podem contribuir para uma melhoria do desempenho mecânico das misturas SMA, os mesmos também contribuem para que a película de betume que envolve os agregados se mantenha durante mais tempo até à completa remoção por ação dos rodados dos veículos, prejudicando a resistência à derrapagem. Situação que pode ainda ser agravada quando os materiais utilizados não são os mais adequados ao tipo e volume de tráfego a que a SMA irá estar sujeita, dificultando desse modo a exposição dos agregados através da remoção da película de betume. No Quadro 3.15 mostra-se como exemplo uma proposta de utilização de betumes convencionais para estradas com menor volume de tráfego, com o objetivo de mitigar a situação anteriormente apresentada.

Adicionalmente, a resistência à derrapagem pode ainda ser condicionada pela utilização excessiva de betume e/ou de fíler, que pode contribuir para um excesso de mastique betuminoso, o qual contribui para uma diminuição da profundidade média da textura da superfície das misturas SMA. A diminuição da profundidade da textura apresenta como efeitos negativos:

- o aumento da probabilidade de ocorrência de hidroplanagem;
- um aumento da projeção de água decorrente da passagem de veículos aquando e após a ocorrência de precipitação;
- a propensão para um aumento da geração de ruído decorrente da interação entre o pneu e o pavimento. Este último aspeto, apesar de não ter sido estudado no presente trabalho reveste-se de particular importância, considerando o Decreto-Lei nº 9/2007 de 17 de janeiro, que aprova o novo Regulamento Geral de Ruído (RGR) e o Decreto-Lei nº 146/2006 de 31 de julho, que transpõe a Diretiva nº 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de junho, relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente.

Assim torna-se fundamental garantir uma adequada composição volumétrica dos diferentes constituintes da SMA, a qual não se pode basear apenas na obtenção de um efeito de *stone-on-stone*,

mas também de um efeito de *mastic-within-stone* que permita contribuir para otimizar o efeito de *tire-on-stone* (volume de mastique betuminoso adequado) e não de *tire-on-mastic*.

O conceito de *tire-on-stone* que se propõe e que se pretende desenvolver no presente trabalho tem como intuito contribuir para a obtenção de uma profundidade média da textura e coeficiente de atrito inicial otimizados nas misturas SMA, sem que a mesma seja condicionada pela exclusiva necessidade de se otimizar o desempenho mecânico (*mix-skeleton*), incorporando o efeito de *stone-on-stone*. Deste modo, o conceito de *tire-on-stone* pretende contribuir para que o presente método de formulação que se pretende propor, possa incorporar na sua essência também um requerimento no que concerne à resistência à derrapagem a curto e médio prazo e profundidade média da textura, o qual se repercutirá na definição da composição da mistura SMA, nomeadamente no que concerne à definição do volume de partículas passivas, de fíler, de aditivos e de betume a utilizar, dado que o volume de partículas ativas já é inicialmente otimizado através da avaliação do efeito de *stone-on-stone*, segundo a metodologia proposta no capítulo 7.

O conceito anteriormente proposto é tanto mais importante, quando se verifica que o método de formulação proposto no presente trabalho contribui para a utilização de misturas SMA com uma maior percentagem de betume.

A avaliação do desempenho funcional foi realizada para as misturas SMA segundo dois métodos de ensaio distintos, através do pêndulo britânico que avalia o coeficiente de atrito segundo a norma EN 13036-4, essencialmente relacionado com a microtextura, e de forma indireta através do método volumétrico da mancha que avalia a macrotextura traduzida pela profundidade média da textura da superfície dos provetes segundo norma EN 13036-1.

Adicionalmente, foram realizadas campanhas para avaliação das características superficiais da camada de desgaste em SMA 12 (SMA 12.O). Para realização dos ensaios de campo dado o elevado tráfego e interseções existentes na Avenida, foi definida uma seção teste. A seção teste inseriu-se na via direita (via mais solicitada pelo tráfego pesado) numa extensão de 300 metros com início junto ao cruzamento da Avenida do Brasil com a Avenida Rio de Janeiro, no sentido da Praça do Aeroporto – Campo Grande, como se apresenta na Figura 8.30 (seção representada a verde).



Figura 8.30 – Localização da seção teste da Avenida do Brasil

A avaliação foi efetuada considerando, nomeadamente, a avaliação do coeficiente de atrito através do *Grip-tester* e do pêndulo britânico e, a profundidade média da textura da superfície da camada de desgaste através da leitura do índice de irregularidade longitudinal com laser (profundidade média de textura estimada - *ETD*) e do ensaio volumétrico da mancha.

A realização dos ensaios de campo em segurança foram apenas possíveis devido ao apoio policial disponibilizado pela Câmara Municipal de Lisboa.

No Quadro 8.25 apresentam-se as misturas SMA utilizadas para avaliar o desempenho funcional segundo o método de ensaio proposto.

Quadro 8.25 – Misturas SMA utilizadas para avaliação do desempenho funcional

Tipo de misturas SMA	Avaliação realizada					
	Avaliação em laboratório		Avaliação em obra			
	Pêndulo britânico	Método volumétrico da mancha	<i>Grip-tester</i>	IRI	Pêndulo britânico	Método volumétrico da mancha
SMA 11	■	■				
SMA 12.O	■	■	■	■	■	■
SMA 14-1.O	■	■				
SMA 12.A	■	■				
SMA 12.B	■	■				
SMA 12.C	■	■				
SMA 14-1.D	■	■				
SMA 14-1.E	■	■				

8.4.1 AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO

— Amostras estudadas —

Nos ensaios de avaliação do coeficiente de atrito inicial e da profundidade média da textura, segundo o ensaio do pêndulo britânico e do método volumétrico da mancha, respetivamente, os provetes a ensaiar, consistiram nas lajetas individuais, que foram fabricadas e compactadas em laboratório através do *roller compactor*, para avaliação da resistência à deformação permanente das misturas SMA.

Para os ensaios mencionados, as lajetas foram utilizadas previamente à avaliação da deformação permanente, realizando-se primeiro os ensaios relativos ao método volumétrico da mancha, a que se seguiram os ensaios com o pêndulo britânico. Entre cada tipo de ensaio procedeu-se à devida limpeza das lajetas com jato de ar até assegurada a completa remoção das esferas de vidro utilizadas no ensaio volumétrico da mancha. Posteriormente procedeu-se ainda à remoção da película de betume que envolve os agregados à superfície através da utilização de um equipamento de jato de areia como se apresenta na Figura 8.31 e onde se pode observar o aspeto final das lajetas (Figura 8.32). No Anexo V é possível ver o aspeto final das lajetas para as diferentes misturas SMA avaliadas.



Figura 8.31 – Equipamento de jato de areia utilizado para remover a película de betume que envolve os agregados na superfície das lajetas

A remoção da película de betume que envolve os agregados na superfície das lajetas tem como intuito permitir, posteriormente, a avaliação da resistência à derrapagem após remoção da película de betume por ação dos rodados dos veículos, simulando-se desta forma as condições de atrito que se irão obter em serviço (Figura 8.32).

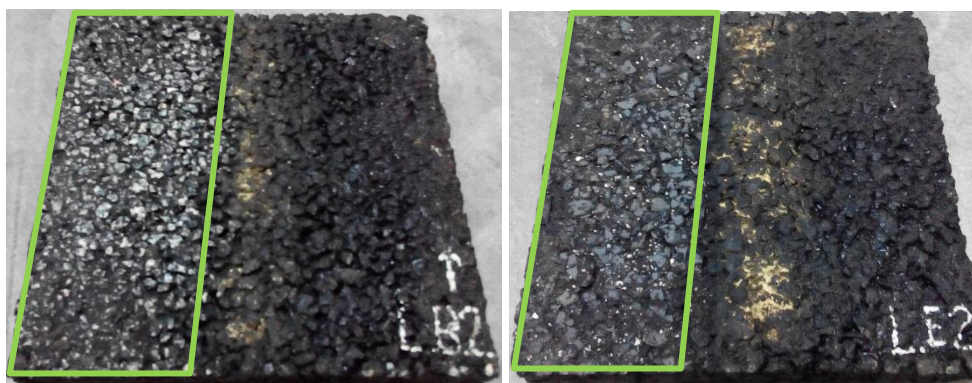
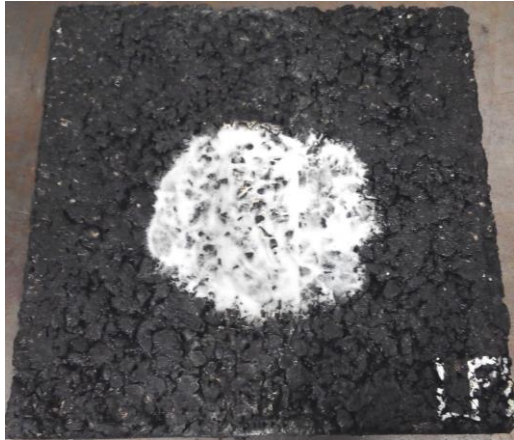





Figura 8.32 – Aspeto final das lajetas após remoção da película de betume que envolve os agregados na superfície das lajetas


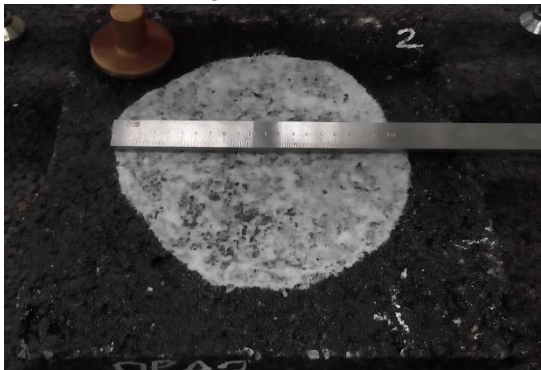
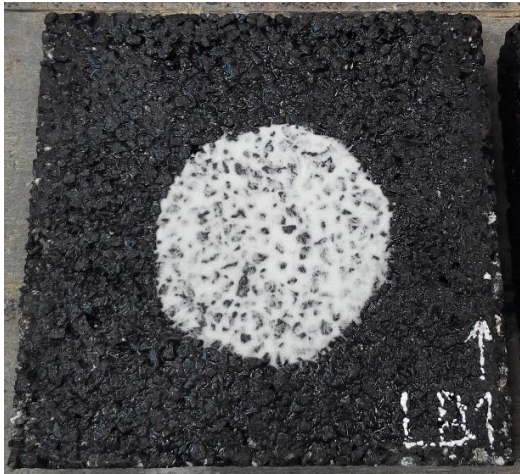
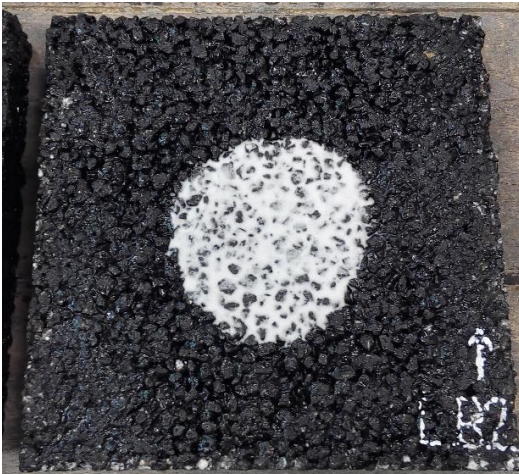
— Apresentação e análise de resultados —

Do Quadro 8.26 ao Quadro 8.29 são apresentados os principais resultados obtidos na avaliação do coeficiente de atrito (sem remoção da película de betume e após a remoção da película de betume) e profundidade média da textura avaliada em laboratório, assim como as respectivas características volumétricas.

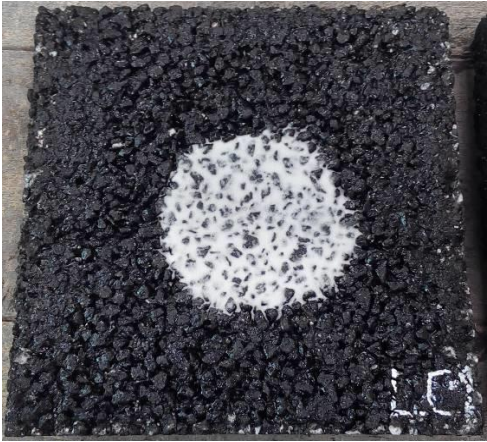
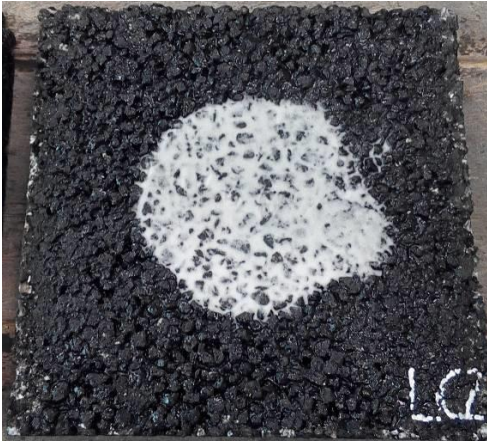


Quadro 8.26 – Resultados do coeficiente de atrito inicial e da profundidade média da textura avaliada em laboratório (SMA 11 e SMA 12.O)

Mistura betuminosa			
SMA 11-L1		SMA 11-L2	
			
Percentagem de betume (%)	5,8	Percentagem de betume (%)	5,8
Porosidade (%)	5,4	Porosidade (%)	4,8
Coeficiente de atrito inicial (média)			64
Coeficiente de atrito após remoção da película de betume (média)			62
Profundidade média da textura (média - mm)			1,14
Mistura betuminosa			
SMA 12.O-L1		SMA 12.O-L2	
			
Percentagem de betume (%)	5,5	Percentagem de betume (%)	5,5
Porosidade (%)	4,0	Porosidade (%)	3,9
Coeficiente de atrito inicial (média)			61
Coeficiente de atrito após remoção da película de betume (média)			57
Profundidade média da textura (média - mm)			0,34




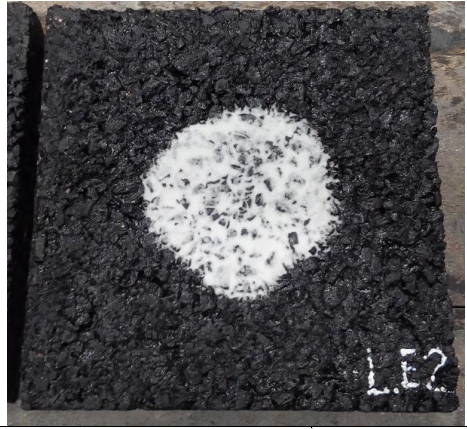
Quadro 8.27 – Resultados do coeficiente de atrito inicial e da profundidade média da textura avaliada em laboratório (SMA 12.A e SMA 12.B)

Mistura betuminosa			
SMA 12.A-L1		SMA 12.A-L2	
			
Percentagem de betume (%)	5,5	Percentagem de betume (%)	5,5
Porosidade (%)	2,3	Porosidade (%)	2,1
Coeficiente de atrito inicial (média)			68
Coeficiente de atrito após remoção da película de betume (média)			62
Profundidade média da textura (média - mm)			0,75
Mistura betuminosa			
SMA 12.B-L1		SMA 12.B-L2	
			
Percentagem de betume (%)	6,5	Percentagem de betume (%)	6,5
Porosidade (%)	2,3	Porosidade (%)	2,9
Coeficiente de atrito inicial (média)			63
Coeficiente de atrito após remoção da película de betume (média)			68
Profundidade média da textura (média - mm)			1,57

Quadro 8.28 – Resultados do coeficiente de atrito inicial e da profundidade média da textura avaliada em laboratório (SMA 12.C e SMA 14-1.O)

Mistura betuminosa			
SMA 12.C-L1		SMA 12.C-L2	
			
Percentagem de betume (%)	6,5	Percentagem de betume (%)	6,5
Porosidade (%)	3,3	Porosidade (%)	2,4
Coeficiente de atrito inicial (média)			62
Coeficiente de atrito após remoção da película de betume (média)			62
Profundidade média da textura (média - mm)			1,49
Mistura betuminosa			
SMA 14-1.O-L1		SMA 14-1.O-L2	
			
Percentagem de betume (%)	6,0	Percentagem de betume (%)	6,0
Porosidade (%)	1,4	Porosidade (%)	1,6
Coeficiente de atrito inicial (média)			67
Coeficiente de atrito após remoção da película de betume (média)			67
Profundidade média da textura (média - mm)			1,87

Quadro 8.29 – Resultados do coeficiente de atrito inicial e da profundidade média da textura avaliada em laboratório (SMA 14-1.D e SMA 14-1.E)

Mistura betuminosa			
SMA 14-1.D-L1		SMA 14-1.D-L2	
			
Percentagem de betume (%)	7,0	Percentagem de betume (%)	7,0
Porosidade (%)	2,6	Porosidade (%)	2,4
Coeficiente de atrito inicial (média)			66
Coeficiente de atrito após remoção da película de betume (média)			57
Profundidade média da textura (média - mm)			1,58
Mistura betuminosa			
SMA 14-1.E-L1		SMA 14-1.E-L2	
			
Percentagem de betume (%)	6,5	Percentagem de betume (%)	6,5
Porosidade (%)	3,3	Porosidade (%)	3,1
Coeficiente de atrito inicial (média)			64
Coeficiente de atrito após remoção da película de betume (média)			67
Profundidade média da textura (média - mm)			1,34

De acordo com o Quadro 8.26 ao Quadro 8.29, é bastante perceptível no aspeto das lajetas avaliadas, observar-se um aumento da profundidade média da textura com um aumento da percentagem de partículas ativas utilizada.

Segundo a análise os métodos de compactação que maior profundidade média da textura produziram, correspondem ao método Proctor e ao *roller compactor* com valores entre 1,34 e 1,57 mm. Observa-se ainda que a mistura SMA 11 apresentou uma profundidade média de textura de 1,14 mm, constatando-se igualmente no ponto 7.3 que esta mistura apresenta uma composição passível de ser formulada utilizando o método de compactação pesada com o Proctor. Do mesmo modo verificou-se que a mistura SMA que teoricamente apresenta a maior profundidade média da textura corresponde à SMA 14-1.O com um valor de 1,87 mm. Todavia a profundidade obtida não resultou de uma adequada macrotextura da mistura betuminosa, mas sim de um excesso de betume à superfície da lajeta, o qual decorrente da remoção das folhas para compactação criou uma macrotextura artificial, impossibilitando o adequado espalhamento das esferas de vidro. Semelhante situação ocorreu com a mistura SMA 14-1.D, porém em menor extensão comparativamente à mistura SMA 14-1.O.

As misturas SMA 12.A e SMA 12.O correspondem às misturas SMA que menor profundidade média da textura apresentaram, com um valor de 0,75 mm e 0,34 mm, respetivamente. Os resultados parecem demonstrar que a obtenção exclusiva de um efeito de *stone-on-stone* não garante a obtenção uma adequada macrotextura traduzida por uma elevada profundidade média da textura.

No que concerne ao coeficiente de atrito inicial (sem remoção da película de betume), do Quadro 8.26 ao Quadro 8.29, como seria exetável verificou-se uma tendência para um aumento do coeficiente de atrito para um aumento da profundidade média da textura, como se representa na Figura 8.33.

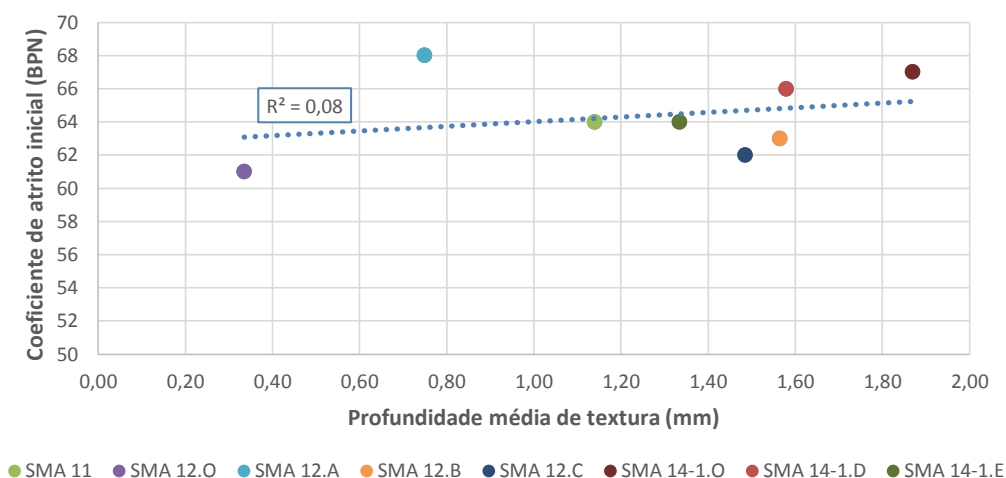


Figura 8.33 – Relação entre a profundidade média da textura e o coeficiente de atrito inicial (sem remoção da película de betume)

Segundo os resultados obtidos (Figura 8.33) as misturas SMA que maior profundidade média da textura apresentaram correspondem às que maior coeficiente de atrito apresentam, a única mistura SMA, em que tal não foi tão evidente corresponde à mistura SMA 12.A. Todas as misturas SMA apresentaram um coeficiente de atrito inicial superior a 60.

Quando efetuada a mesma análise para o coeficiente de atrito intermédio (após remoção da película de betume), do Quadro 8.26 ao Quadro 8.29, torna-se mais evidente uma tendência para um aumento

do coeficiente de atrito para um aumento da profundidade média da textura, como se representa na Figura 8.34.

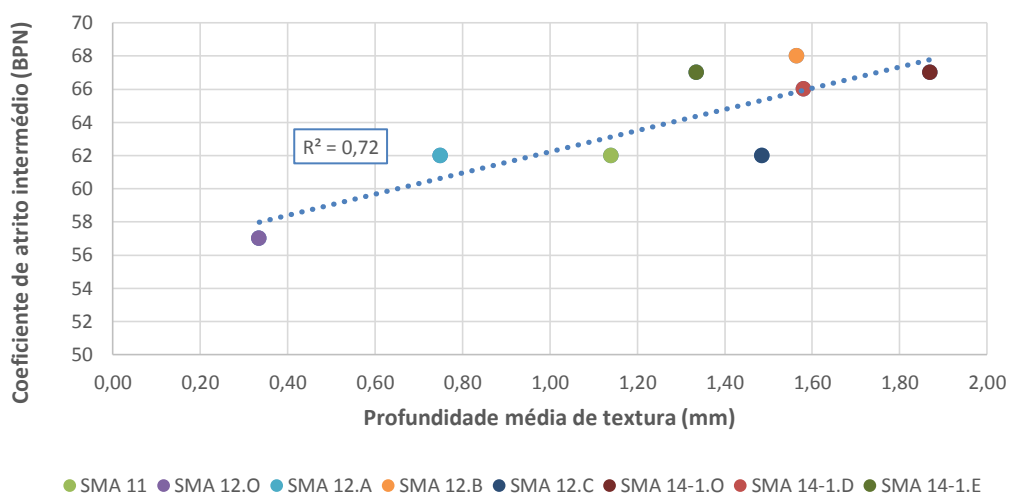


Figura 8.34 – Relação entre a profundidade média da textura e o coeficiente de atrito intermédio (após remoção da película de betume)

De acordo com a Figura 8.34 torna-se mais evidente uma tendência após exposição dos agregados (remoção da película de betume que envolve os agregados à superfície) das misturas SMA que maior profundidade média da textura apresentaram corresponderem às que maior coeficiente de atrito apresentam. As misturas SMA que apresentaram um coeficiente de atrito intermédio superior a 60 correspondem pela seguinte ordem à mistura SMA 12.B (68), SMA 14-1.O e SMA 14-1.E (67), SMA 14-1.D (66), SMA 11, SMA 12.A e SMA 12.C (62). A única mistura SMA que apresentou um coeficiente de atrito intermédio inferior a 60 corresponde à mistura SMA 12.O com um valor de 57.

Adicionalmente apresenta-se na Figura 8.35 uma análise comparativa do coeficiente de atrito inicial e intermédio (após remoção da película de betume).

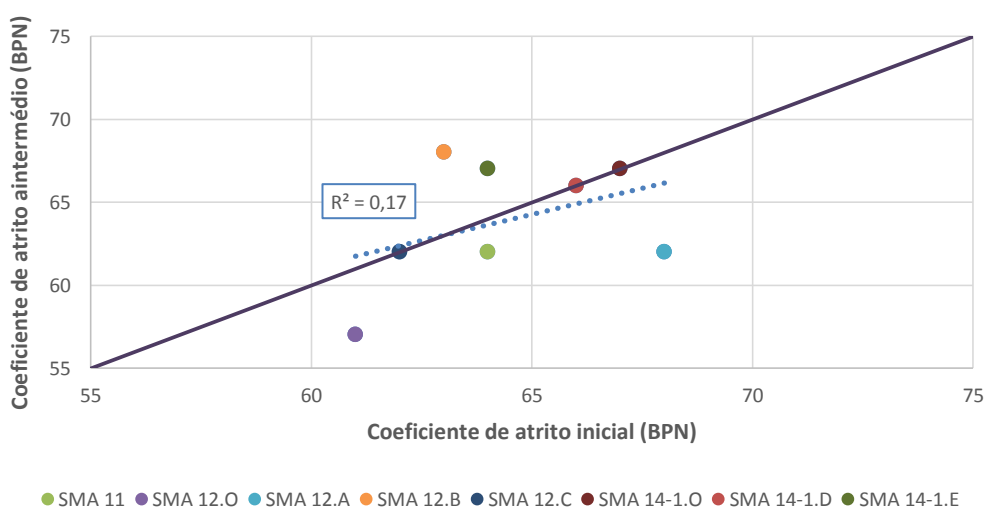


Figura 8.35 – Relação entre o coeficiente de atrito inicial e intermédio

Na Figura 8.35 é possível observar apesar de se observar uma tendência para um aumento do coeficiente de atrito com a remoção da película de betume que envolve a superfície dos agregados (SMA 12.B, SMA 14-1.E), outros casos existem em que o coeficiente de atrito se mantém inalterável (SMA 12.C, SMA 14-1.O e SMA 14-1.D), e outros casos em que se observa uma diminuição do coeficiente de atrito (SMA 12.O, SMA 11 e SMA 12.A).

8.4.2 AVALIAÇÃO EM OBRA

— Seção teste na Avenida do Brasil —

A avaliação do coeficiente de atrito, na seção teste da Avenida do Brasil, foi efetuada nas campanhas de ensaios realizados em Março de 2011 e Abril de 2012, tendo-se nas campanhas de Abril de 2012 e Julho de 2013 realizado a avaliação da profundidade média da textura. No âmbito das campanhas de monitorização avaliou-se ainda o índice de irregularidade longitudinal (IRI), e a profundidade média da textura estimada (ETD) através de laser em Setembro de 2013.

No que concerne aos ensaios de avaliação do coeficiente de atrito foram realizados utilizando um equipamento do tipo *Grip-tester* pertencente ao LNEC, tendo a profundidade média da textura sido avaliada segundo o ensaio volumétrico da mancha. No que concerne à avaliação do *IRI* e da *ETD* a mesma foi conduzida com equipamento gentilmente cedido pelo Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico.

Adicionalmente, foram ainda executados ensaios no trecho experimental durante o ano de 2013 para avaliação do coeficiente de atrito e da profundidade média da textura, através do pêndulo britânico e do ensaio volumétrico da mancha, respetivamente.

No Quadro 8.30 são sintetizados os ensaios realizados na seção teste da Avenida do Brasil e no trecho experimental no LNEC, no âmbito da avaliação do coeficiente de atrito, do *IRI* e *ETD* e da profundidade média da textura em função da data de ensaio.

Quadro 8.30 – Ensaios realizados em obra na quarta fase do estudo experimental e respetiva data de ensaio

Data de ensaio	Avaliação realizada					
	Seção teste da Avenida do Brasil				Trecho experimental	
	<i>Grip-tester</i>	<i>IRI</i> / <i>ETD</i>	Pêndulo britânico	Método volumétrico da mancha	Pêndulo britânico	Método volumétrico da mancha
Março - 2011	■					
Abril - 2012	■			■		
Julho - 2013				■		
Setembro - 2013		■			■	■
Novembro - 2013					■	■
Dezembro - 2013					■	■

— Apresentação e análise de resultados (coeficiente de atrito) —

Na Figura 8.36 é apresentada a evolução do coeficiente de atrito na seção teste da Avenida do Brasil, sendo na Figura 8.37 sintetizados os resultados obtidos por campanha na avaliação do coeficiente de atrito através do *Grip-tester*.

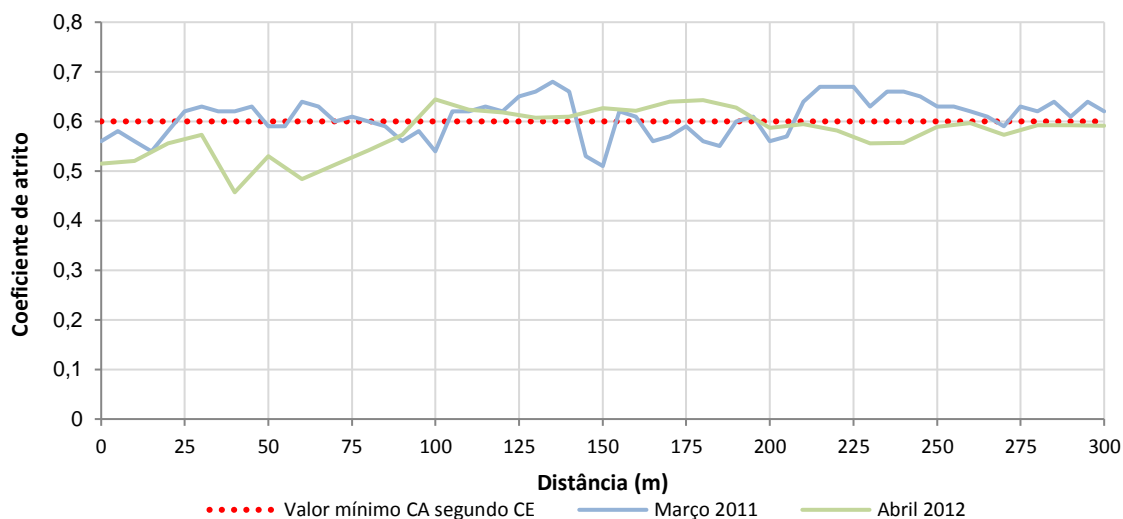


Figura 8.36 – Coeficiente de atrito na seção teste da Avenida do Brasil (ano de 2011, 2012)

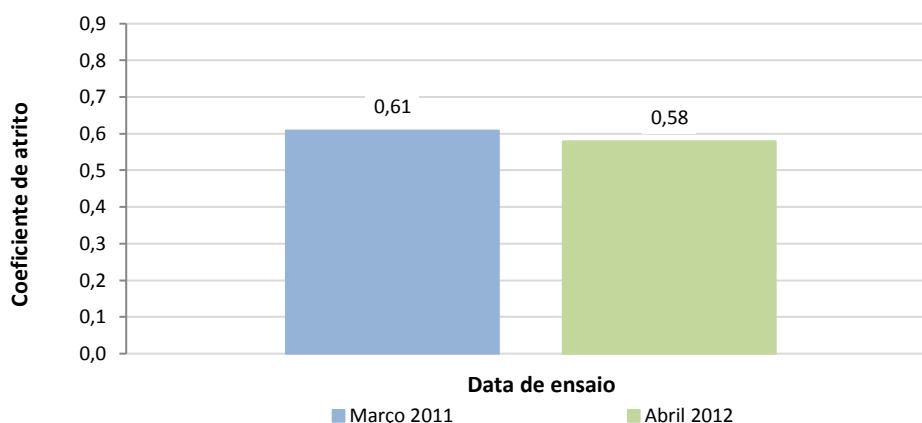


Figura 8.37 – Valores médios para o coeficiente de atrito na seção teste da Avenida do Brasil (ano de 2011, 2012)

De acordo com a Figura 8.36 e Figura 8.37 observa-se de uma forma geral uma reduzida variação do coeficiente de atrito, não sendo observada uma melhoria decorrente do processo de remoção da película de betume que envolve os agregados por ação de abrasão no contacto dos rodados dos veículos com a superfície da camada betuminosa.

— Apresentação e análise de resultados (profundidade média da textura) —

Na Figura 8.38 são apresentados os resultados da profundidade média da textura na seção teste da Avenida do Brasil realizados em Abril de 2012 e Julho de 2013. A avaliação da profundidade média da textura foi realizada a cada 25 metros durante os 300 metros da seção teste da Avenida do Brasil.

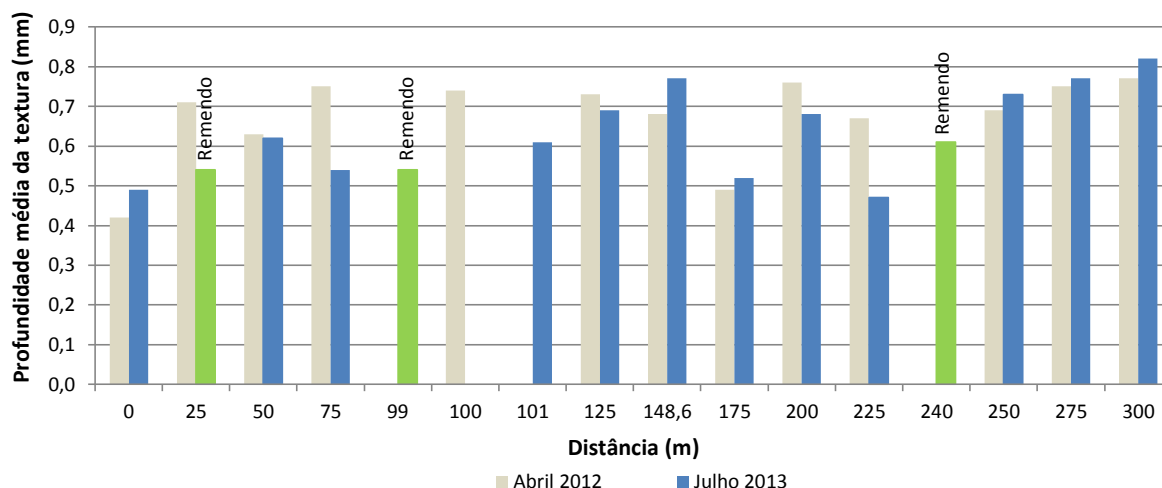


Figura 8.38 – Profundidade média da textura na seção teste da Avenida do Brasil (ano de 2012 e 2013)

Segundo a Figura 8.38 não se observa uma tendência clara na variação da profundidade média da textura, observando de uma forma geral igual número de pontos com aumento e diminuição da profundidade medida da textura. De igual modo, observa-se que os remendos aplicados no pavimento tendem a apresentar uma profundidade média da textura inferior à observada para a mistura SMA.

Adicionalmente, no Quadro 8.31 são sintetizados os resultados obtidos na avaliação da profundidade média da textura, os quais se comparam com os resultados do coeficiente de atrito avaliados nos mesmos dias, sendo a representação gráfica efetuada na Figura 8.39.

Quadro 8.31 – Análise comparativa da profundidade média da textura com o coeficiente de atrito obtidos na seção teste da Avenida do Brasil (ano de 2012)

Distância percorrida na seção teste (m)	Data de ensaio e tipo de avaliação		
	2012		
	Temperatura média do ar (°C)	Coeficiente de atrito	Profundidade média da textura (mm)
0	13,0	0,52	0,42
25		0,56	0,71
50		0,53	0,63
75		0,53	0,75
99		0,64	-
100		0,64	0,74
101		0,64	-
125		0,61	0,73
148,6		0,63	0,68
175		0,64	0,49
200		0,59	0,76
225		0,57	0,67
240		0,56	-
250		0,59	0,69
275		0,58	0,75
300		0,59	0,77
Média		0,59	0,68

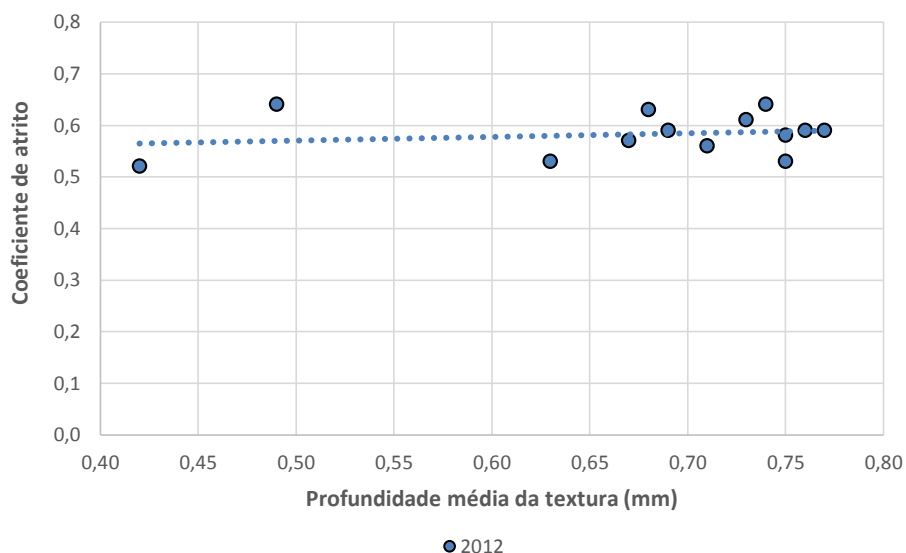


Figura 8.39 – Relação entre a profundidade média da textura e o coeficiente de atrito (ano de 2012)

De acordo com os resultados apresentados no Quadro 8.31 e na Figura 8.39 não evidenciam uma tendência evidente quanto à evolução do coeficiente de atrito relativamente à profundidade média da textura.

— Apresentação e análise de resultados (*IRI/ETD*) —

No Quadro 8.32 são apresentados os resultados do índice de irregularidade longitudinal (*IRI*), assim como da profundidade média da textura estimada (*ETD*) na seção teste da Avenida do Brasil.

Quadro 8.32 – Resultados do *IRI* e da *ETD* na seção teste da Avenida do Brasil (ano de 2013) para a rodeira direita

Distância percorrida na seção teste (m)		Data de ensaio e tipo de avaliação		
		Temperatura média do ar (°C)	<i>IRI</i> (m/km)	<i>ETD</i> (mm)
0-100	0	21,5	2,52	0,83
	25			0,80
	50			0,73
	75			0,89
	99			0,69
	100			-
100-200	101		2,79	0,69
	125			1,04
	148,6			0,98
	175			0,90
	200			0,86
200-300	225		2,15	0,87
	240	0,76		
	250	0,76		
	275	0,86		
	300	0,91		
Média			2,48	0,86

De acordo com os resultados apresentados no Quadro 8.32, verifica-se que a seção teste (via direita) tende a apresentar valores de irregularidade longitudinal dentro do espectável para este tipo de infraestrutura, com um valor médio de 2,48 m/km.

No que concerne à profundidade média da textura estimada, a mesma foi de 0,86 mm para a seção teste. Os valores obtidos são superiores aos obtidos através da avaliação com o ensaio volumétrico da mancha, não se verificando uma correlação óbvia. De referir que a análise do *ETD* corresponde a trechos de 10 metros, enquanto o ensaio volumétrico da mancha corresponde a um ponto específico o que dificulta a obtenção de uma correlação adequada.

— Trecho experimental no LNEC —

Adicionalmente, procedeu-se para o trecho experimental ainda à avaliação do coeficiente de atrito e da profundidade média da textura através do pêndulo britânico e do método volumétrico da mancha, respetivamente. Para a avaliação foram selecionados três pontos distintos onde se procedeu ao ensaio, que se apresentam na Figura 8.40. Os pontos estão afastados entre si de um metro, assim como da berma e de dois metros do início do trecho experimental.



Figura 8.40 – Localização esquemática dos pontos para avaliação do coeficiente de atrito e profundidade média da textura no trecho experimental no LNEC

No Quadro 8.33 são apresentados os principais resultados obtidos na avaliação do coeficiente de atrito e profundidade média da textura no trecho experimental, sendo a sua representação apresentada na Figura 8.41.

Quadro 8.33 – Resultados do coeficiente de atrito e da profundidade média da textura avaliados no trecho experimental

Tipo de avaliação		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Tipo de avaliação	Data de ensaio			
Coeficiente de atrito	Setembro	44	-	
	Novembro	59	64	60
	Dezembro	49	58	62
Mancha de esferas (mm)	Setembro	0,70	-	-
	Novembro	0,88	0,94	1,13
	Dezembro	0,88	0,93	1,10

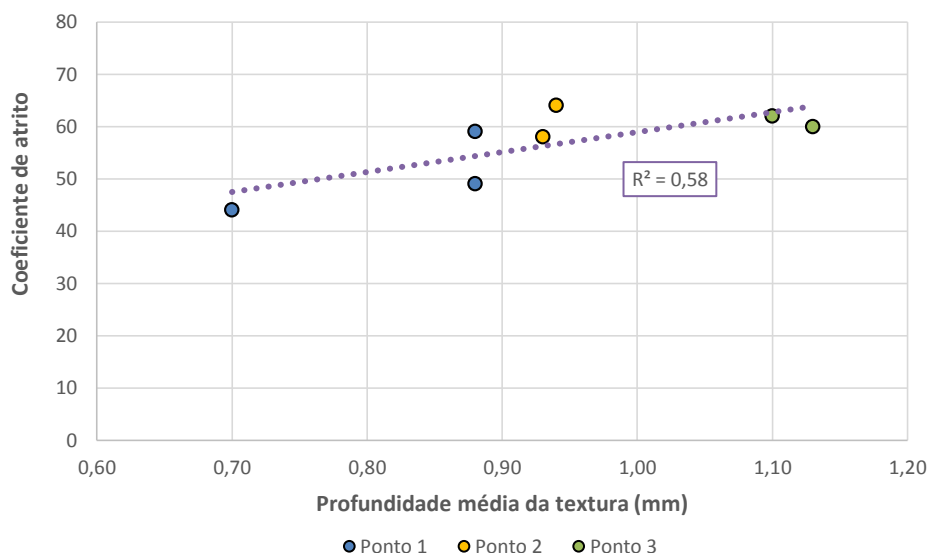


Figura 8.41 – Relação entre a profundidade média da textura e o coeficiente de atrito

De acordo com o Quadro 8.33 e a Figura 8.41, e à semelhança do que foi observado em laboratório e de forma mais tênue na Avenida do Brasil, a um aumento do coeficiente de atrito tende a corresponder um aumento da profundidade média da textura.

Os resultados apresentados no seu conjunto e para a velocidade avaliada (50 km/h) parecem evidenciar um relativo contributo da macrotextura numa mistura SMA para o coeficiente de atrito, sendo esse coeficiente mais influenciado numa fase inicial pela espessura da película de betume que envolve os agregados, passando posteriormente o coeficiente de atrito após a remoção da película de betume por ação de abrasão entre os rodados e o pavimento a ser assegurada pelos agregados grossos e agregados finos.

Os resultados evidenciam que a macrotextura contribui de forma indireta para o coeficiente de atrito, influenciando o escoamento da água existente na superfície da camada à passagem de um rodado. Deste modo um adequado atrito entre o rodado e a superfície da camada de desgaste deve contemplar a utilização de uma mistura SMA com uma adequada microtextura e macrotextura.

8.4.3 APRECIACÃO SUCINTA DOS RESULTADOS OBTIDOS

Com o objetivo de incorporar a influência da composição volumétrica de mistura SMA no desempenho funcional da camada, passa-se a analisar a relação entre o coeficiente de atrito e a profundidade média da textura relativamente às diferentes percentagens dos materiais constituintes de uma mistura SMA.

Na Figura 8.42 à Figura 8.45 são avaliados os resultados obtidos considerando a relação entre a percentagem das partículas ativas, partículas passivas, fíler e betume relativamente à profundidade média da textura.

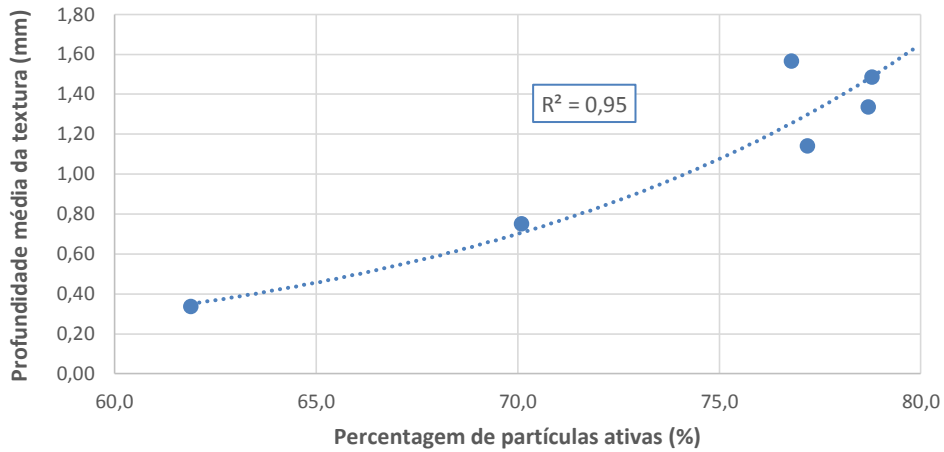


Figura 8.42 – Relação entre a profundidade média da textura e a percentagem de partículas ativas

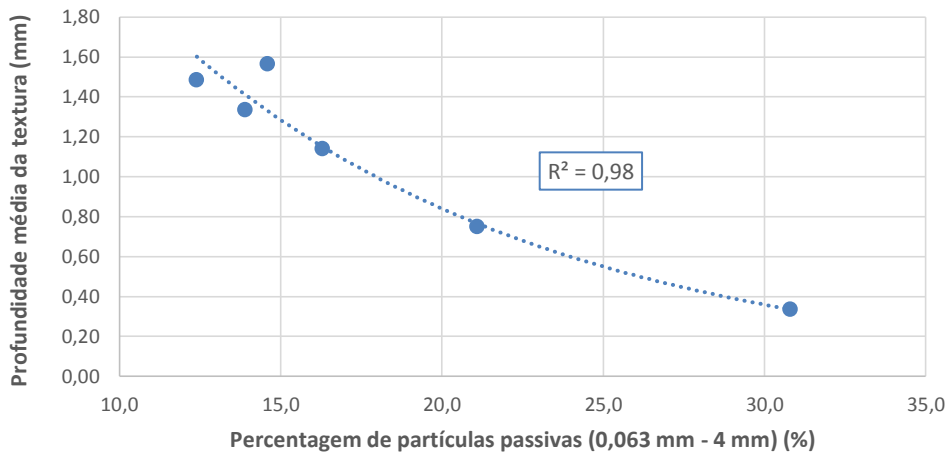


Figura 8.43 – Relação entre a profundidade média da textura e a percentagem de partículas passivas de dimensão entre 0,063 mm e 4 mm

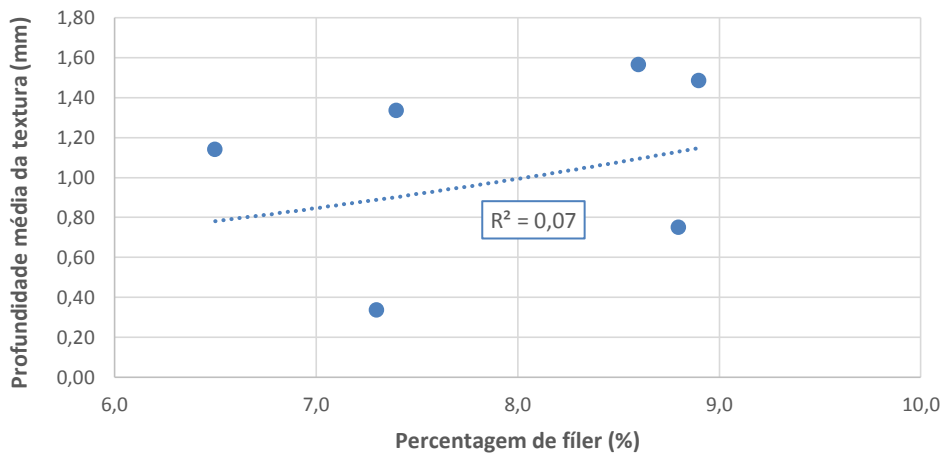


Figura 8.44 – Relação entre a profundidade média da textura e a percentagem de fíler

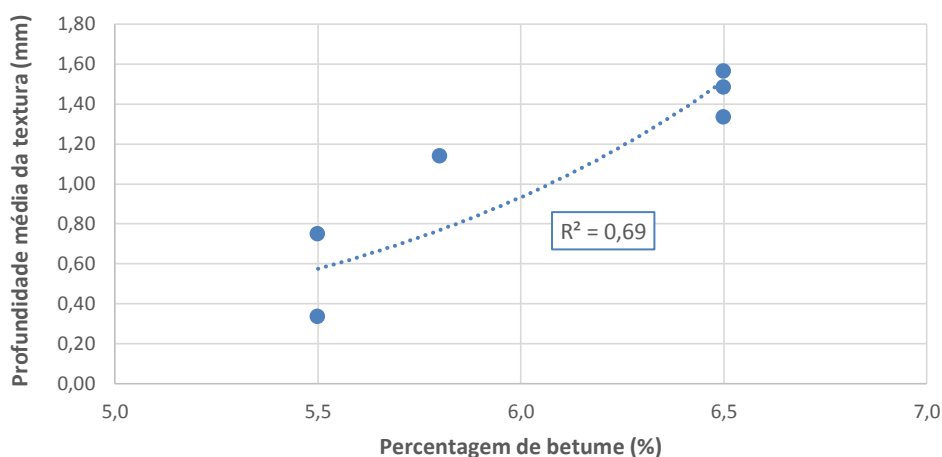


Figura 8.45 – Relação entre a profundidade média da textura e a percentagem de betume

Segundo a análise realizada observou-se como seria espectável que a profundidade de textura é em grande parte influenciada pelas partículas ativas e pela quantidade de partículas passivas obtendo-se um coeficiente de correlação de 0,95 e 0,98, respetivamente. Apesar da percentagem de betume permitir um coeficiente de correlação de 0,69, conclusões apenas poderiam ser obtidas casos se tivesse utilizado a mesma curva granulométrica fazendo variar a percentagem de betume utilizada. No caso da percentagem de fíler não foi evidente uma adequada correlação com a profundidade média da textura.

Se efetuada a mesma análise relativa à relação entre as partículas ativas, partículas passivas, fíler e betume, porém considerando o coeficiente de atrito inicial e intermédio (após remoção da película de betume que envolve os agregados na superfície dos provetes) dado pelo ensaio do pêndulo britânico, observou-se as seguintes relações que se apresentam da Figura 8.46 à Figura 8.49.

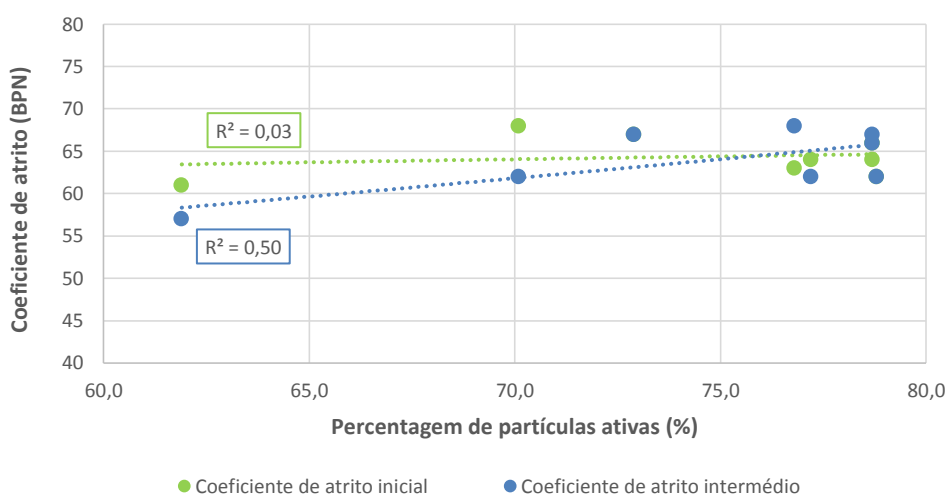


Figura 8.46 – Relação entre o coeficiente de atrito e a percentagem de partículas ativas

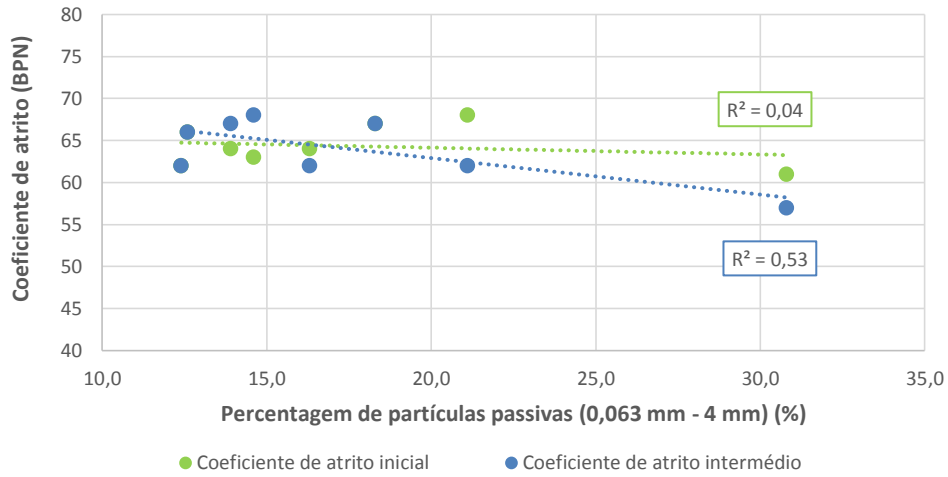


Figura 8.47 – Relação entre o coeficiente de atrito e a percentagem de partículas passivas de dimensão entre 0,063 mm e 4 mm

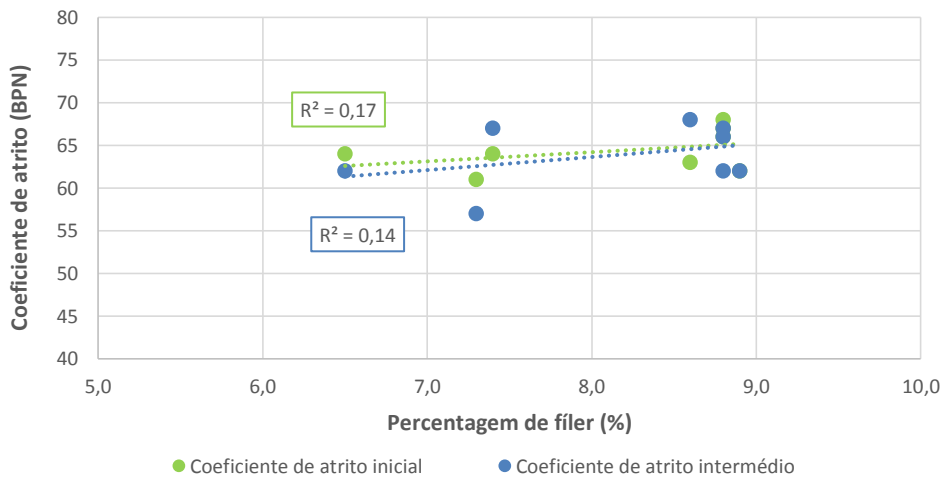


Figura 8.48 – Relação entre o coeficiente de atrito e a percentagem de fíler

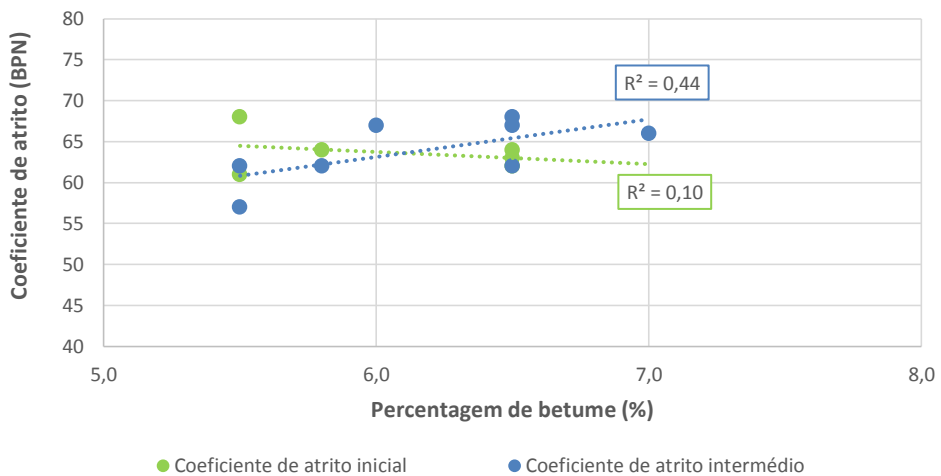


Figura 8.49 – Relação entre o coeficiente de atrito e a percentagem de betume

De acordo com a análise efetuada da Figura 8.46 à Figura 8.49, e ao invés do que foi observado para a profundidade média da textura, não foi evidente uma correlação adequada com as partículas ativas, partículas passivas, fíler e betume relativamente ao coeficiente de atrito inicial. No que concerne ao coeficiente de atrito intermédio (após remoção da película de betume), observou-se para a quantidade de partículas ativas, passivas e de betume utilizadas, coeficientes de correlação de apenas 0,50, 0,53 e 0,44, respetivamente. No que concerne ao fíler não foi evidente uma adequada correlação com o coeficiente de atrito intermédio.

Notar todavia, que os coeficientes de atrito avaliados correspondem ao coeficiente de atrito a curto e médio prazo da vida de uma mistura SMA após aplicação da mistura SMA. O coeficiente de atrito será posteriormente, após remoção da película de betume, maioritariamente dependente da resistência ao polimento dos agregados grossos.

Nesse sentido também se procedeu à avaliação do coeficiente de atrito com o pêndulo britânico após a realização do polimento acelerado dos agregados grossos que constituem as misturas SMA avaliadas no presente trabalho. A avaliação apresentada na Figura 8.50 pretende fazer parte do método de formulação proposto com o intuito de contribuir para uma melhor compreensão da “evolução” teórica que o coeficiente de atrito numa mistura SMA (fase inicial, fase intermédia, após a remoção da película de betume que envolve a superfície dos agregados grossos na mistura betuminosa e a fase final, após polimento apenas dos agregados grossos).

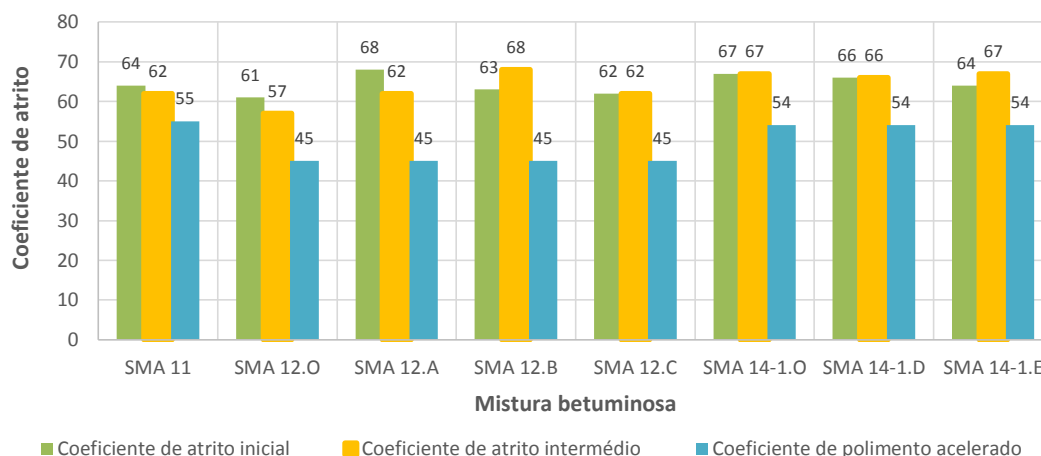


Figura 8.50 – Evolução teórica do coeficiente de atrito (fase inicial, intermédia e “final” coeficiente de polimento acelerado)

Na Figura 8.50 é possível verificar a “evolução” teórica do coeficiente de atrito observando-se entre a fase inicial e intermédia variações contrárias no desenvolvimento do coeficiente de atrito após o qual se verifica numa fase final do polimento, o menor valor observado, o qual neste caso é traduzido pelo coeficiente de polimento acelerado.

Os resultados obtidos no presente ponto parecem evidenciar a possibilidade de se formular uma mistura SMA considerando o desempenho funcional, através da utilização do conceito proposto de *tire-on-stone* que pode contribuir para otimizar o valor da profundidade média da textura, função da percentagem de partículas ativas e passivas.

O conceito deve obrigatoriamente ser amplamente validado através da formulação e aplicação de outras misturas SMA a nível nacional e internacional, permitindo a contínua validação e otimização do próprio conceito de *tire-on-stone*, assim como do método de formulação que o incorpora e que pretende a obtenção de misturas SMA (*i-SMA*) com um *i-performance*. Considera-se que o conceito

de *tire-on-stone* deve ser futuramente validado e aplicado para outros tipos de misturas betuminosas, uma vez que tudo se baseia numa análise volumétrica dos materiais constituintes das misturas betuminosas.

Os resultados obtidos apenas evidenciam o que foi indicado, que a formulação de uma mistura SMA baseada apenas na garantia de um efeito de *stone-on-stone* adequado não permite ter em consideração o desempenho funcional da mistura SMA, no que concerne à resistência à derrapagem, projeção de água e geração de ruído.

8.4.4 CONCLUSÕES

A avaliação do desempenho funcional nas misturas SMA com fibras celulósicas permitiu obter as seguintes conclusões principais:

- as lajetas fabricadas evidenciam visualmente um aumento da profundidade média da textura com um aumento da percentagem de partículas ativas (aumento da energia de compactação das partículas ativas utilizada);
- os métodos de compactação que maior profundidade média da textura produzem correspondem, ao método Proctor e ao *roller compactor* com valores entre 1,34 e 1,57 mm;
- os resultados parecem demonstrar que a obtenção de um efeito de *stone-on-stone* não é garantia de que se obterá uma adequada macrotextura traduzida por uma elevada profundidade média da textura ou coeficiente de atrito intermédio (após remoção da película de betume que envolve os agregados à superfície da camada betuminosa);
- a profundidade média da textura foi em grande parte influenciada pela percentagem utilizado de partículas ativas de partículas passivas. No caso do fíler não foi evidente uma correlação com a profundidade média da textura. A avaliação da influência do betume requer o desenvolvimento de estudos complementares;
- para o coeficiente de atrito inicial e intermédio não foi obtido um coeficiente de correlação adequado com os materiais constituintes da SMA;
- os resultados obtidos parecem evidenciar a possibilidade de se formular uma mistura SMA considerando o desempenho funcional, através da utilização do conceito de *tire-on-stone* que permita definir a composição volumétrica do mastic betuminoso otimizando a profundidade média da textura;
- a formulação de uma mistura SMA apenas baseada na garantia de um efeito de *stone-on-stone* e *mix-skeleton* não permite a formulação de misturas com um desempenho funcional otimizado. O conceito de *tire-on-stone* contribui para uma formulação global da mistura SMA considerando a otimização do desempenho funcional, através da adequada definição do *mastic-within-stone*.

9 PROPOSTA DE MÉTODO DE FORMULAÇÃO E CONTROLO DE QUALIDADE DE MISTURAS SMA BASEADO NO CONCEITO DE I-PERFORMANCE

Tendo em consideração os resultados e conclusões anteriormente obtidas durante as quatro fases do presente estudo experimental, é proposto seguidamente um método de formulação de misturas SMA, baseado na otimização do seu desempenho e trabalhabilidade segundo o conceito proposto de *i-performance* (*improved performance*) o qual é constituído pelas seguintes fases:

Fase 1 (caracterização dos materiais)

Etapa 1.1:

De acordo com o tipo de mistura betuminosa (dimensão máxima nominal dos agregados) a fabricar, seleccionar as frações de agregados a utilizar, de modo a ter-se preferencialmente uma fração referente às partículas ativas (fração ativa), uma outra fração referente às partículas passivas (fração passiva), considerando o peneiro de referência definido no Quadro 7.4 e uma fração referente ao fíler.

Etapa 1.2:

Avaliar a granulometria e as massas volúmicas de cada uma das frações de agregados, de fíler, aditivos e betume. Adicionalmente deve ser determinada a absorção de água/betume de cada uma das frações de agregados e de fíler.

Etapa 1.3:

Caracterizar os materiais a utilizar na formulação da mistura SMA, tendo como pressuposto as propriedades recomendadas no Quadro 3.3 (agregados grossos), no Quadro 3.11 (agregados finos), no Quadro 3.13 (fíler), no Quadro 3.15 (betume) e no Quadro 3.20 (fibras celulósicas).

Fase 2 (otimizar a percentagem de partículas ativas)

Etapa 2.1:

Para a fração referente às partículas ativas, determinar a baridade e o volume de vazios entre as partículas ativas para se obter e otimizar o efeito de *stone-on-stone*, considerando a metodologia proposta no ponto 7.2 para a compactação pesada com o Proctor (55 pancadas por cada uma das cinco camadas a compactar).

Fase 3 (processo iterativo de otimização da composição volumétrica do mastique betuminoso para otimizar o desempenho)

Etapa 3.1:

Tendo em consideração que a baridade e o volume de vazios entre as partículas ativas se mantêm inalteráveis, determinar e otimizar o efeito de *mastic-within-stone* segundo a metodologia proposta no ponto 7.3, para o volume de partículas passivas, de fíler e de betume na composição volumétrica da SMA, de modo a assegurar um *i-performance* baseado na otimização simultânea do desempenho mecânico e funcional através dos efeitos de *mix-skeleton* e *tire-on-stone*, respetivamente.

No que concerne ao desempenho mecânico, a definição da composição volumétrica do mastique betuminoso (*mastic-within-stone*) da mistura SMA, deve assegurar um efeito de *mix-skeleton*, pelo que devem ser consideradas as seguintes equações referentes à estimativa da deformação permanente, fendilhamento por fadiga e módulo de deformabilidade:

Etapa 3.2 (resistência à deformação permanente):

$$RD_{AIR} = \frac{7 \cdot e \left(\frac{10 \cdot \frac{EPB}{V_v}}{41} \right)}{6} \quad (9.1)$$

$$WTS_{AIR} = \frac{2 \cdot e \left(\frac{2 \cdot \frac{EPB}{V_v}}{7} \right)}{77} \quad (9.2)$$

$$PRD_{AIR} = \frac{26 \cdot e \left(\frac{7 \cdot \frac{EPB}{V_v}}{29} \right)}{11} \quad (9.3)$$

sendo:

RD_{AIR} – deformação máxima, profundidade de rodeira a 10000 ciclos a 60 °C segundo a EN 12697-22 (mm);

WTS_{AIR} – taxa de deformação a 60 °C segundo a EN 12697-22 (mm/10³);

PRD_{AIR} – percentagem de profundidade de rodeira a 10000 ciclos a 60 °C segundo a EN 12697-22 (%);

EPB – espessura da película de betume determinada segundo o método de Hveem (ASTM, 1992) (micron);

V_v – porosidade da mistura SMA (%).

Etapa 3.3 (resistência ao fendilhamento por fadiga):

$$\varepsilon_6 = 236 \cdot \left(\frac{EPB}{V_v} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (9.4)$$

sendo:

ε_6 – extensão de tração das misturas SMA para um milhão de aplicações de carga a 20 °C segundo a EN 12697-24 com equipamento de flexão em quatro pontos a extensão controlada (×10⁻⁶ m/m) ;

EPB – espessura da película de betume determinada segundo o método de Hveem (ASTM, 1992) (micron);

V_v – porosidade da mistura SMA (%).

Etapa 3.4 (módulo de deformabilidade da mistura betuminosa):

$$E = \frac{312493}{(\varepsilon_6)^{\frac{4}{5}}} \quad (9.5)$$

sendo:

E – módulo de deformabilidade da mistura SMA a 20 °C segundo a EN 12697-26 com equipamento de flexão em quatro pontos a extensão controlada (MPa);

ε_6 – extensão de tração das misturas SMA para um milhão de aplicações de carga a 20 °C ($\times 10^{-6}$ m/m).

Relativamente ao desempenho funcional, a definição da composição volumétrica do mastic betuminoso (*mastic-within-stone*) da mistura SMA, deve assegurar o efeito de *tire-on-stone*, pelo que deve ser considerada a seguinte equação referente à estimativa da profundidade média da textura:

Etapa 3.5 (profundidade média da textura):

$$PT = \frac{\left(5 \cdot (2,71828)^{\left(\frac{3 \cdot P_{pa}}{35} + \frac{4 \cdot P_{pp}}{47} \right)} + 13524 \right) \cdot e^{-\frac{4 \cdot P_{pp}}{47}}}{5880} \quad (9.6)$$

sendo:

PT – profundidade média da textura (mm);

P_{pa} – percentagem de partículas ativas na mistura de agregados (%);

P_{pp} – percentagem de partículas passivas na mistura de agregados (%).

Etapa 3.6 (trabalhabilidade):

Relativamente à trabalhabilidade da mistura SMA deve ser utilizado o conceito de *free binder* especificado na Austrália, como descrito no ponto 3.4.1.

Etapa 3.7 (percentagem de fibras celulósicas, opcional):

Adicionalmente, caso sejam utilizadas fibras celulósicas como aditivo estabilizante, e considerando a composição volumétrica ótima, definida através do conceito de *i-performance* determinar a percentagem de fibras celulósicas com a equação (5.2).

Fase 4 (controlo de qualidade e processo de validação e otimização do próprio método de formulação)**Etapa 4.1 (validação laboratorial do desempenho):**

Para validar os resultados obtidos através do método desenvolvido, a composição volumétrica ótima estimada para uma mistura do tipo SMA, deve ser utilizada como composição preliminar no fabrico e

compactação de provetes de mistura SMA, para avaliação das características volumétricas, tendo como pressuposto assegurar os limites especificados para as propriedades definidas pelo utilizador [i.e. volume de vazios (Vv), volume de vazios na mistura de agregados (VMA), volume de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume (VFB)]. Como referência poderão ser utilizadas as propriedades propostas no Quadro 4.4 para as misturas SMA a utilizar em Portugal.

Após validadas as características volumétricas pretendidas para os provetes compactados, avaliar o respetivo efeito de *mix-skeleton* e *tire-on-stone* através da avaliação do desempenho mecânico e funcional. Os resultados obtidos devem ser incorporados na base de dados do modelo analítico utilizado no método de formulação inventado com vista ao seu contínuo aperfeiçoamento.

Etapa 4.2 (recolha de amostras em obra):

Durante a fase de controlo de qualidade da mistura SMA aplicada em obra, o presente método pode ser utilizado, nomeadamente pelas equipas de Fiscalização no apoio à caracterização e aceitação das amostras recolhidas de misturas SMA. Para tal, o utilizador deve recolher amostras preferencialmente compactadas (carotes) e proceder à avaliação da percentagem de betume e da granulometria, o que compilado em conjunto com os dados iniciais, permite estimar as características volumétricas, desempenho e trabalhabilidade da mistura aplicada.

A análise permitirá assim compreender de forma mais concreta, quais as consequências de variações relativamente à composição ótima definida na fase de formulação e, estimar o desempenho ao longo dos pavimentos onde se aplicou as misturas SMA, nomeadamente através da definição de “zonas homogéneas” de desempenho. Tal servirá como ferramenta de apoio à Equipa de Fiscalização aquando da decisão sobre a aceitação/rejeição de uma determinada mistura aplicada em obra. Tal pretende constituir um contributo para uma adequada gestão dos montantes monetários disponíveis para a manutenção de uma rede rodoviária de um país.

As amostras recolhidas em obra poderão ainda ser utilizadas em laboratório, nomeadamente na avaliação da resistência à água, da resistência à deformação permanente, da resistência ao fendilhamento por fadiga, da profundidade média da textura. Os resultados das avaliações realizadas quando efetuadas individualmente ou em conjunto são sempre passíveis de serem integrados na base de dados do método permitindo mais uma vez o seu contínuo aperfeiçoamento.

Para melhor compreensão do método de formulação e controlo de qualidade desenvolvido, apresenta-se na Figura 9.1 um fluxograma que pretende descrever as principais fases do processo de formulação e de controlo de qualidade em obra, na aplicação de uma *i-SMA*.

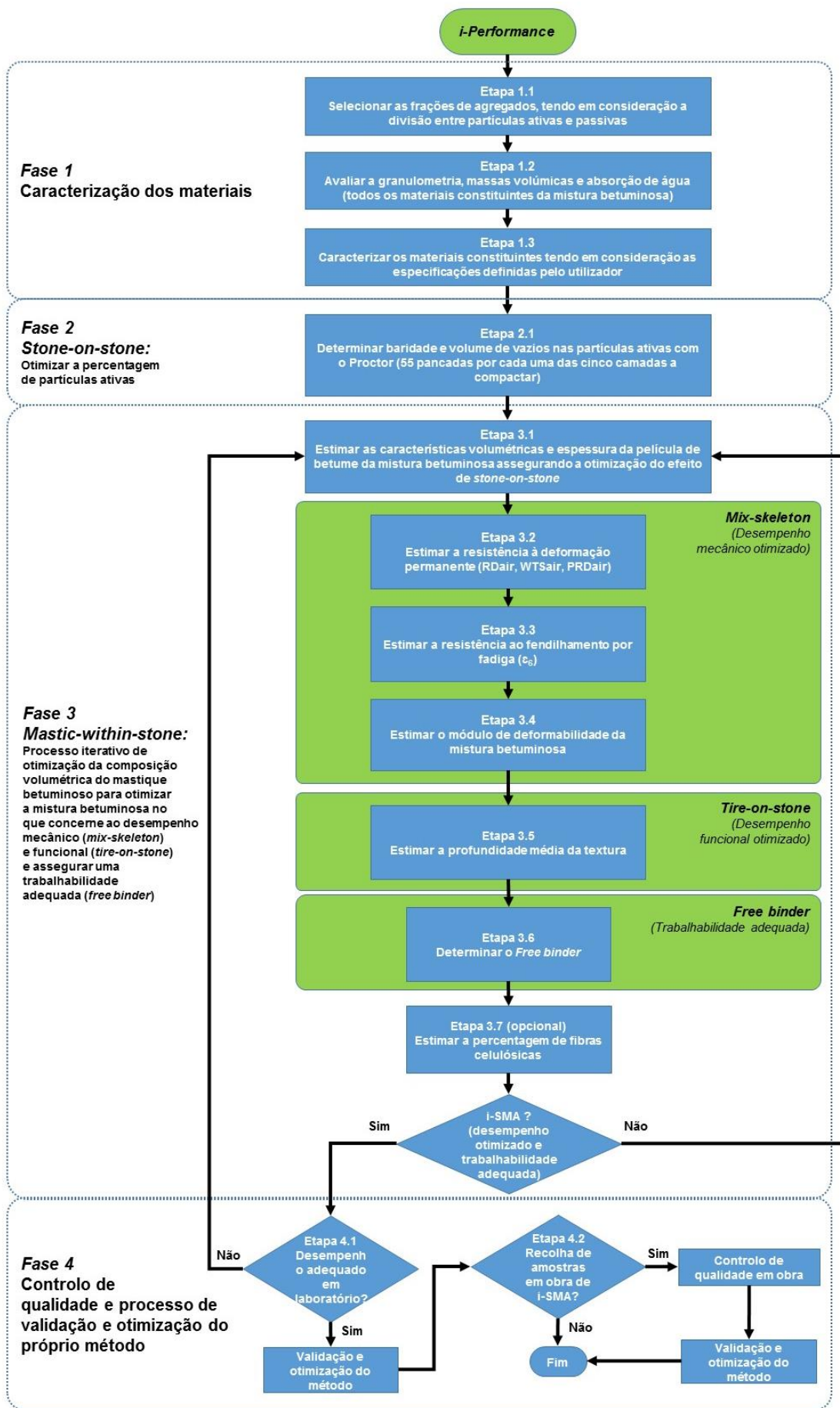


Figura 9.1 – Método de formulação e de controlo de qualidade de uma *i-SMA*

10 CONCLUSÕES FINAIS

A formulação das misturas SMA tem, de uma forma geral, sido realizada de forma empírica baseada em fusos granulométricos pré-definidos combinados com especificações para os materiais constituintes e requisitos adicionais baseados em ensaios para avaliação do desempenho. Tal abordagem dificulta uma adequada compreensão por parte do utilizador na definição da composição volumétrica a utilizar numa mistura SMA, não sendo assegurado que a mistura formulada garante um desempenho adequado. Nesse sentido, um esforço considerável no desenvolvimento de métodos de formulação alternativos, como os analisados no presente trabalho, tendem a procurar novos caminhos que se unem em torno da obtenção do efeito de *stone-on-stone*. Se o efeito de *stone-on-stone* contribui para uma melhoria do comportamento à deformação permanente através das partículas ativas, o mesmo não é garantido no que concerne à obtenção das características volumétricas, de outras características relacionadas com o desempenho mecânico (resistência ao fendilhamento por fadiga), do desempenho funcional (profundidade média da textura), assim como da trabalhabilidade da mistura SMA. Importava assim iniciar um novo caminho que contribuísse para dotar o utilizador de uma visão que permita uma melhor compreensão da influência da composição volumétrica da mistura SMA (partículas ativas - passivas, fíler, aditivos estabilizantes, betume e porosidade) nas características volumétricas, desempenho global e trabalhabilidade da SMA. Considera-se que os resultados obtidos no presente trabalho contribuem para essa melhor compreensão, permitindo os resultados alcançados tecer as seguintes conclusões finais:

- a simples definição de uma curva granulométrica que se insira dentro dos limites especificados para um determinado fuso de uma SMA não é por si só garantia de se obter uma mistura SMA, com um efeito de *stone-on-stone*, ou que permita a utilização de uma elevada percentagem de betume (superior a 6,0 %), ou que apresente um desempenho adequado;
- dos vários métodos de compactação avaliados, o método de compactação pesada com o Proctor (55 pancadas por cada uma das cinco camadas a compactar) corresponde ao método que melhores resultados obteve, promovendo simultaneamente uma quebra de agregado semelhante à que ocorre em obra e a obtenção de um rácio entre a baridade após e sem compactação com valores compreendidos entre 1,10 (110 %) e 1,25 (125 %) como especificado no método de Bailey;
- a metodologia proposta para a formulação das misturas SMA permite, com os dados de entrada das características dos agregados e da baridade e volume de vazios das partículas ativas determinadas com o Proctor, contribuir para orientar o utilizador na definição uma adequada composição volumétrica que visa otimizar o efeito de *stone-on-stone*, minimizando inicialmente a necessidade de fabrico de provetes em laboratório durante o processo de formulação da mistura SMA;
- complementarmente, a metodologia proposta permite integrar no processo de formulação o conceito proposto de *mastic-within-stone* contribuindo, após determinado o efeito de *stone-on-stone*, para uma adequada definição da composição volumétrica dos diferentes materiais constituintes a utilizar no mastique betuminoso, sem com isso condicionar o efeito de *stone-on-stone*. Para definição da composição volumétrica do mastique betuminoso (*mastic-within-stone*) são tidas em consideração de forma simultânea as características volumétricas pretendidas para a mistura SMA (segundo a metodologia analítica proposta), o seu desempenho mecânico e funcional, assim como a trabalhabilidade. Assim o conceito de *mastic-within-stone* integra os dois conceitos propostos de *mix-skeleton*, *tire-on-stone* e o conceito utilizado na Austrália de *free binder*;
- o conceito de *mix-skeleton* que se propõe, contribui para que a definição da composição do mastique betuminoso a utilizar na mistura SMA, seja baseada no desempenho da SMA e não apenas de forma exclusiva na resistência à deformação permanente. Assim, o conceito de

mix-skeleton contribui para que o utilizador aquando da definição da composição do mastique betuminoso compreenda quais as consequências da sua escolha no que concerne à resistência à deformação permanente, à resistência ao fendilhamento por fadiga, assim como do módulo de deformabilidade da mistura SMA;

- complementarmente, para se obter uma mistura SMA de alto desempenho é requerido que seja assegurada simultaneamente a obtenção de um adequado desempenho funcional. O conceito de *tire-on-stone* proposto contribui para uma adequada definição da composição volumétrica do mastique betuminoso considerando a obtenção de uma adequada profundidade média da textura;
- adicionalmente, a metodologia proposta contribui simultaneamente para a formulação de uma mistura SMA com uma adequada trabalhabilidade, a qual é aferida através do conceito de *free binder* utilizado na Austrália;
- sendo o método fortemente baseado numa metodologia analítica, tal permite que o mesmo seja utilizado numa fase posterior à formulação, como método de controlo da qualidade das misturas fabricadas em laboratório e/ou aplicadas em obra no que concerne ao seu espectável desempenho;
- em suma o trabalho desenvolvido apresenta uma nova metodologia prática para a formulação e controlo de qualidade das misturas SMA, recorrendo à otimização volumétrica da mistura betuminosa, baseada na obtenção de um efeito de desempenho maximizado (*i-performance*) o qual incorpora simultaneamente o efeito de *stone-on-stone* entre as partículas ativas. O desenvolvimento do presente trabalho contribuiu para a adoção de uma metodologia de formulação baseada na otimização do desempenho das misturas, em substituição da utilização de “receitas” pré-estabelecidas.

O trabalho desenvolvido e os novos conceitos nele patentes pretendem contribuir para a melhoria do estado da arte no que concerne à formulação de misturas betuminosas, constituindo o fundamento para o método de formulação e controlo e qualidade de misturas SMA, aqui designado por *i-SMA Mix Design*.

10.1 RECOMENDAÇÕES

Complementarmente às conclusões obtidas, os resultados obtidos no trabalho permitem tecer as seguintes recomendações.

Relativamente ao procedimento de fabrico em laboratório de misturas SMA recomenda-se:

- a adição de fibras celulósicas pelo método a quente ou a frio, uma vez que ambos os métodos de adição permitem obter provetes compactados com um comportamento semelhante em termos da avaliação *Marshall*, assim como das características volumétricas dos provetes compactados, sendo o método de adição a frio mais simples de executar. Independentemente do método utilizado, para se evitar uma reduzida dispersão das fibras pode-se aumentar a duração da “amassadura” até um máximo de 5 minutos. Em alternativa pode-se proceder previamente à desagregação manual dos aglomerados de fibras celulósicas, nomeadamente com recurso a um almofariz.

No que concerne à avaliação do escoamento de material betuminoso recomenda-se:

- a utilização do termo “material betuminoso” em detrimento de “ligante betuminoso”, uma vez que na norma EN 12697-18 (“Binder drainage”) é avaliado o escoamento do material betuminoso e não apenas do ligante betuminoso.
- a utilização do método do copo (*Schellenberg*) para a avaliação do escoamento, uma vez que este método tende a apresentar uma maior sensibilidade à percentagem de fibras (ao escoamento) comparativamente ao método do cesto. Tal poderá indiciar que os orifícios do cesto poderão ficar colmatados com mastique betuminoso e/ou agregados grossos impossibilitando o adequado escoamento de material betuminoso nas misturas SMA. Da mesma forma, o método do copo, comparativamente ao método do cesto, tende a ser mais condicionante, requerendo a adição de maiores percentagens de fibras celulósicas para a obtenção do mesmo nível de escoamento nas misturas SMA analisadas; e a ser mais sensível à variação da percentagem de fibras celulósicas utilizadas;
- a utilização do conceito de *inibição do escoamento* proposto neste estudo [equação (5.1)] permitindo ao utilizador uma melhor compreensão do efeito inibidor de um determinado aditivo estabilizante e definição do respetivo intervalo espectável para a percentagem a utilizar. Tal permite uma análise comparativa do custo/benefício na mitigação do escoamento entre diferentes tipos de aditivo estabilizante. Dada a utilização incipiente de SMA em Portugal considera-se importante a avaliação de diferentes aditivos considerando o conceito proposto, complementado com a avaliação do desempenho do conjunto betume e aditivo para a definição da percentagem ótima de aditivo estabilizante, que vise maximizar a mitigação do escoamento e a melhoria do desempenho da mistura SMA. No caso das fibras celulósicas aglomeradas com betume é espectável que o objetivo de mitigar o escoamento seja alcançado habitualmente para uma percentagem de fibras celulósicas compreendida entre 0,3 % e 0,6 % à semelhança do que é especificado na Finlândia e na Rússia (0,3 % a 0,5 %);
- a utilização da equação (5.2) para estimar a percentagem mínima de fibras celulósicas a utilizar numa mistura SMA em função da percentagem de betume a utilizar na mistura SMA.

No que respeita à avaliação da percentagem de ligante betuminoso e granulometria recomenda-se:

- a determinação com precisão da percentagem de betume em misturas SMA com fibras celulósicas através do método por centrifugação e a percentagem de ligante betuminoso (conjunto betume e fibras) por incineração. A adição de fibras celulósicas ao contrário do que tende a ocorrer com os betumes modificados com borracha, não promove uma redução significativa da percentagem de ligante betuminoso obtido pelo método de extração por centrifugação. A utilização de um solvente é suficiente para a extração do ligante betuminoso que impregna as fibras celulósicas, comparativamente à borracha proveniente da reciclagem de pneus;
- a utilização do método de incineração, de modo a evitar a existência de fibras retidas nos peneiros durante a peneiração se requerida a posterior avaliação da granulometria por peneiração;
- se requerida a determinação de forma individual da percentagem de betume e de fibras, que seja utilizado o método de extração por centrifugação em complemento do método por incineração que apenas permite a obtenção da percentagem total do conjunto, betume e fibras celulósicas.

Relativamente às propriedades dos materiais constituintes da mistura SMA recomenda-se:

- a utilização como referência como contributo para a utilização de misturas SMA com um comportamento adequado, numa fase preliminar do conhecimento existente em Portugal, das propriedades recomendadas para os agregados grossos (Quadro 3.2), agregados finos (Quadro 3.11), filler (Quadro 3.15), betume (Quadro 3.15), fibras celulósicas (Quadro 3.20) e mistura betuminosa (Quadro 4.4).

10.2 TRABALHOS FUTUROS

Os conceitos desenvolvidos neste estudo constituem a base para um novo método de formulação de misturas SMA. Contudo, como indicado nas conclusões e recomendações, aspetos pertinentes requerem ainda estudo para uma melhoria e validação do método desenvolvido, os quais pela sua dimensão não foram passíveis de serem avaliados no presente trabalho. Apresenta-se seguidamente possíveis linhas de investigação que se sugerem para futuros trabalhos:

- Generalizar o estudo realizado a outros tipos de agregados, no que concerne à avaliação da baridade e volume de vazios através do método de compactação proposto com o Proctor e da sua influência nas características volumétricas e de desempenho das misturas SMA formuladas com o *i-SMA Mix Design*;
- Estudar para diferentes misturas SMA a influência da percentagem de partículas ativas, passivas e de filler utilizadas, como contributo para uma maior compreensão da sua variação no que concerne às características volumétricas e de desempenho das misturas SMA formuladas segundo o método de formulação desenvolvido, *i-SMA Mix Design*;
- Generalizar o estudo realizado a outras misturas SMA, nomeadamente, com outras dimensões máximas nominais de agregados ($11 \text{ mm} > D > 14 \text{ mm}$), como forma de validar o método para diferentes tipos de misturas SMA;
- Generalizar o estudo realizado a outras misturas SMA, nomeadamente, com a utilização de outros tipos de aditivos estabilizantes e de ligantes betuminosos;
- Avaliar a influência do tipo e percentagem de betume nos conceitos propostos de *mix-skeleton* e *tire-on-stone*, nomeadamente no que concerne à sensibilidade à água e profundidade de textura e coeficiente de atrito;
- Decorrente dos estudos anteriores e outros que sejam realizados, proceder à contínua validação dos conceitos propostos de *mastic-within-stone* (*mix-skeleton* e *tire-on-stone*);
- Validar e se possível melhorar o conceito de *free binder* desenvolvido na Austrália e utilizado no método de formulação desenvolvido para melhoria da trabalhabilidade das misturas SMA;
- Alargar o estudo do fenómeno do envelhecimento a todas as misturas deste trabalho e outras;
- Acompanhamento do comportamento das misturas aplicadas em obra, tendo em vista a avaliação do fenómeno de envelhecimento e o seu efeito no seu desempenho em geral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AAPA (1998) – “Surface characteristics of bituminous surfacing”. Pavement Work Tips, Australian Asphalt Pavement Association. Melbourne, Austrália. 11 (1998) 2 p.
- AAPA (2004) – “National Asphalt Specification”. Australia: Australian Asphalt Pavement Association, 2004
- Abdulashafi, A. (1988) – “Rutting-review of existing models and some application to Saudi Arabia”. Proceedings of the 3rd IRF Middle East Regional Meeting, Riade, Arábia Saudita, Fevereiro de 1998, Vol. 6, pp. 244-256
- AIPCR (1999) – “Emplois des bitumes spéciaux, des liants bitumineux modifiés et avec additifs en techniques routières”. França: Comité technique 8 Routes souples / Technical Committee 8 Flexible Roads, 1999 (Relatório n.º 08.05.BRF)
- Akbulut, H. (1999) – “The properties and performance of cellulose fibre reinforced Stone Mastic Asphalt”. Reino Unido: Ulster University, 1999. Tese de doutoramento
- Al-Hadidy, A.I.; Tan, Y. (2009) – “Evaluation of pyrolysis low density polyethylene modified asphalt paving materials”. Journal of Materials in Civil Engineering. Reston, EUA. ISSN 0899-1561. 21:10 (2009), pp. 618-623
- Allen, G.K. (2006) – “Problems of Stone Mastic Asphalt use in North Queensland”. Queensland, Austrália: University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying, 2006. 259 p. Dissertação de bacharelato
- Al-Rousan, T.M. (2004) – “Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system”. Texas, EUA: Texas A&M University, 2004, 229 p. Tese de doutoramento
- Al-Suhaibanim, A.; Al-Mudaiheem, J.; Al-Fozan, J. (1992) – “Effect of filler type and content on properties of asphalt concrete mixes”. Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance, Proceedings of a Symposium, San Diego, EUA, 10 de Dezembro de 1991, pp. 107-130
- Andersen, P.J.; Johansen, V. (1991) – “Particle packing and concrete properties” Materials Science of Concrete. EUA, Ohio. (1991), pp. 111-146
- Anderson, D.A.; Bahia, H.U.; Dongre, R. (1992) – “Rheological properties of mineral filler-asphalt mastics and its importance to pavement performance”. American Society for Testing and Materials, 1147 (1992), pp. 131-153
- Anderson, D.A.; Dongre, R.; Christensen, D.W.; Dukatz, E.L. (1992a) – “Effects of minus 200 sized aggregate on fracture behavior of dense-graded hot mix asphalt”. American Society for Testing and Materials, 1147 (1992), pp. 154-176
- Anderson, D.A.; Tarris, J.P.; Brock, D. (1982) – “Dust collector fines and their influence on mixture design”. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT). Minneapolis, EUA. ISSN 0270-2932. 51 (1982), pp. 363-397
- APRG (1997a) – “Austroads: Selection and design of asphalt mixes: Australian provisional guide”. Austrália, Vermont South: ARRB Transport Research Limited, 1997. (Relatório n.º 18)

- APRG (2000) – “Evaluation of field and laboratory fatigue properties of asphalt mixes”.. Austrália, Sidney: Austroads Incorporated, 2000. (Relatório n.º AP-T03/00)
- ARRB (2004) – “Technical note 16 – Stone Mastic Asphalt”. Austrália: Australian Road Research Board - Transport Research (Austroads), 2004. (Nota técnica n.º 16)
- Asphalt Institute (1969) – “Filler in asphalt mixtures”. EUA: Asphalt Institute, 1969. (Relatório n.º RR 69-2)
- Asphalt Institute (1997) – “SuperPave Mix Design Guide. Superpave Series SP-2”, Asphalt Institute. Lexington, Kentucky, 1997
- Asphalt Institute (2001) – “HMA Construction of hot mix asphalt pavements, MS-22”. 2.º ed. Lexington, EUA: Asphalt Institute, 2001. 274 p. ISBN 9781934154144
- Aurstad, J.; Lange, G.; Sturm, D. (2006) – “Long term pavement performance on Norwegian asphalt runways – a field and laboratory study”. Proceedings of the 10th International Conference on Asphalt Pavements, Quebec City, Canadá, 12-17 de Agosto de 2006, Vol. 2, pp. 341-352
- Austroads (2007) – “Proceedings: Austroads National Stone Mastic Asphalt (SMA) Workshop”. Austrália, Sidney: Austroads Incorporated, 2007. (Relatório n.º AP-T92/07)
- Austroads (2009) – “Review of Stone Mastic Asphalt design concepts”. Sidney, Austrália: Austroads Incorporated, 2009. (Relatório n.º AP-T138/09)
- Austroads (2013) – “Development of aspects of a design procedure for Stone Mastic Asphalt”. Sidney, Austrália: Austroads Incorporated, 2013. (Relatório n.º AP-T221-13)
- Austroads (2013a) – “Development of a Stone Mastic Asphalt mix design procedure: Selection of appropriate compaction equipment for the mix design”. Sidney, Austrália: Austroads Incorporated, 2013. (Relatório n.º AP-T250-13)
- Austroads (2013b) – “Mastic performance assessment in Stone Mastic Asphalt”. Austrália, Sidney: Austroads Incorporated, 2013. (Relatório n.º AP-T219-13)
- Balghunaim, F.; Al-Dhubaib, I.; Khan, S.; Fatani, M.; Al-Abdulwahhad, H.; Babshait, A. (1988) – “Pavement rutting in the Kingdom of Saudi Arabia: A diagnostic approach to the problem”. Proceedings of the 3rd IRF Middle East Regional Meeting, Riade, Arábia Saudita, Fevereiro de 1988, Vol. 6, pp. 210-232
- Batista, F.A.; Antunes, M.L.; Fonseca, P. (2006) – “Desempenho de misturas betuminosas com BMB aplicadas em Portugal”. 4.º Congresso Rodoviário Português “Estrada 2006”, Centro de Congressos do Estoril, Portugal, 5-7 de Abril de 2006
- Batista, F.A., Antunes, M.L. e Fonseca, P. (2008) – Avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas com betume modificado com alta percentagem de borracha. Comunicação em CD-ROM do V Congresso Rodoviário Português “Estradas 2008”, CRP, 10p.
- Batista, F.A. e Antunes, M.L. (2009) – Ensaios de comparação interlaboratorial para avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas compactadas. Relatório LNEC nº181/2009, Processo 0702/01/17243

- Bastow, R.; Webb, M.; Roy, M.; Mitchell, J. (2005) – “An investigation of the skid resistance of Stone Mastic Asphalt laid on a rural english county road network”. Proceedings of the International Surface Friction Conference: roads and runways, improving safety through assessment and design, Christchurch, Nova Zelândia, 1-4 de Maio de 2005, 16 p.
- BCA (1999) – “Specification for Stone Mastic Asphalt, BCA 9808”. New Zealand Pavement & Bitumen Contractors Association, 1999, pp. 1-10
- Beckedahl, H.J. (2009) – “Influence of modified asphalt mixtures on life cycle costs”. NVF-Seminar - PmB i Asfaltbeläggningar, Estocolmo, Suécia, 29 de Janeiro de 2009. 33 p.
- Bedi, H. (2001) – “Development of statistical wet weather model to evaluate frictional properties at the pavement-tire interface on hot mix asphalt concrete”. Texas, EUA: Texas A&M University, 2001, 308 p. Dissertação de mestrado
- Behbahani, H.; Nowbakht, S.; Fazaeli, H.; Rahmani (2009) – “Effects of fiber type and content on the rutting performance of Stone Matrix Asphalt”. Journal of Applied Sciences. EUA. ISSN 1812-5654. 9:10 (2009), pp. 1980-1984
- Benninghoven (2014) – “Asphalt mixing plant type ECO container sized”. Alemanha: Benninghoven GmbH & Co.KG, 2014, atual. 2014 [Consult. 23.03.2014]. Disponível em [www:<URL:http://www.benninghoven.com/index.php?option=com_content&task=view&id=24&Itemid=43>](http://www.benninghoven.com/index.php?option=com_content&task=view&id=24&Itemid=43)
- Benninghoven (2014) – “Continuous asphalt mixing plants type MKA”. Alemanha: Benninghoven GmbH & Co.KG, 2014, atual. 2014 [Consult. 23.03.2014]. Disponível em [www:<URL:http://www.benninghoven.com/index.php?option=com_content&task=view&id=75&Itemid=73>](http://www.benninghoven.com/index.php?option=com_content&task=view&id=75&Itemid=73)
- Benninghoven (2014) – “Fiber dosing system: fibre dosing unit with integrated cutting gear”. Alemanha: Benninghoven GmbH & Co.KG, 2014, atual. 2014 [Consult. 23.03.2014]. Disponível em [www:<URL:http://www.benninghoven.com/index.php?option=com_content&task=view&id=78&Itemid=76>](http://www.benninghoven.com/index.php?option=com_content&task=view&id=78&Itemid=76)
- Benninghoven (2014) – “Granulate dosing system: Granulate cellulose dosing system for big bag fitted with a pneumatically operated inlet door”. Alemanha: Benninghoven GmbH & Co.KG, 2014, atual. 2014 [Consult. 23.03.2014]. Disponível em [WWW:<URL:http://www.benninghoven.com/index.php?option=com_content&task=view&id=77&Itemid=75>](http://www.benninghoven.com/index.php?option=com_content&task=view&id=77&Itemid=75)
- Bethune, J.; Potter, D.W. (1993) – “Asphalt innovations: overseas experience”. The Earthmover & Civil Contractor. Official Magazine of the Civil Contractors Federation. Sidney, Austrália. ISSN 0314-4224. 31:4 (1993), pp. 46-50
- Bindu, C.S.; Beena, K.S. (2014) – “Influence of additives on the draindown characteristics of Stone Matrix Asphalt mixtures”. International Journal of Research in Engineering and Technology. Índia. ISSN 2321-7308. 03:07 (2014), pp. 83-88
- Blazejowski, K. (2011) – “Stone Matrix Asphalt: Theory and Practice”. 1.^a ed. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. 307 p. ISBN 9781439819715
- Branco, F.C.; Ferreira, M.Q. (2009) – “Levantamento das características dos agregados produzidos em Portugal”. Portugal: Instituto de Infra-estruturas Rodoviárias, 2009

- Breuer, J.V. (1967) – “Testing the Water Sensitivity of Stone Dust Fillers”. Bitumen/Germany. 29:3 (1967), pp. 69-77
- Brown E.R.; Mallick, R.B.; Haddock, J.E.; Bukowski, J. (1997a) – “Performance of Stone Matrix Asphalt paving mixtures (SMA) mixtures in the United States”. Alabama, EUA: National Center for Asphalt Technology, 1997. (Relatório n.º 97-01)
- Brown, E.R. (1992) – “Experience with Stone Matrix Asphalt in the United States”. EUA, Alabama: National Center for Asphalt Technology (NCAT), 1992. (Relatório n.º 93-04)
- Brown, E.R. (1992a) – “Evaluation of SMA used in Michigan (1991)”. Alabama, EUA: National Center for Asphalt Technology (NCAT), 1992. (Relatório n.º 93-03)
- Brown, E.R.; Bassett, C.E. (1990) – “Effects of maximum aggregate size on rutting potential and other properties of asphalt-aggregate mixtures”. Transportation Research Record. EUA, Washington. ISSN 0361-1981. 1259 (1990), pp. 107-119
- Brown, E.R.; Cooley, L.A. (1999) – “Designing Stone Matrix Asphalt mixtures for rut-resistant pavements: part 1: summary of research results; part 2: mixture design method, construction guidelines, and quality control/quality assurance procedures”. Alabama, EUA: National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), 1999. (Relatório n.º NCHRP 425)
- Brown, E.R.; Cooley, L.A.; Lynn, T.A. (1998b) – “Designing Stone Matrix Asphalt mixtures: volume II(c) - research results for phase II”. Alabama, EUA: National Center for Asphalt Technology (NCAT), 1998. (Relatório n.º NCHRP 9-8)
- Brown, E.R.; Haddock, J.E. (1997) – “Method to ensure stone-on-stone contact in SMA paving mixtures”. Alabama, EUA: National Center for Asphalt Technology (NCAT), 1997. (Relatório n.º 97-02)
- Brown, E.R.; Haddock, J.E. (1997) – “Method to ensure stone-on-stone contact in SMA paving mixtures”. EUA, Alabama: National Center for Asphalt Technology, 1997. (Relatório n.º 97-2)
- Brown, E.R.; Haddock, J.E.; Crawford, C. (1996) – “Investigation of Stone Matrix Asphalt mortars”. Transportation Research Record. Washington, EUA. ISSN 0361-1981. 1530 (1996), pp. 95-102
- Brown, E.R.; Haddock, J.E.; Crawford, C.; Hughes, C.S.; Lynn, T.A.; Cooley, L.A.; Mallick, R.B. (1998) – “Designing Stone Matrix Asphalt mixtures: Volume I - Literature review; Volume II(A) - Research results for part 1 of phase I; Volume II(B) - Research results for part 2 of phase I; Volume II(C) - Research results for phase II; Volume III - Summary of research results; Volume IV - Mixture design method, construction guidelines, and quality control procedures; and volume V - Appendix for phase II work”. Alabama e Washington, EUA: National Center for Asphalt Technology (NCAT) e National Cooperative Highway Research Program, 1998. (Relatório n.º NCHRP 9-8 Final Report)
- Brown, E.R.; Haddock, J.E.; Mallick, R.B.; Lynn, T.A. (1997) – “Development of a mixture design procedure for Stone Matrix Asphalt (SMA)”. Alabama, EUA: National Center for Asphalt Technology (NCAT), 1997. (Relatório n.º 97-03)
- Brown, E.R.; Mallick, R.B. (1994) – “Stone Matrix Asphalt – Properties related to mixture design”. Alabama, EUA: National Center for Asphalt Technology (NCAT), 1994. (Relatório n.º 94-02)

- Brown, E.R.; Mallick, R.B. (1995a) – “Laboratory study on draindown of asphalt cement in Stone Matrix Asphalt”. *Transportation Research Record*. Washington, EUA. ISSN 0361-1981. 1513 (1995), pp. 25-38
- Brown, E.R.; Manglorkar, H. (1993) – “Evaluation of laboratory properties of Stone Matrix Asphalt (SMA) mixtures”. Alabama, EUA: National Center of Asphalt Technology, 1994. (Relatório n.º 93-05)
- Brûlé, B.; Le Bourlot, F. (1993) – “Gripfibre”. *Revue Générale des Routes et Aérodrômes*. França. ISSN 0035-3191. 711 (1993)
- Bryant, P. (2005) – “Filler: is it ‘fixing’ your binder?”. *Proceedings of the AAPA Pavements Industry Conference*, Queensland, Austrália, 2005, 14 p.
- Button, J.W.; Chowdhury, A.; Bhasin, A. (2004) – “Design of TxDOT asphalt mixtures using the SuperPave gyratory compactor”. Texas, EUA: Texas Transportation Institute, 2004. (Relatório n.º 0-4203-1)
- Button, J.W.; Chowdhury, A.; Bhasin, A. (2006) – “Recommended resolution to selected hot mix asphalt related issues”. Texas, EUA: Texas Transportation Institute, 2006. (Relatório n.º 0-4203-S)
- Button, J.W.; Epps J.A. (1981) – “Mechanical characterization of fiber-reinforced bituminous concrete”. Texas, EUA: Texas Transportation Institute, 1981. (Relatório n.º 4061-1)
- Brahim, M.A. (2005) – “Laboratory comparison study for the use of Stone Matrix Asphalt in hot weather climates”. *Journal of Construction and Building Materials*. Reino Unido. ISSN 0950-0618. 20:10 (2006), pp. 982-989
- Campbell, C. (1999) – “The use of Stone Mastic Asphalt on aircraft pavements”. Austrália, Deakin: School of Engineering and Technology, Deakin University, 1999. (Relatório n.º SEN713)
- Campen, W.H.; Smith, J.R.; Erickson, L.G.; Mertz, L.R. (1959) – “The relationships between voids, surface area, film thickness and stability in bituminous paving mixtures”. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*. Minneapolis, EUA. ISSN 0270-2932. 28 (1959), pp. 149-178
- CAPA (2002) – “Stone Mastic Asphalt Task Force: Transferring the technology to Colorado and update report”. Stone Mastic Asphalt Workshop, Maryland, EUA, 25-27 de Março de 2002
- CDOT (2004) – “The Stone Matrix Asphalt pavement advantage”. Colorado, EUA: Colorado Asphalt Pavement Association (CDOT), 2004
- Chen, J.S.; Liao, M.C. (2002) – “Evaluation of internal resistance in Hot-Mix Asphalt (HMA) concrete”. *Journal of Construction and Building Materials*. Reino Unido. ISSN 0950-0618. 16:6 (2002), pp. 313-319
- Chen, J.S.; Lin, K.Y. (2005) – “Mechanism and behavior of bitumen strength reinforcement using fibers”. *Journal of Materials Science*. ISSN 0022-2461. 40:1 (2005), pp. 87-95
- Chiu, C.T.; Lu, L.C. (2007) – “A laboratory study on Stone Matrix Asphalt using ground tire rubber”. *Journal of Construction and Building Materials*. Reino Unido. ISSN 0950-0618. 21:5 (2007), pp. 1027-1033

- Clark, T.M.; McGhee, K.K. (2006) – “Commonwealth of Virginia's (USA) implementation of Stone Matrix Asphalt”. Proceedings of the 25th Southern African Transport Conference (SATC 2006), Pretoria, África do Sul, 10-13 de Julho de 2006, Vol.1, pp. 325-334
- Cole, L.C. (2011) – “An aggregate asphalt absorption calculator: A tool for economic evaluation”. Proceedings of the Ohio Transportation Engineering Conference, Ohio, EUA, 25-26 de Outubro de 2011, 21 p.
- Collins, R.; Watson, D.; Johnson, A.M.; Wu, Y. (1997) – “Effect of aggregate degradation on specimens compacted by Superpave Gyrotory Compactor”. Transportation Research Record. Washington, EUA. ISSN 0361-1981. 1590 (1997), pp. 1-9
- Cooley, L.A.; Brown, E.R.; Watson, D.E. (2000) – “Evaluation of OGFC mixtures containing cellulose fibers”. Alabama, EUA: National Center for Asphalt Technology (NCAT), 2000. (Relatório n.º 2000-05)
- Cooley, L.A.; Brown, E.R. (2003) – “Potential of using Stone Matrix Asphalt (SMA) for thin overlays”. Alabama, EUA: National Center for Asphalt Technology (NCAT), 2003. (Relatório n.º 03-01)
- Cooley, L.A.; Hurley, G.C. (2004) – “Potential of using Stone Matrix Asphalt (SMA) in Mississippi”. Alabama, EUA: National Center for Asphalt Technology (NCAT), 2004
- COST 333 (1999) – “COST 333 – Development of new bituminous pavement design method – Final report of the action”. Transport Research, European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research, European Commission, Directorate General Transport, 1999
- Curtis, C.W.; Ensley, E.K.; Epps, J.A. (1993) – “Fundamental properties of asphalt-aggregate interactions including adhesion and adsorption”. Washington, EUA: Strategic Highway Research Program, Transportation Research Board, 1993. (Relatório n.º SHRP-A-341)
- Dietz; Jason, M (1997) – “The use and state of the practice of Stone Matrix Asphalt”. Fevereiro, 1997
- Dong, Y.; Tan, Y. (2011) – “Mix design and performance of crumb rubber modified asphalt SMA”. Proceedings of the GeoHunan International Conference 2011, Hunan, China, 9-11 de Junho de 2011, Vol. 1, pp. 78-86
- Drieschner, L. (2005) – “The German origin of SMA”. Proceedings of the AAPA Pavements Industry Conference, Queensland, Austrália, 2005, 16 p.
- Drieschner, L.; Els, H.; Habermann, U.; Nolle, B.; Rauschenbach, V.; Sadzulewsky, S.; Schellenberger, M.; Schgeiner, H.; Schgeiner, H.; Schmidt, H; Weiland, N. (2006) – “Asphalt surface courses skid resistance”. Alemanha: German Asphalt Association Deutscher Asphaltverband e.V. (DAV), German Construction Industry Federation, German Construction Confederation, 2006, 28 p.
- Drieschner, L.; Schaefer, V. (2005) – “Stone Mastic Asphalt”. Alemanha: German Asphalt Association Deutscher Asphaltverband e.V. (DAV), 2005
- Dukat, E.L.; Anderson D.A. (1980) – “The effect of various fillers on the mechanical behavior of asphalt and asphaltic concrete”. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT). Minneapolis, EUA. ISSN 0270-2932. 49 (1980), pp. 530-549

- EAPA (1998) – “Heavy Duty Surfaces: The arguments for SMA”. Breukelen, Holanda: European Asphalt Pavement Association, 1998
- EAPA (2007) – “Long-life asphalt pavements – Technical version”. Breukelen, Holanda: European Asphalt Pavement Association, 2007
- EAST (1990) – “European Asphalt Study Tour”. Washington, EUA: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1990
- Eick, J.M.; Shook, J.F. (1978) – “The effects of baghouse fines on asphalt mixtures”. Maryland, EUA: Asphalt Institute, 1978. (Relatório n.º 78-3)
- Epps, J.A.; Monismith, C.L. (1972) – “Fatigue of asphalt concrete mixtures – Summary of existing information”. EUA: American Society for Testing and Materials Special Technical Publication, 1972. (Relatório n.º 38807S)
- Fernandes, J.L.; Roque, R.; Tia, M.; Casanova, L. (2000) – “Evaluation of un-compacted void content of fine aggregate as a quality indicator of materials used in Superpave mixtures”. Transportation Research Record. Washington, EUA. ISSN 0361-1981. 1723 (2000) 37-44
- Fiberand (2014) – “Fiberand cellulose road fibers (C#200)”. EUA: Fiberand, Inc., 2014, atual. 2014 [Consult. 23.03.2014]. Disponível em [www:<URL:http://www.fiberand.com/index.html>](http://www.fiberand.com/index.html)
- Fletcher, T.; Chandan, C.; Masad, E.; Sivakumar, K. (2003) – “Aggregate imaging system for characterizing the shape of fine and coarse aggregates”. Transportation Research Record. Washington, EUA. ISSN 0361-1981. 1832 (2003), pp. 67-77
- Gandhi, T.S.; Akisetty, C.; Amirhanian, S.N. (2009) – “Laboratory evaluation of warm asphalt binder aging characteristics”. International Journal of Pavement Engineering. EUA. ISSN 1029-8436. 10:5 (2009), pp. 353-359
- Gardete, D.C. (2016) – “Contribuição para o estabelecimento duma mistura betuminosa adequada para o ciclo de vida através da definição na fase de formulação duma parametrização eficiente”. Lisboa, Portugal: Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2016. 336 p. Tese de Doutoramento
- Gatchalian, D.; Masad, E.; Chowdhury, A.; Little, D. (2006) – “Characterization of aggregate resistance to degradation in Stone Matrix Asphalt mixtures”. Texas, EUA: International Center for Asphalt Research, 2006. (Relatório n.º 204-1S)
- Gierhart, D. (2007) – “Analysis of Oklahoma mix designs for the National Center for Asphalt Technology test track using the Bailey method: Practical approaches to hot-mix asphalt mix design and production quality control testing”. Transportation Research Circular. EUA. ISSN 0097-8515. E-C124 (2007), pp. 33-44
- Goode, J.F.; Lufsey, L.A. (1965) – “Voids, permeability, film thickness vs. asphalt hardening”. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT). Minneapolis, EUA. ISSN 0270-2932. 34 (1965), pp. 430-463
- Haddock, J.E.; Liljedahl, B.; Kriech, A.J.; Huber, G.A. (1993) – “Stone Matrix Asphalt: Application of European design concepts in North America”. Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association, Fredericton, Canadá, Novembro de 1993, pp. 183-209

- Hannant, L. (1994) – “Fibre-reinforced cements and concretes”. *Construction Materials: Their nature and behavior*, E & FN Spon., Londres, Reino Unido. (1994), pp. 359-364
- Harris, B.M.; Stuart, K.D. (1995) – “Analysis of mineral fillers and mastics used in Stone Matrix Asphalt”. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*. Minneapolis, EUA. ISSN 0270-2932. 64 (1995), pp. 54-95
- Hassan, H.F.; Al-Oraimi, S.; Taha, R. (2005) – “Evaluation of open-graded friction course mixtures containing cellulose fibers and styrene butadiene rubber polymer”. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Reston, EUA. ISSN 0899-1561. 17:4 (2005), pp. 416-422
- Huang, E.Y.; Grisham, D.A. (1972) – “Effect of geometric characteristics of aggregates on the fatigue response of bituminous paving mixtures”. EUA: American Society for Testing and Materials Special Technical Publication, 1972 (Relatório n.º 38813S)
- Huber, G.A.; Jones, J.C.; Messersmith, P.A.; Jackson, N.M. (1998) – “Contribution of fine aggregate angularity and particle shape to Superpave mixture performance”. *Transportation Research Record*. Washington, EUA. ISSN 0361-1981. 1609 (1998), pp. 28-35
- Huseyin, A. (2011) – “Rheological properties of cellulose fibre modified bitumen”. *Engineering Science & Technology, an International Journal*. Turquia. ISSN 2215-0986. 14:2 (2011), pp. 59-66
- IARC (2002) – “IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Volume 81: Man-made vitreous fibres”. França, Lion: International Agency for Research on Cancer Press, 2002. 385 p. ISSN 1017-1606
- Ishai, I.; Sousa, J.B.; Gregory, S. (2011) – “Activated minerals as binder stabilizers in SMA paving mixtures”. *Proceedings of the Transportation Research Board 90th Annual Meeting*, Washington, EUA, 23-27 de Janeiro de 2011, 17 p.
- Jacobs, M.M.; Voskuilen, J.L. (2004) – “Description of a volumetric type testing and FPC procedure for SMA to prevent premature permanent deformation”. *Proceedings of the International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements*, Alabama, EUA, 7-9 de Junho, pp. 649-662
- JRS, Rettenmaier (2005) – “Manual de aplicação SMA com Viatop, Parte 2: Fabricação”. Alemanha: JRS Rettenmaier & Söhne, 2005
- JRS, Rettenmaier (2005a) – “Manual de aplicação SMA com Viatop, Parte 3: Aplicação e compactação”. Alemanha: JRS Rettenmaier & Söhne, 2005
- JRS, Rettenmaier (2007) – “The use of cellulose fibers in SMA: the mixing time with Viatop”. Alemanha: JRS Rettenmaier & Söhne, 2007
- JRS, Rettenmaier (2009) – “Parte II, Mezclas de alta durabilidad: Fibras para la construcción de carreteras”. Alemanha: JRS Rettenmaier & Söhne, 2009
- JRS, Rettenmaier (2012) – “SMA regulations”. Alemanha: JRS Rettenmaier & Söhne, 2012, atual. 2012 [Consult. 02.01.2012]. Disponível em [www:<URL:http://www.sma-viatop.com/cgi-bin/wPermission.cgi?file=/SMAviatop_engl/regelwerke/viele_koeche.shtml?navid=21>](http://www.sma-viatop.com/cgi-bin/wPermission.cgi?file=/SMAviatop_engl/regelwerke/viele_koeche.shtml?navid=21)

- JRS, Rettenmaier (2014) – “Viatop plus AD 10: The added value product range for modified asphalt mixtures”. Alemanha: JRS Rettenmaier & Söhne, 2014, atual. 2014 [Consult. 23.03.2014]. Disponível em [www.<URL:http://www.sma-viatop.com/wEnglisch/PDF/ViatopPlus_AD10_GB_090211.pdf>](http://www.sma-viatop.com/wEnglisch/PDF/ViatopPlus_AD10_GB_090211.pdf)
- JRS, Rettenmaier (2014a) – “Viatop plus CT 40: The added value product range for modified asphalt mixtures”. Alemanha: JRS Rettenmaier & Söhne, 2014, atual. 2014 [Consult. 23.03.2014]. Disponível em [www.<URL:http://www.sma-viatop.com/wEnglisch/PDF/ViatopPlus_CT40_GB_090210.pdf>](http://www.sma-viatop.com/wEnglisch/PDF/ViatopPlus_CT40_GB_090210.pdf)
- Kalcheff, I.V.; Tunnicliff, D.G. (1982) – “Effects of crushed stone aggregate size and shape on properties of asphalt concrete”. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*. Minneapolis, EUA. ISSN 0270-2932. 51 (1982), pp. 453-474
- Kandal, P.S.; Lynn, C.Y.; Parker, F. (1998) – “Characterization tests for mineral fillers related to performance of asphalt paving mixtures”. Alabama, EUA: National Center for Asphalt Technology (NCAT), 1998. (Relatório n.º 98-02)
- Kandhal, P.S. (1981) – “Evaluation of baghouse fines in bituminous paving mixtures”. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*. Minneapolis, EUA. ISSN 0270-2932. 50 (1981), pp. 150-210
- Kandhal, P.S.; Khatri, M.A. (1992) – “Relating asphalt absorption to properties of asphalt cement and aggregates”. Alabama, EUA: National Center for Asphalt Technology (NCAT), 1992. (Relatório n.º 92-02)
- Kandhal, P.S.; Lynn, C.Y.; Parker, F. (1998) – “Characterization tests for mineral fillers related to performance of asphalt paving mixtures”. Alabama, EUA: National Center for Asphalt Technology (NCAT), 1998. (Relatório n.º 98-02)
- Karakouzian, M.; Dunning, M.R.; Dunning, R.L.; Stegeman, J.D. (1996) – “Performance of hot mix asphalt using coarse and skip graded aggregates”. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Reston, EUA. ISSN 0899-1561. 8:2 (1996), pp. 101-107
- Karnemaat, R.J.; Vreibel, D.J.; Van Deusen, C.H. (1993) – “Stone Matrix Asphalt: introduction of loose cellulose fibers into drum mix plants”. *Transportation Research Record*. Washington, EUA. ISSN 0361-1981. (1993)
- Kast, O.E. (1985) – “Long term experience with Splittmastixasphalt in the Federal Republic of Germany - Bitumen, flexible and durable”. *Proceedings of the 3rd Eurobitume Symposium*, Haia, Holanda, 11-13 de Setembro de 1985, pp. 175-177
- Khandal, P.S.; Chakraborty, S. (1996) – “Effect of asphalt film thickness on short and long term aging of asphalt paving mixtures”. Alabama, EUA: National Center for Asphalt Technology (NCAT), 1998. (Relatório n.º 96-01)
- Kim, Y.R.; Kim, N.; Khosla, N.P. (1992) – “Effects of aggregate type and gradation on fatigue and permanent deformation of asphalt concrete”. West Conshohocken, EUA: American Society for Testing and Materials, 1992. (Relatório n.º 24225S)

- Kim, Y.R.; Little, D.N. (2005) – “Development of specification-type tests to assess the impact of fine aggregate and mineral filler on fatigue damage”. Texas, EUA: Texas Department of Transportation e Federal Highway Administration, 2001. (Relatório n.º FHWA/TX-05/0-1707-10)
- Kumar, P.; Chandra, S.; Bose, S. (2007) – “Laboratory Investigations on SMA mixes with different additives”. *International Journal of Pavement Engineering*. Reino Unido. ISSN 1029-8436. 8:1 (2007), pp. 11-18
- Kwame, E.O. (2006) – “Fatigue resistance of Hot-Mix Asphalt Concrete (HMAC) mixtures using the Calibrated Mechanistic with Surface Energy (CMSE) measurements approach”. Texas, EUA: Texas A&M University, 2001, 110 p. Dissertação de mestrado
- Lanchas, S. (1999) – “Características del Stone Mastic Asphalt SMA”. Congresso Iber-Latinoamericano del asfalto – 10.º CILA”, Sevilha, Espanha, 1-6 de Novembro de 1999, Vol. 1, pp. 727-730
- Larsen, O. (1957) – “Development and use of high pressure apparatus for determining voids in compacted bituminous concrete mixtures”. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*. Minneapolis, EUA. ISSN 0270-2932. 26 (1957), pp. 282-317
- Leal, C.L.D. (2013) – “Aproveitamento do bagaço de cana de açúcar em misturas asfálticas”. Niterói, Brasil: Universidade Federal Fluminense, 2013. 220 p. Tese de doutoramento
- Lesueur, D.; Little, D.N. (1999) – “Effect of hydrated lime on rheology, fracture and ageing of bitumen”. *Transportation Research Record*. Washington, EUA. ISSN 0361-1981. 1661 (1999), pp. 93-105
- Little, D.N.; Petersen, J.C. (2005) – “Unique effects of hydrated lime filler on the performance-related properties of asphalt cements: physical and chemical interactions revisited”. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Reston, EUA. ISSN 0899-1561. 17:2 (2005), pp. 207-218
- Little, D.N.; Button, J.; Jayawickrama, P.; Solaimanian, M.; Hudson, B. (2001) – “Literature review for long-term research on bituminous coarse aggregate”. Texas, EUA: Texas Department of Transportation e Federal Highway Administration, 2001. (Relatório n.º FHWA/TX-01/0-1707-1)
- Ljubic, A.; Prosen, J. (2004) – “Resistance to permanent deformations in relation to asphalt mix composition”. *Proceedings of the 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Viena, Áustria, 12-14 de Maio de 2004, Vol. 2, pp. 1669-1678
- Lord, B.N. (2004) – “Building a better mousetrap”. *Public Roads*. ISSN 0033-3735. 67:6 (2004), pp. 28-34
- Louw, L.; Semmelink, C.J.; Verhaeghe, B.M. (1997) – “Development of a stone mastic asphalt design method for South African conditions”. *Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt pavements*, Seattle, EUA, 10-14 de Agosto de 1997, Vol. 1, pp. 535-554
- Ma, T.; Wang, Z.; Zhao, Y. (2011) - “Degradation behavior of aggregate skeleton in stone matrix asphalt mixture”. *Journal of Central South University of Technology*, China. ISSN 1005-9784, 18:6 (2011) pp. 2192-2200
- Maccarrone, S.; Ky, A.V.; Gnanaseelan, G.P. (1997a) – “Permanent deformation and fatigue properties of polymer modified asphalt mixes”. *Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements*, Seattle, EUA, 10-14 de Agosto de 1997, Vol. 2, pp. 1545-1554

- Maccarrone, S.; Rebbechi, J.; Ky, A. (1997) – “Evaluation of Stone Mastic Asphalt performance”. Proceedings of the AAPA International Flexible Pavements Conference, Perth, Western Australia, 16-20 de Novembro de 1997, Artigo n.º 5, 11 p.
- Mahmoud, E.M. (2005) – “Development of experimental methods for the evaluation of aggregate resistance to polishing, abrasion, and breakage”. Texas, EUA: Texas A&M University, 2001, 134 p. Dissertação de mestrado
- Mahrez, A.; Karim, M.R. (2007) – “Rutting characteristics of bituminous mixes reinforced with glass fiber”. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. Tóquio, Japão. ISSN 1341-8521. 7 (2007), pp. 2168-2178
- Martinho, F.; Lanchas, S.; Nunez, R.; Batista, F.; Miranda, H. (2013) – “A experiência portuguesa em misturas do tipo SMA com fibras celulósicas”. VII Congresso Rodoviário Português, Estrada 2013, LNEC, Portugal, de 10 a 12 de Abril de 2013, pp. 405-415
- Masad, E. (2003) – “The Development of a Computer Controlled Image Analysis System for Measuring Aggregate Shape Properties”. Washington, EUA: Transportation Research Board, 2003. (Relatório n.º NCHRP-IDEA Project 77)
- Masad, E.; Al-Rousan, T.; Button, J.; Little, D.; Tutumluer, E. (2005) – “Test Methods for Characterizing Aggregate Shape, Texture and Angularity”. Washington, EUA: Transportation Research Board, 2005. (Relatório n.º NCHRP 555)
- Masad, E.; Olcott, D.; White, T.; Tashman, L. (2001) – “Correlation of fine aggregate imaging shape indices with asphalt mixture performance”. Transportation Research Record. Washington, EUA. ISSN 0361-1981. 1757 (2001), pp. 148-156
- Mashaan, N.S.; Ali, A.H.; Koting, S.; Karim, M.R. (2013) – “Performance evaluation of crumb rubber modified Stone Mastic Asphalt pavement in Malaysia”. Journal of Advances in Materials Science and Engineering. 2013 (2013) 8 p., atual. Maio 2013. [Consult. 16.03.2014]. Disponível em WWW:<URL: file:///E:/Users/Utilizador/Downloads/304676.pdf>
- Mathias, L.F.; Silva, P.; Edel, G.; Motta, L.; Nascimento, L.A. (2003) – “Asphalt rubber in Brazil: Pavement performance and laboratory study”. Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia, Brazil, 2-4 de Dezembro de 2003
- Maurer, D.A.; Malasheskie, G.J. (1989) – “Field performance of fabrics and fibers to retard reflective cracking”. Journal of Geotextiles and Geomembranes. Reino Unido. ISSN 0266-1144. 8:3 (1989), pp. 239-267
- McDaniel, P. (1992) – “Stone Mastic Asphalt: Missouri’s experimental project using european technology”. Missouri, EUA: Missouri Highway and Transportation Department, 1992. (Relatório n.º Mo91-05)
- McGhee, K.K.; Clark, T.M.; Reid, R.A. (2005) – “Final report: A performance baseline for Stone Matrix Asphalt”. Virgínia, EUA: Virginia Transportation Research Council, 2005. (Relatório n.º VTRC 06-R3)
- Meng, L.K.; Yunfen, Q. (2007) – “A study on the internal aggregate packing of stone mastic asphalt (SMA)”. Road and Transport Research, Austrália. ISSN 1037-5783. 16:2 (2007), pp. 19-28

- Miranda, H.M.B. (2008) – “Resistência à fadiga de misturas betuminosas com betume modificado com alta percentagem de borracha”. Portugal: Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2008, 185 p. Dissertação de mestrado
- Mogawer, W.S.; Stuart, K.D. (1995) – “Effect of coarse aggregate content on Stone Matrix Asphalt rutting and draindown”. Transportation Research Record. Washington, EUA. ISSN 0361-1981. 1492 (1995), pp. 1-11
- Moghaddam, T.B.; Karim, M.R.; Syammaun, T. (2012) – “Dynamic properties of Stone Mastic Asphalt mixtures containing waste plastic bottles”. Journal of Construction and Building Materials. Reino Unido. ISSN 0950-0618. 34 (2012), pp. 236-242
- Mollenhauer, K. (2007) – “Fatigue properties in 4PB and swelling tensile test of Stone Mastic Asphalts with various modified binders”. European 4PB Workshop, Delft, Holanda, 8 de Março de 2007. 17 p.
- Muniandy, R.; Bujang, B.K.H. (2006) – “Laboratory diametral fatigue performance of Stone Matrix Asphalt with cellulose oil palm fiber”. American Journal of Applied Sciences. EUA. ISSN 1546-9239. 3:9 (2006), pp. 2005-2006
- NAPA (1994) – “Guidelines for materials, production, and placement of Stone Matrix Asphalt (SMA)”. Virgínia, EUA: National Asphalt Pavement Association, 1994. (Relatório n.º IS 118)
- NAPA (1999) – “Designing and constructing Stone Matrix Asphalt (SMA) mixtures: State-of-the-practice”. Virgínia, EUA: National Asphalt Pavement Association, 1999. (Relatório n.º QIP-122)
- Nicholls, J.C. (1998) – “Asphalt surfacings: A guide to asphalt surfacings and treatments used for the surface course road pavements”. 1.ª ed. Londres: E & FN SPON, 1998. 408 p. ISBN 0419231102
- Noor, M.J.M.M.; Omar, H. (2001) – “Utilising Malaysian fibre in Stone Mastic Asphalt as a replacement of imported fibre”. Pertanika Journal of science & Technology. Serdang, Malásia. ISSN 0128-7680. 9:1 (2001), pp. 51-57
- OECD (2005) – “Economic evaluation of long-life pavements – Phase 1”, França, Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2005. (Relatório n.º OECD 2005)
- OPSS (2004) – “Material specification for Superpave and Stone Mastic Asphalt mixtures”. Ontario Provincial Standard Specification, 2004
- PANK, H. (1995) – “Finnish Asphalt Specifications”. Finnish Pavement Technology Advisory Council, 1995
- Pashula, C. (2005) – “Implementation of SMA (stone mastic asphalt) in Australia”. Asphalt Review. Austrália. ISSN 0727-0003. 24:3 (2005), pp. 13-18
- Pell, P.S.; Cooper, K.E. (1975) – “The effect of testing and mix variables on the fatigue performance of bituminous materials”. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT). Minneapolis, EUA. ISSN 0270-2932. 44 (1975), pp. 1-37
- Peltonen, P. (1991) – “Wear and deformation characteristics of fibre reinforced pavements”. Journal of Construction and Building Materials. Reino Unido. ISSN 0950-0618. 5:1 (1991), pp. 18-22

- Pereira, P.A.A.; Pais, J.C.; Freitas, E.F.; Silva, H.M.D.; Oliveira, J.R.M. (2007) – “A reabilitação da rede rodoviária no século XXI – A contribuição da inovação para uma Visão Global da Reabilitação Rodoviária”. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, ISSN 0873-1152.28
- Petersen, J.C. (1984) – “Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability - state of the art”. Transportation Research Record. EUA, Washington. ISSN 0361-1981. 999 (1999), pp. 13-30
- Pimentel, C.A. (2013) – “Formulação de misturas betuminosas a quente contribuição para um novo método de formulação”. Lisboa, Portugal: Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Faculdade de Engenharia, 2013. 94 p. Dissertação de mestrado
- Prowell, B.D.; Cooley, L.A.; Schreck, R.J. (2002) – “Virginia’s experience with 9.5 mm NMAS SMA”. Transportation Research Record. Washington, EUA. ISSN 0361-1981. 1813 (2002), pp. 133-141
- Prowell, B.D.; Watson, D.E.; Hurley, G.C.; Brown, E.R. (2009) – “Evaluation of Stone Matrix Asphalt (SMA) for airfield pavements”. Alabama, EUA: National Center for Asphalt Technology (NCAT), 2009. (Relatório n.º AAPTP 04-04)
- Putman, B.J.; Amirkhanian, S.N. (2004) – “Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures”. Journal of Resources, Conservation and Recycling. Reino Unido. ISSN 0921-3449. 42:3 (2004), pp. 265-274
- Puzinauskas, V.P. (1964) – “Influence of Mineral Aggregate Structure on Properties of Asphalt Paving Mixtures”. Highway Research Record. EUA, Washington. 51 (1964), pp. 1-18
- Puzinauskas, V.P. (1968) – “Filler in asphalt mixtures”. Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association. Québec, Canadá. 13 (1968), pp. 97-125
- QTMR (2010) – “Fixed and free binder in asphalt, test method Q321”. Brisbane, Queensland: Department of Transport and Main Roads, 2010
- Racanel, C.; Burlacu, A. (2013) – “Influence of fiber type on Stone Mastic Asphalt behavior”. Proceedings of the 4th European Conference of Civil Engineering, Antália, Turquia, 8-10 de Outubro de 2013, Vol.1, pp. 116-121
- Rao, S.K.; Sen, B.R. (1973) – “Evaluation of mineral fillers for asphalt paving mixtures”. Highway Research Record. EUA. 468 (1973), pp. 100-108
- Reagel, F.V. (1937) – “Absorption of liquid bituminous material by coarse aggregate”. Highway Research Abstracts, 40 (1937), pp. 5-6
- Richter, E. (1991) – “Vergleichende untersuchungen an stabilisierenden zustzen fr Splittmastixasphalt bitumen”. 2:91 (1991) 69 p.
- Rigden, P.J. (1947) – “The use of fillers in bituminous road surfacings. A study of filler-binder systems in relation to filler characteristics”. Journal of the Society of Chemical Industry. Reino Unido. ISSN 1934-9971. 66:9 (1947), pp. 299-309
- Roberts, F.L.; Kandhal, P.S.; Brown, E.R.; Lee, D.Y.; Kennedy, T.W. (1996) – “Hot mix asphalt materials, mixture design and construction”. Maryland, EUA: National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation (1996)

- Roberts, F.L.; Mohammad, L.N.; Wang, L.B. (2002) – “History of hot mix asphalt mixture design in the United States”. *Journal of Materials in Civil Engineering*. EUA, Reston. ISSN 0899-1561. 14:4 (2002), pp. 279-293
- Samanos, J.; Serfass, J.P.; Basin, G.; Rieunier, J.B. (1991) – “Expérimentation d’une nouvelle fibre pour enrobes bitumineux”. *Revue générale des routes et aérodromes*. França. ISSN 0035-3191, 691 (1991), pp. 68-71
- Schellenberger, W. (2002) – “Beurteilung der Eignung unterschiedlicher fueller fuer den asphaltstrassenbau”. *Bitumen/Germany*. 64:1 (2002), pp. 6-13
- Scherocman, J.A. (1997) – “The construction and performance of Stone Mastic Asphalt pavements in the United States”. *Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements*, Seattle, EUA, 10-14 de Agosto de 1997, Vol. 1, pp. 525-534
- Schmiedlin, R.B.; Bischoff, D.L. (2002) – “Stone Matrix Asphalt The Wisconsin Experience”. Wisconsin, EUA: Wisconsin Department of Transportation, 2002. (Relatório n.º WI/SPR-02-02)
- Schneider, B. (2000) – “Stone Mastic Asphalt: Pavement technology for the new millennium”. Alemanha: Road Construction Division, Rettenmaier & Sohne, 2000
- Schreck, R.J. (2004) – “True grit: white SMA? Yes - and it's skid-resistant, too”. *Hot Mix Asphalt Technology*. Gainsville, EUA. 9:1 (2004), pp. 45-48
- Schrimsher, T. (1976) – “Baghouse dust and its effect on asphaltic mixtures”. Califórnia, EUA: California Department of Transportation, 1976. (Relatório n.º CA-DOT-TL-3140-1-76-50)
- Schünemann, M. (2007) – “Faserqualität. Eine wesentliche Voraussetzung zum Herstellen von qualitätsgerechten Asphaltbefestigungen”. *Proceedings of the Rettenmaier Seminar Esema'07*, Zakopane, Polónia, 2007
- Serfass, J.P.; Samanos J. (1996) – “Fiber-modified asphalt concrete characteristics, applications and behavior”. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*. Minneapolis, EUA. ISSN 0270-2932. 65 (1996), pp. 193-230
- Sharma, B.M.; Kamaraj, C. (2008) – “Construction and performance evaluation of experimental sections laid on urban roads using Stone Matrix Asphalt mixtures”. *Proceedings 23rd ARRB Conference: Research partnering with practitioners*, Adelaide, Austrália, 30 de Julho a 1 de Agosto de 2008, 14p.
- Sharma, V.; Goyal, S. (2006) – “Comparative study of performance of natural fibers and crumb rubber modified stone matrix mixtures”. *Canadian Journal of Civil Engineering*. Canadá. 33:2 (2006), pp. 134-139
- Sharp, K.G. (1996) – “Rut-resistant properties of asphalt mixes under accelerated loading: Final summary report”. Vermont South, Austrália: ARRB Transport Research Limited e Research Report ARR, 1996 (Relatório n.º 17/ARR 287)
- Shashidhar, N.; Gopalakrishnan, K. (2006) – “Evaluating the aggregate structure in hot-mix asphalt using three-dimensional computer modeling and particle packing simulations”. *Canadian Journal of Civil Engineering*. Canadá. 33:2 (2006), pp. 945-954
- Shell (2015) – “The Shell bitumen handbook”. Sixth Edition, Thomas Telford Publishing, London, UK

- SHRP (1994) – “Fatigue response of asphalt-aggregate mixes”. Washington, EUA: Strategic Highway Research Program, Transportation Research Board, 1994. (Relatório n.º SHRP-A-404)
- STAEL, G.C. (1997) – “Preparação de Materiais Compósitos de Bagaço de Cana de Açúcar e Caracterização por Propriedades Mecânicas e RMN no Estado Sólido”. Rio de Janeiro, Brasil: Universidade Estadual do Norte Fluminense, 1997. 160 p. Tese de doutoramento
- Stephenson, G.; Bullen, F. (2001) – “Investigating the design and fatigue performance of Stone Mastic Asphalt”. Proceedings of the AAPA Pavements Industry Conference, Queensland, Austrália, 2001, 25 p.
- Stephenson, G.; Bullen, F. (2002) – “The design, creep and fatigue performance of Stone Mastic Asphalt”. Proceedings of the 9th International Conference on Asphalt Pavements, Copenhaga, Dinamarca, 17-22 de Agosto de 2002, 19 p.
- Stuart, K.D. (1992) – “Stone Mastic Asphalt (SMA) Mixture Design”. Virginia, EUA: Federal Highway Administration, 1992. (Relatório n.º FHWA-RD-92-006)
- Stuart, K.D.; Malmquist, P. (1994) – “Evaluation of using different Stabilizers in the U.S. route 15 (Maryland) Stone Matrix Asphalt”. Transportation Research Record. Washington, EUA. ISSN 0361-1981. 1454 (1994), pp. 48-57
- Stuart, K.D.; Mogawer, W.S. (1995) – “Effect of coarse aggregate content on Stone Matrix Asphalt durability and low temperature cracking”. Transportation Research Record. Washington, EUA. ISSN 0361-1981. 1492 (1995), pp. 26-35
- Suchismita, A. (2009) – “A Study of effects of binder quality and natural fiber on Stone Matrix Asphalt mixtures”. Índia, Rourkela: National Institute of Technology, 2009. 125 p. Dissertação de Mestrado
- Sukhwani, R.; Little, D.; Masad, E. (2006) – “Sensitivity of HMA performance to aggregate shape measured using conventional and image analysis methods”. Texas, EUA: Texas Transportation Institute, 2006. (Relatório n.º 0-1707-5)
- Tapkin, S. (2007) – “The effect of polypropylene fibers on asphalt performance”. Journal of Building and Environment. Reino Unido. ISSN 0360-1323. 43:6 (2008), pp. 1065-1071
- Tunnicliff, D.G. (1967) – “Binding effects of mineral filler”. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT). Minneapolis, EUA. ISSN 0270-2932. 36 (1967), pp. 114-156
- Tutumluer, E.; Pan, T.; Carpenter, S.H. (2005) – “Investigation of aggregate shape effects on hot mix performance using an image analysis approach”. Ilínois, EUA: Federal Highway Administration, 2005. (Relatório n.º TPF-5 023)
- UFC (2001) – “Standard practice manual for flexible pavements”. EUA: Department of defense of United States of America, 2001. (Relatório n.º UFC 3-250-03)
- USACE (2008) – “Stone Matrix Asphalt (SMA) for airfield pavements, section 32-13-17”. Unified Facilities Guide Specifications, UFGS-32 13 17, 2008, 35 p.
- Vale, A.C. (2007) – “Estudo laboratorial da viabilidade do uso de fibras de coco em misturas asfálticas do tipo SMA”. Ceará, Brasil: Universidade Federal do Ceará, 2007. 147 p. Dissertação de Mestrado

- van de Ven, M.F.C.; Voskuilen, J.L.M.; Tolman, F. (2003) – “The spatial approach of hot mix asphalt”. Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, Zurique, Suíça, 14-16 de Abril de 2003, Vol. 1, pp. 264-270
- Vavrik, W.R. (2000) – “Asphalt mixture design concepts to develop aggregate interlock”. EUA: University of Illinois, 2000. 189 p. Tese de doutoramento
- Vavrik, W.R.; Huber, G.; Pine, W.J.; Carpenter, S.H.; Bailey, R. (2002) – “Bailey method for gradation selection in hot-mix asphalt mixture design”. Washington, EUA: Transportation Research Board, 2002. (Relatório n.º E-C044)
- Vavrik, W.R.; Pine, W.J.; Huber, G.A.; Carpenter, S.H.; Bailey, R. (2001) – “The Bailey method of gradation evaluation: The influence of aggregate gradation and packing characteristics on voids in the mineral aggregate”. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT). Minneapolis, EUA. ISSN 0270-2932. 70 (2001), pp. 132-175
- VDOT (2002) – “Special Provision for Stone Matrix Asphalt (SMA)”. Virginia Department of Transportation, Richmond, VA 2002
- VDOT (2011) – “Section 605 - Asphalt Concrete Mix Selection Guidelines”. Virginia Department of Transportation, Richmond, VA 2011
- Von Quintus, H.L.V.; Scherocman, J.A.; Hughes, C.S.; Kennedy, T.W. (1991) – “Asphalt-Aggregate Mixture Analysis System (AAMAS)”. Washington, EUA: Transportation Research Board, 1991. (Relatório n.º 338)
- Voskuilen, J. (2000) – “Ideas for a volumetric mix design method for Stone Mastic Asphalt”. Proceedings of the 6th International Conference Durable and Safe Pavements, Kielce, Polónia, 9-10 de Maio de 2000, 13 p.
- VTI; Chalmers (2007) – “Appendix 3: Possibilities to reduce noise emission from the tyre/road interaction with emphasis on the Swedish situation”. Suécia: Swedish Road and Transport Research Institute (VTI) e Chalmers University of Technology, 2007
- Wang, D. (2007) – “Binder film thickness effect on aggregate contact behavior”. Virginia, EUA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007. 66 p. Dissertação de mestrado
- Watson, D.E.; Masad, E.; Moore, K.A.; Williams, K.; Cooley, L.A. (2004) – “Verification of VCA testing to determine stone-on-stone contact of HMA mixtures”. Transportation Research Record. Washington, EUA. ISSN 0361-1981. 1891 (2004), pp. 182-190
- West, R.C.; James, R.S. (2005) – “Determining Ndesign for SMA mixtures in Alabama”. Alabama, EUA: Alabama Department of Transportation e National Center for Asphalt Technology (NCAT), 2005. (Relatório n.º 930-584)
- West, R.C.; Moore, J.R. (2006) – “Evaluating Georgia DOT's Compaction Requirements for Stone Matrix Asphalt Mixes”. Auburn, EUA: Federal Highway Administration, 2006. (Relatório n.º FHWA-GA-06-2036)
- West, R.C.; Moore, J.R.; Jared, D.M.; Wu, P.Y. (2007) – “Evaluating Georgia's compaction requirements for Stone Matrix Asphalt mixtures”. Transportation Research Record. Washington, EUA. ISSN 0361-1981. 1813 (2007), pp. 93-101

- Woodside, A.R.; Woodward, W.D.H.; Akbulut, H. (1998) – “Stone mastic asphalt: assessing the effect of cellulose fibre additives”. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Municipal Engineer, Setembro de 1998, Vol.127, pp. 103-108
- Woodward, W.D.; Woodside, A.R.; Jellie, J.H. (2005) – “Early and mid life SMA skid resistance”. Proceedings of the International Surface Friction Conference: roads and runways, improving safety through assessment and design, Christchurch, Nova Zelândia, 1-4 de Maio de 2005, 10 p.
- Woodward, W.D.; Woodside, A.R.; O'Prey, D. (2004) – “Predictiong the performance of surface properties”. Journal of the Institute of Asphalt Technology. EUA. 12 (2004), pp. 4-8
- WSDOT (2000) – “Stone Matrix Asphalt (SMA)”. Technotes: Materials Laboratory. Washington, EUA: Whashington State Department of Transportation, 2000
- Wu, S.; Ye, Q.; Li, N.; Yue, H. (2007) – “Effects of fibers on the dynamic properties of asphalt mixtures”. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition. China. ISSN 1000-2413. 22:4 (2007), pp. 733-736
- Yao, Z.; Monismith, C.L. (1986) – “Behavior of asphalt mixtures with carbon black reinforcement”. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT). Minneapolis, EUA. ISSN 0270-2932. 55 (1986), pp. 564-585
- Ye, Q.; Wu, S. (2009) – “Rheological properties of fiber reinforced asphalt binders”. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences. Índia. ISSN 0971-4588. 16:2 (2009), pp. 93-99
- Yu, H. (2012) – “Design and characterization of asphalt mixtures based on particle packing and mechanical modeling”. Washington, EUA: Universidade de Washington, 2012. 425 p. Tese de doutoramento
- Zichner G. (1974) – “Wearing courses of stone and mastic on pavements”. Strabag Bau-A.G., Patente EUA n.º 3797951

ANEXOS

ANEXO I – Pesquisa bibliográfica

ANEXO I-A

Quadro I-A.1 – Área total de misturas SMA aplicadas entre 1995 e 2009 e respetivo número de toneladas fabricadas e aplicadas (EAPA, 1995 a 2009)

País	Área total aplicada entre 1995 e 2009 (milhões de m ²)	Misturas fabricadas e aplicadas (milhões de toneladas)
Alemanha	369,5	36,21
Áustria	89,3	8,75
Bélgica	81,2	7,96
Croácia	21,0	2,05
Dinamarca	36,2	3,54
Eslováquia	3,5	0,34
Eslovénia	10,0	0,98
Espanha	98,3	9,63
Estónia	3,9	0,38
Finlândia	19,6	1,92
Grécia	0,1	0,01
Holanda	85,9	8,42
Hungria	9,4	0,92
Irlanda	10,7	1,05
Islândia	0,3	0,03
Itália	15,0	1,47
Lituania	3,5	0,34
Luxemburgo	1,4	0,14
Noruega	18,6	1,82
Polónia	90,1	8,83
República Checa	41,7	4,09
Roménia	62,0	6,08
Suécia	178,0	17,44
Turquia	8,6	0,84
EUA	≈ 460,0	≈ 45,00 ¹⁾
Israel	0,5	0,05
Japão	14,0	1,37
Nova Zelândia	0,1	0,01

Legenda: 1) Colorado Asphalt Pavement Association, 2002 e Lord, 2004

ANEXO I-B

Quadro I-B.1 – Tipos de misturas SMA contempladas a nível internacional

País	Especificação/Norma	Misturas SMA contempladas
Alemanha	TL Asphalt StB-07	SMA 5N / SMA 5S / SMA 8N / SMA 8S / SMA 11S
Áustria	RVS 8S.01.41 (5/2004)	SMA 8 / SMA 11
Bulgária	TC-2009	SMA 8S / SMA 11S
Dinamarca	VEJREGLER, 2012 VEJREGLER, 2012a	SMA 8 / SMA 11 / SMA 16
Escócia	TS2010, 2012	SMA 6 / SMA 10 / SMA 14
Eslovénia	TSC 06.300/06.410:2009	SMA 4 / SMA 8 / SMA 11
Finlândia	PANK, 2000	SMA 6 / SMA 8 / SMA 11 / SMA 16 / SMA 22
Grécia	Stone Mastic Asphalt, Rev A, 2001	SMA 8 / SMA 11
Holanda	CROW, 2014	SMA 5 / SMA 8A / SMA 8B / SMA 11A / SMA 11B
Noruega	Handbok 018, 2011	SMA 8 / SMA 11 / SMA 16
Polónia	WT-2 2010, 2010	SMA 5 / SMA 8 / SMA 11
Reino Unido	TRL, 1994	SMA 6 / SMA 10 / SMA 14
República Checa	TP 109 ZMENA C.1, 2000	SMA 8 / SMA 11
Roménia	SR 174-1, 2009	SMA 8 / SMA 12,5 / SMA 16
Suécia	TDOK 2013:0529, 2014	SMA 4 / SMA 8 / SMA 11 / SMA 16
Suíça	SN 640 431-5, 2015	SMA 8 / SMA 11
Argentina	CPA, 2005	SMA 10 / SMA 12
Brasil	DER, 2007	SMA 4,75 / SMA 8 / SMA 12,5
EUA	AASHTO M325-08, 2012	SMA 9,5 / SMA 12,5 / SMA 19
China	JTG F40-2004, 2004	SMA 10 / SMA 13 / SMA 16 / SMA 20
Hong-Kong	RD/GN/038, 2012	SMA 10
Índia	IRC:SP:79-2008, 2008	SMA 13 / SMA 19
Singapura	E/GD/09/104/A1, 2010	SMA 13
Rússia	ГОСТ 31015-2002	SMA 10 / SMA 15 / SMA 20
Nova Zelândia	NZTA M10:2014; AAPA National Asphalt Specification, 2004	SMA 7 / SMA 10 / SMA 14

ANEXO I-C

Quadro I-C.1 – Espessura das camadas de desgaste do tipo SMA em função da dimensão máxima nominal dos agregados utilizada no fabrico das misturas SMA

País	Norma	Espessura da camada de desgaste em mistura SMA (cm)										
		SMA 4	SMA 5	SMA 6	SMA 8 (SMA 7)	SMA 10 (SMA 9,5)	SMA 11	SMA12 (SMA12,5)	SMA 14 (SMA 13)	SMA 16 (SMA15)	SMA 20 (SMA 19)	SMA 22
Alemanha	TL Asphalt StB-07	-	2,0 - 3,0	-	3,0 - 4,0 ¹⁾ 2,0 - 3,5 ²⁾	-	3,5 - 4,0 ¹⁾	-	-	-	-	-
Áustria	RVS 8S.01.41 (5/2004)	-	-	-	2,5 - 3,5	-	3,0 - 4,0	-	-	-	-	-
Bulgária	TC-2009	-	-	-	3,0 - 4,0 ¹⁾	-	3,5 - 4,0 ¹⁾	-	-	-	-	-
Dinamarca	VEJREGLER, 2012 VEJREGLER, 2012a	-	-	-	50 kg/m ²	-	70 kg/m ²	-	-	90 kg/m ²	-	-
Escócia	TS2010, 2012	-	-	2,0 - 4,0	2,0 - 4,0	2,5 - 4,0	-	-	3,5 - 5,0	-	-	-
Eslovénia	TSC 06.300/06.410:2009	1,5 - 2,5	-	-	2,0 - 4,0	-	2,5 - 5,0	-	-	-	-	-
Finlândia	PANK, 2000	-	-	60 kg/m ²	70 kg/m ²	-	80 kg/m ²	-	-	100 kg/m ²	-	-
Grécia	Stone Mastic Asphalt, Rev A, 2001	-	-	-	3,0	-	4,0	-	-	-	-	-
Holanda	CROW, 2014	-	1,5 - 2,5	-	2,0 - 3,5	-	2,5 - 4,5	-	-	-	-	-
Noruega	Handbok 018, 2011	-	-	-	60 - 80 kg/m ²	-	60 - 80 kg/m ²	-	-	60 - 80 kg/m ²	-	-
Polónia	WT-2 2010, 2010	-	2,0 - 4,0	-	2,5 - 5,0	-	3,5 - 5,0	-	-	-	-	-
Reino Unido (aeroportos)	TRL, 1994	-	-	2,5 - 3,0	-	3,0 - 4,0	-	-	4,0 - 6,0	-	-	-
República Checa	TP 109 ZMENA C.1, 2000	-	-	-	2,5 - 4,0	-	3,5 - 4,5	-	-	-	-	-
Roménia	SR 174-1, 2009	-	-	-	≥ 3,0	-	-	(≥ 3,5)	-	≥ 3,5	-	-
Suécia	TDOK 2013:0529, 2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Suíça	SN 640 431-5, 2015	-	-	-	2,5 - 3,5	-	3,0 - 4,5	-	-	-	-	-
Argentina	CPA, 2005	-	-	-	-	≤ 4,0	-	≤ 4,0	-	-	-	-
Brasil	DER, 2007	-	1,5 - 2,5	-	3,0 - 4,0	-	-	3,5 - 5,0	-	-	-	-
EUA	AASHTO M325-08, 2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
China	JTG F40-2004, 2004	-	-	-	-	2,5 - 3,0	-	-	(3,5 - 4,0)	4,0 - 5,0	5,0 - 8,0	-
Hong-Kong	RD/GN/038, 2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Índia	IRC:SP:79-2008, 2008	-	-	-	-	-	-	-	(4,0 - 5,0)	-	(4,5 - 7,5)	-
Singapura	E/GD/09/104/A1, 2010	-	-	-	-	-	-	-	(4,0 - 6,0)	-	-	-
Rússia	ГОСТ 31015-2002	-	-	-	-	2,0 - 4,0	-	-	-	(3,0 - 5,0)	4,0 - 6,0	-
Nova Zelândia	NZTA M10:2014; AAPA National Asphalt Specification, 2004	-	-	-	(≥ 3,0)	≥ 4,0	-	-	≥ 5,5	-	-	-
Intervalo máximo		1,5 - 2,5	1,5-4,0	2,0-4,0	2,0-5,0	2,0 - 4,0	2,5 - 5,0	3,5 - 5,0	3,5-6,0	3,0 - 5,0	4,0 - 8,0	-
Média		2,0	2,8	3,0	3,5	3,0	3,8	4,3	4,8	4,0	6,0	-
Número de vezes superior à dimensão máxima do agregado		3,75 - 6,25	3,00 - 6,00	3,33 - 6,67	2,50 - 5,00	2,00 - 4,00	2,27 - 4,55	2,92 - 4,17	2,50 - 4,29	1,88 - 3,13	2,00 - 4,00	-

Legenda: 1) mistura SMA especial (S); 2) mistura SMA normal (N)

ANEXO I-D

Quadro I-D.1 – Valores recomendados das propriedades dos agregados grossos a utilizar no fabrico de uma mistura SMA

País	Especificação/Norma	Propriedades dos agregados grossos								
		Propriedades geométricas			Propriedades mecânicas				Propriedades térmicas e de meteorização	Outras
		C	FI	SI	LA	SZ	PSV	M _{DE}	WA ₂₄ ; MS	Afinidade
Alemanha	TL Asphalt StB-07	C _{100/0} ; C _{90/1} ⁶⁾	FI ₂₀	SI ₂₀	LA ₂₀	SZ ₁₈	PSV _{Declarado} (48) ⁷⁾ ; PSV _{Declarado} (51)	-	-	-
Áustria	RVS 8S.01.41 (5/2004)	C _{100/0}	-	-	LA ₂₀	-	PSV ₅₀	-	WA ₂₄ ¹	-
Bulgária	TC-2009	C _{100/0}	FI ₂₀	-	LA ₂₅ ; LA ₃₅ ⁸⁾	-	PSV ₅₀	-	WA ₂₄ ² ; MS ₁₈	≥ 80%
Dinamarca	VEJREGLER, 2012 VEJREGLER, 2012a	C _{95/1}	FI ₂₀	-	LA ₃₀	-	-	-	-	-
Escócia	TS2010, 2012	-	FI ₂₀	-	LA ₃₀	-	PSV _{Declarado}	M _{DE} Declarado	-	-
Eslovénia	TSC 06.300/06.410:2009	-	-	-	LA ₁₈ ¹⁰⁾ ; LA ₂₅ ¹¹⁾ ; LA ₂₈ ¹²⁾	-	PSV ₅₀	-	-	-
Finlândia	PANK, 2000	85 % uma face	-	-	-	-	-	-	-	-
Grécia	Stone Mastic Asphalt, Rev A, 2001	C _{100/0}	-	-	-	-	-	-	-	-
Holanda	CROW, 2014	C _{95/1}	FI ₂₅ ; FI ₂₀ ⁹⁾	-	LA ₂₀	-	PSV _{Declarado} (53)	-	WA ₂₄ ¹	Declarado
Noruega	Handbok 018, 2011	C _{50/20} ³⁾ ; C _{100/0}	FI ₂₅ ⁵⁾ ; FI ₃₀	-	LA ₂₅ ; LA ₁₅ ⁴⁾	-	PSV ₅₀	M _{DE} 10	-	-
Polónia	WT-2 2010, 2010	-	-	-	-	-	PSV ₅₀	-	-	-
Reino Unido (aeroportos)	TRL, 1994	C _{100/0}	FI ₂₅	-	LA ₃₀	-	PSV _{Declarado}	-	WA ₂₄ ² ; MS ₁₈	≤ 6 ¹³⁾
República Checa	TP 109 ZMENA C.1, 2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roménia	SR 174-1, 2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Suécia	TDOK 2013:0529, 2014	C _{50/10}	FI ₁₅ ¹⁾ ; FI ₂₀	-	LA ₂₅ ; LA ₂₀ ²⁾	-	-	-	-	-
Suíça	SN 640 431-5, 2015	C _{95/1}	FI ₂₅	-	LA ₂₅ ¹⁴⁾ ; LA ₂₀ ¹⁵⁾	-	PSV ₅₀	-	-	-
Argentina	CPA, 2005	100/75 % uma face/duas faces	FI ₂₅	-	LA ₂₅	-	PSV ₄₀	-	-	≥ 95%
Brasil	DER, 2007	90 % uma face	FI ₀	-	LA ₃₀	-	-	-	-	-
EUA	AASHTO M325-08, 2012	100/90 % uma face/duas faces	FI ₂₀	-	LA ₃₀	-	-	-	WA ₂₄ ² ; MS ₁₈	-

País	Especificação/Norma	Propriedades dos agregados grossos								
		Propriedades geométricas			Propriedades mecânicas				Propriedades térmicas e de meteorização	Outras
		C	FI	SI	LA	SZ	PSV	M _{DE}	WA ₂₄ ; MS	Afinidade
China	JTG F40-2004, 2004	100/90 % uma face/duas faces	FI ₂₀	-	LA ₃₀	-	-	-	WA ₂₄₂ ; MS ₁₈	-
Hong Kong	RD/GN/038, 2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Índia	IRC:SP:79-2008, 2008	C _{100/0}	FI ₃₀	-	LA ₂₅	SZ ₁₈	PSV ₅₅	-	WA ₂₄₂ ; MS ₁₈	-
Singapura	E/GD/09/104/A1, 2010	C _{100/0}	FI ₂₅	-	LA ₂₅	-	-	-	WA ₂₄₁	-
Rússia	ГОСТ 31015-2002	85 %	FI ₁₅	-	-	-	-	-	-	-
Nova Zelândia e Austrália	NZTA M10:2014; AAPA National Asphalt Specification, 2004	≥ 98 % duas faces	FI ₂₅	-	LA _{Declarado} - LA ₂₅	-	PSV _{Declarado} - PSV ₄₈	-	WA _{24Declarado} - WA ₂₄₂	-

Legenda: 1) tráfego ADTk,just ≥ 3501; 2) tráfego ADTk,just > 7000; 3) tráfego ADT ≤ 5000; 4) tráfego ADT ≥ 15000; 5) tráfego ADT > 5000; 6) apenas para a SMA8N e SMA5N; 7) apenas para misturas SMA8N, SMA5S e SMA5N; 8) para camadas não sujeitas diretamente ao tráfego; 9) para agregados de dimensão ≤ 8mm e > 8 mm, respetivamente; 10) tráfego elevado; 11) tráfego médio e reduzido; 12) tráfego muito reduzido; 13) número de partículas por cada 150 partículas utilizadas no ensaio; 14) para as frações 4/8 e 11/16; 15) para a fração 8/11; C – percentagem de material britado a utilizar; FI – índice de achatamento; SI – índice de forma; LA – Los Angeles; SZ – ensaio de impacto; PSV – ensaio de polimento acelerado; M_{DE} – micro-Deval; WS₂₄ – absorção de água; MS – ensaio do sulfato de magnésio

ANEXO I-E

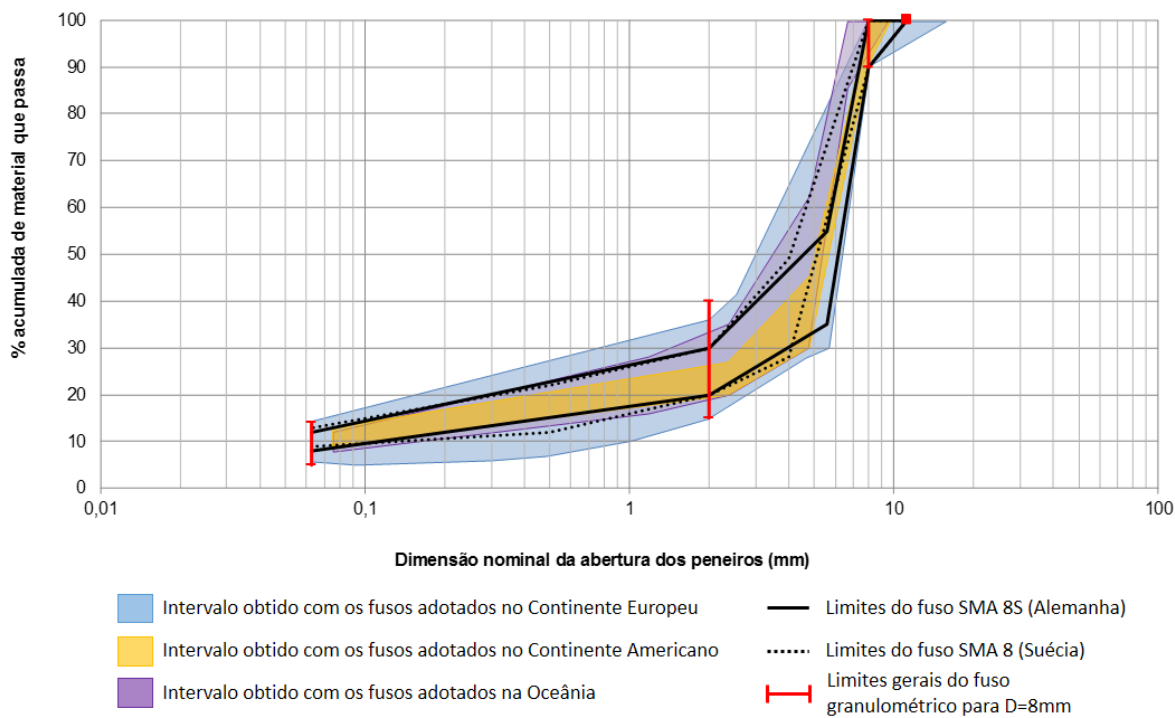


Figura I-E.1 – Limites para os fusos granulométricos definidos internacionalmente para uma mistura SMA 8

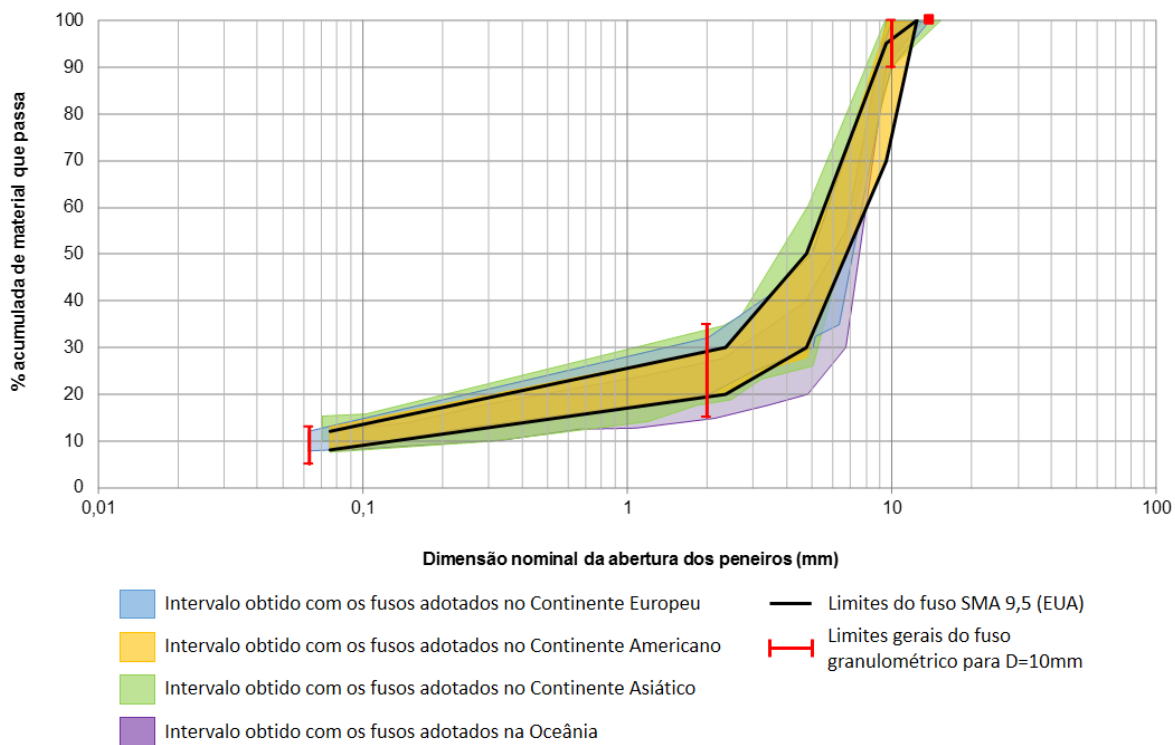


Figura I-E.2 – Limites para os fusos granulométricos definidos internacionalmente para uma mistura SMA 10

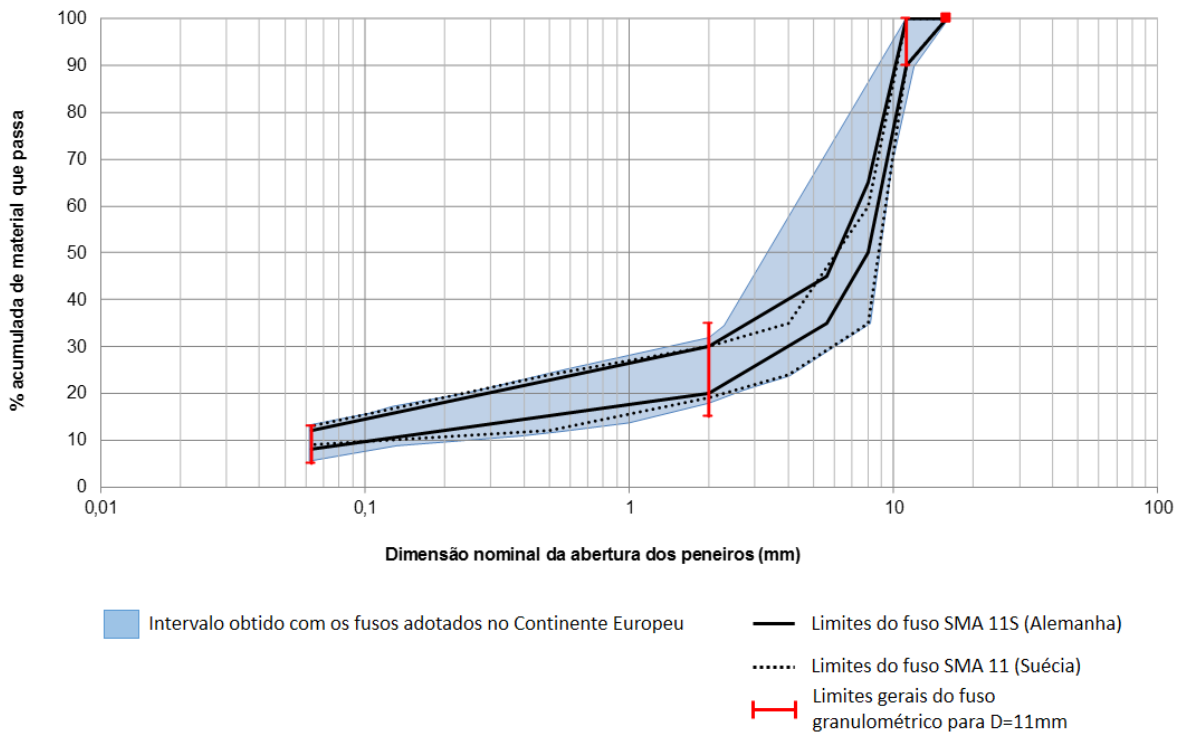


Figura I-E.3 – Limites para os fusos granulométricos definidos internacionalmente para uma mistura SMA 11

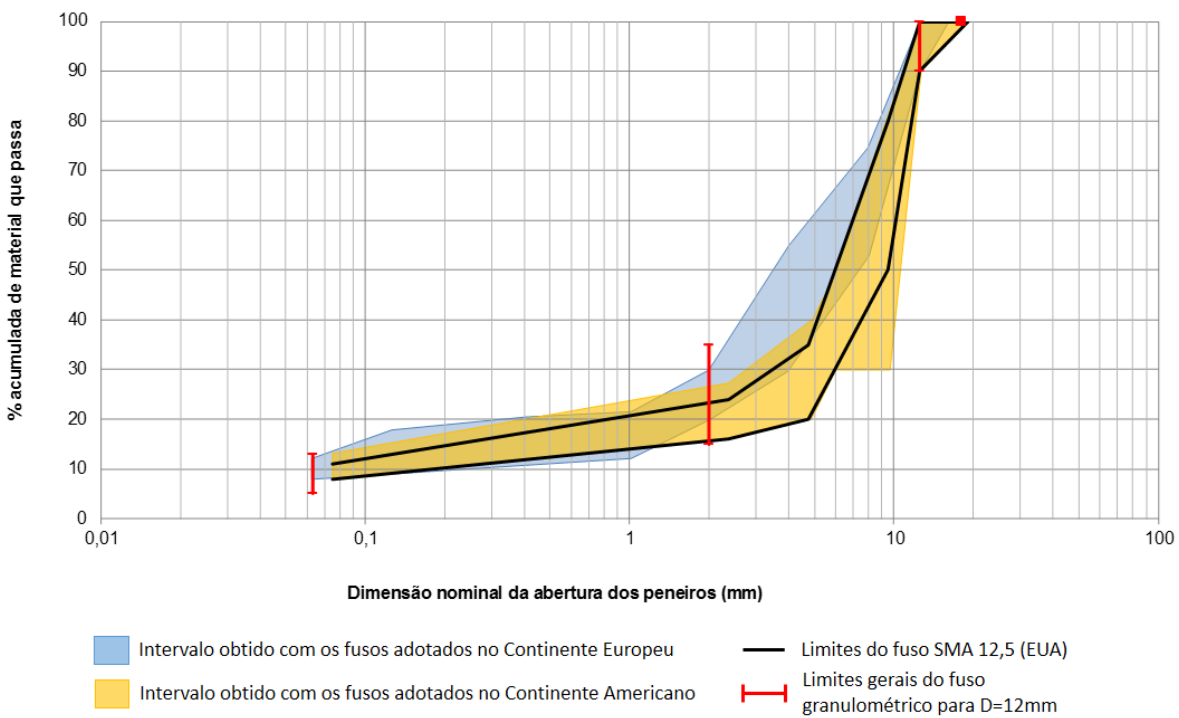


Figura I-E.4 – Limites para os fusos granulométricos definidos internacionalmente para uma mistura SMA 12

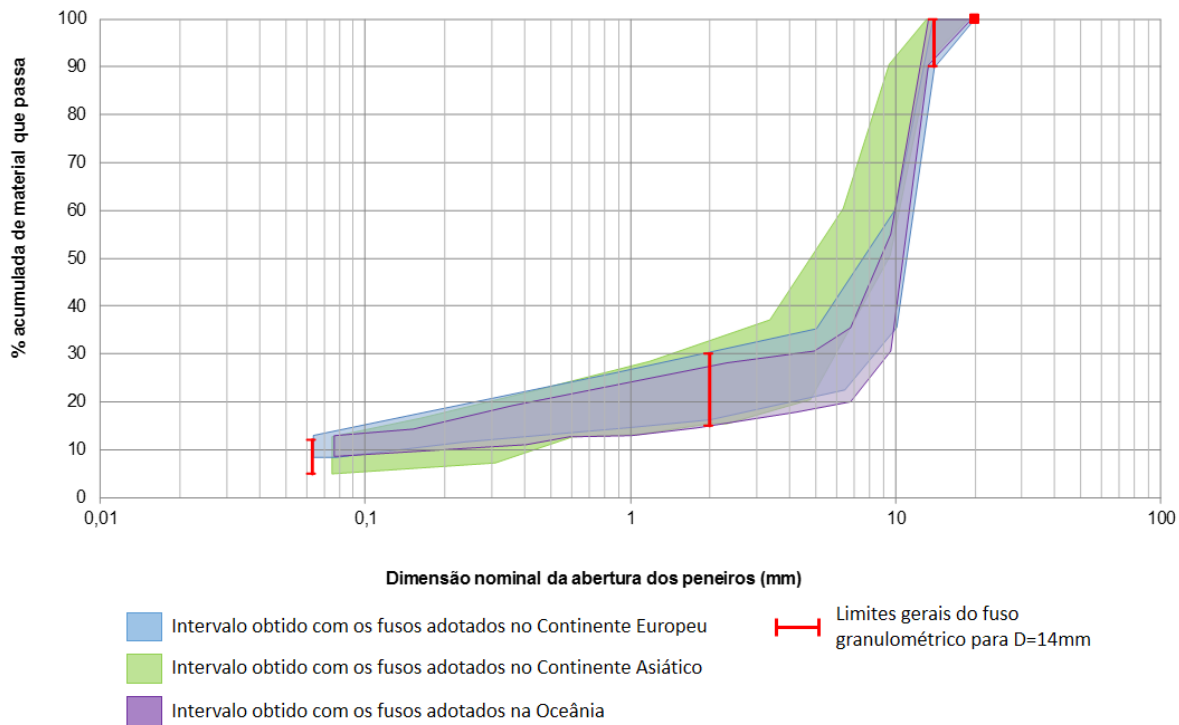


Figura I-E.5 – Limites para os fusos granulométricos definidos internacionalmente para uma mistura SMA 14

ANEXO I-F

Quadro I-F.1 – Requisitos para os agregados finos a utilizar nas misturas betuminosas do tipo SMA

País	Especificação/Norma	Propriedades dos finos								
		Propriedades geométricas				Propriedades de “limpeza”			Propriedades térmicas e de meteorização	
		C	G _F	f	E _{CS}	Volume de vazios	MB _F /EA	IP	LL	WA ₂₄ ; MS
Alemanha	TL Asphalt StB-07	-	G _{F85}	f _{declarado}	E _{CS35}	-	EA _{declarado}	-	-	-
Áustria	RVS 8S.01.41 (5/2004)	-	G _{F85}	f ₁₆	-	-	-	-	-	-
Bulgária	TC-2009	C _{50/0} ¹⁾ C _{100/0}	-	-	-	-	EA ≥ 35 ²⁾ EA ≥ 50 ³⁾	-	-	-
Dinamarca	VEJREGLER, 2012 VEJREGLER, 2012a	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Escócia	TS2010, 2012	-	-	f ₂₂	-	-	-	-	-	-
Eslovénia	TSC 06.300/06.410:2009	-	-	-	-	30 - 40	EA ≥ 70	4	-	-
Finlândia	PANK, 2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Grécia	Stone Mastic Asphalt, Rev A, 2001	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Holanda	CROW, 2014	-	G _{F85}	f ₃ ²⁾³⁾ ; f ₁₀	E _{CS} Declarado E _{CS35} ³⁾	-	-	-	-	WA ₂₄ ¹
Noruega	Handbok 018, 2011	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Polónia	WT-2 2010, 2010	-	G _{F85}	f ₃	E _{CS} Declarado	-	-	-	-	-
Reino Unido	TRL, 1994	-	-	f ₁₀	-	-	MB _F NR	-	-	⁴⁾ WA ₂₄ ²⁾ ; MS ₁₈ MS ₃₀ ⁵⁾
República Checa	TP 109 ZMENA C.1, 2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roménia	SR 174-1, 2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Suécia	TDOK 2013:0529, 2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Suíça	SN 640 431-5, 2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Argentina	CPA, 2005	C _{100/0}	G _{F92}	>50	-	-	EA > 50	Não plástico	-	-
Brasil	DER, 2007	-	-	-	-	-	EA ≥ 55	-	-	-

País	Especificação/Norma	Propriedades dos finos								
		Propriedades geométricas					Propriedades de "limpeza"			Propriedades térmicas e de meteorização
		C	G _F	f	E _{CS}	Volume de vazios	MB _F /EA	IP	LL	WA ₂₄ ; MS
EUA	AASHTO M325-08, 2012	C _{100/0}	-	-	-	-	-	Não plástico	< 25	MS ₁₈
China	JTG F40-2004, 2004	-	-	-	-	> 45	-	-	< 25	MS ₂₀
Hong-Kong	RD/GN/038, 2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Índia	IRC:SP:79-2008, 2008	C _{100/0}	-	-	-	-	EA > 50	Não plástico	-	-
Singapura	E/GD/09/104/A1, 2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rússia	ГОСТ 31015-2002	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nova Zelândia e Austrália	NZTA M10:2014; AAPA National Asphalt Specification, 2004	-	-	-	-	-	EA ≥ 35	-	-	WA ₂₄ Declarado

Legenda: 1) percentagem de material britado para camadas não sujeitas a tráfego 2) areia natural (apenas para camadas não sujeitas a tráfego); 3) areia britada; 4) para cada origem de material pétreo; 5) para cada fração de agregados; C – percentagem de material britado a utilizar; GF – granulometria; f – percentagem de finos; ECS – coeficiente de escoamento; MBF – azul metileno; EA – equivalente de areia; IP – índice de plasticidade; LL – limite de liquidez; WS24 – absorção de água; MS – ensaio do sulfato de magnésio

ANEXO I-G

Quadro I-G.1 – Requisitos para o filler a utilizar nas misturas betuminosas do tipo SMA

País	Especificação/Norma	Propriedades do filler							
		Tipo de filler	Percentagem de máxima de material	Propriedades geométricas			Propriedades mecânicas	Propriedades de "limpeza"	
				Material passado no peneiro 0,425mm, n.º40 (mínimo)	Material passado no peneiro 0,150mm, n.º100 (mínimo)	Material passado no peneiro 0,075mm, n.º200 (mínimo)	Rigden	MB _F /EA	IP
Alemanha	TL Asphalt StB-07	-	-	-	-	-	V28/45; V44/55	-	-
Áustria	RVS 8S.01.41 (5/2004)	-	-	-	-	-	-	-	-
Bulgária	TC-2009	Cal hidráulica, cal hidratada, cimento	-	100 ¹⁾	85 - 100 ²⁾	75-100 ³⁾	-	MB _F 10	-
Dinamarca	VEJREGLER, 2012 VEJREGLER, 2012a	Não é recomendado cimento	-	-	-	-	-	-	-
Escócia	TS2010, 2012	Cal hidráulica e cal hidratada	2% de cal hidratada	-	-	-	-	-	-
Eslovénia	TSC 06.300/06.410:2009	-	-	-	-	-	-	-	-
Finlândia	PANK, 2000	-	-	-	-	-	-	-	-
Grécia	Stone Mastic Asphalt, Rev A, 2001	-	1% de cal hidratada	100 ⁴⁾	-	70 - 100 ³⁾	-	MB _F < 1	-
Holanda	CROW, 2014	-	-	-	-	-	-	-	-
Noruega	Handbok 018, 2011	-	-	-	-	-	-	-	-
Polónia	WT-2 2010, 2010	-	-	-	-	-	-	-	-
Reino Unido	TRL, 1994	Cimento, cal hidráulica ou cal hidratada	-	-	-	-	-	-	-
República Checa	TP 109 ZMENA C.1, 2000	-	-	-	-	-	-	-	-
Roménia	SR 174-1, 2009	Não é possível utilizar filler recuperado	-	-	-	-	-	EA ≤ 2	-
Suécia	TDOK 2013:0529, 2014	-	-	-	-	-	-	-	-
Suíça	SN 640 431-5, 2015	-	-	-	-	-	-	-	-

País	Especificação/Norma	Propriedades do fíler							
		Tipo de fíler	Percentagem de máxima de material	Propriedades geométricas			Propriedades mecânicas	Propriedades de "limpeza"	
				Material passado no peneiro 0,425mm, n.º40 (mínimo)	Material passado no peneiro 0,150mm, n.º100 (mínimo)	Material passado no peneiro 0,075mm, n.º200 (mínimo)	Rigden	MB _F /EA	IP
Argentina	CPA, 2005	Pó de pedra, cal, cal hidráulica, cimento, à excepção do fíler recuperado	3% de cimento ou de cal hidratada	100	90	75	-	-	-
Brasil	DER, 2007	Qualquer tipo de fíler	2% de cimento	100	95-100 ⁵⁾	65-100	-	-	-
EUA	AASHTO M325-08, 2012	-	-	-	-	-	≤ 50	-	≤ 4
China	JTG F40-2004, 2004	-	-	100 ⁵⁾	90 -100	75 - 100	-	-	-
Hong-Kong	RD/GN/038, 2012	8)	-	-	-	-	-	-	-
Índia	IRC:SP:79-2008, 2008	Pó de pedra e/ou cal hidráulica, cimento, à excepção do cinzas volantes	-	100 ⁶⁾	95 - 100 ⁷⁾	85 - 100	-	-	≤ 4 ⁹⁾
Singapura	E/GD/09/104/A1, 2010	-	-	-	-	-	-	-	-
Rússia	ГОСТ 31015-2002	-	-	-	-	-	-	-	-
Nova Zelândia e Austrália	NZTA M10:2014; AAPA National Asphalt Specification, 2004	-	-	100 ⁶⁾	90	65	-	-	-

Legenda: 1) material passado no peneiro 2,0 mm; 2) material passado no peneiro 0,125 mm; 3) material passado no peneiro 0,063 mm; 4) material passado no peneiro 0,500 mm; 5) material passado no peneiro 0,180 mm; 6) material passado no peneiro 0,600 mm; 7) material passado no peneiro 0,300 mm; 8) fíleres a utilizar deverão incluir cal hidratada numa percentagem mínima de 2 %; 9) exceto se for cal hidratada

ANEXO I-H

Quadro I-H.1 – Valores recomendados das propriedades do betume a utilizar no fabrico de uma mistura SMA

País	Especificações Norma	Propriedades	SMA4	SMA5	SMA6	SMA8 (SMA7)	SMA10 (SMA9,5)	SMA11	SMA12 (SMA12,5)	SMA14 (SMA13)	SMA16 (SMA15)	SMA20 (SMA19)	SMA22
Alemanha	TL Asphalt StB-07	Tipo de betume	-	1): 50/70, 45/80-50, 25/55-55; 2): 50/70, 70/100	-	1): 50/70, 25/55-55; 2): 50/70, 70/100, 45/80-50	-	1): 50/70, 25/55-55	-	-	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	7,4	-	7,2	-	6,6	-	-	-	-	-
Áustria	RVS 8S.01.41 (5/2004)	Tipo de betume	-	-	-	50/70, 70/100, PmB 30-50, PmB 50-90S, PmB 60-90	-	50/70, 70/100, PmB 30-50, PmB 50-90S, PmB 60-90	-	-	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	-	6,5	-	6,3	-	-	-	-	-
Bulgária	TC-2009	Tipo de betume	-	-	-	50/70-60, PmB 45/80-65, PmB 35/55-55	-	50/70-60, PmB 45/80-65, PmB 35/55-55	-	-	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	-	7,0	-	6,5	-	-	-	-	-
Dinamarca	VEJREGLER, 2012 VEJREGLER, 2012a	Tipo de betume	-	-	-	3): 40/60, 70/100; 4): 40/60; 5): PmB, 40/60; 6): PmB	-	3): 40/60, 70/100; 4): 40/60; 5): PmB, 40/60; 6): PmB	-	-	-	3): 40/60, 70/100; 4): 40/60; 5): PmB, 40/60; 6): PmB	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Escócia	TS2010, 2012	Tipo de betume	-	-	PmB 75/130-75	-	PmB 75/130-75	-	-	PmB 75/130-75	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	7,1	-	6,7	-	6,3	-	-	-	-
Eslovénia	TSC 06.300/06.410:2009	Tipo de betume	35/50, 50/70, 80/100, 160/210	-	-	35/50, 50/70, 80/100, 160/210	-	35/50, 50/70, 80/100, 160/210	-	-	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	6,8	-	-	6,5	-	6,3	-	-	-	-	-
Finlândia	PANK, 2000	Tipo de betume	-	-	35/50, 100/150, PmB65, PmB75	35/50, 100/150, PmB65, PmB75	-	35/50, 100/150, PmB65, PmB75	-	-	35/50, 100/150, PmB65, PmB75	-	35/50, 100/150, PmB65, PmB75
		Percentagem mínima de betume	-	-	6,5 - 7,5	7,0 - 8,0	-	6,5 - 7,5	-	-	6,0 - 7,0	-	5,8 - 6,8
Grécia	Stone Mastic Asphalt, Rev A, 2001	Tipo de betume	-	-	-	7): 50/70; 8): 50/70, PmB 65 ^a , PmB45A elastómero	-	7): 50/70; 8): 50/70, PmB 65 ^a , PmB45A elastómero	-	-	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	-	7,0 ⁹⁾ ; 6,5 ¹⁰⁾	-	6,5 ⁹⁾ ; 6,0 ¹⁰⁾	-	-	-	-	-
Holanda	CROW, 2014	Tipo de betume	-	70/100	-	70/100	-	70/100	-	-	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	7,4	-	6,8	-	6,6	-	-	-	-	-
Noruega	Handbok 018, 2011	Tipo de betume	-	-	-	70/100, 160/220	-	50/70, 70/100PmB	-	-	35/50, 70/100PmB	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	-	6,6	-	6,2	-	-	6,0	-	-

País	Especificações Norma	Propriedades	SMA4	SMA5	SMA6	SMA8 (SMA7)	SMA10 (SMA9,5)	SMA11	SMA12 (SMA12,5)	SMA14 (SMA13)	SMA16 (SMA15)	SMA20 (SMA19)	SMA22
Polónia	WT-2 2010, 2010	Tipo de betume	-	11): 50/70, PmB 45/80-50, PmB 45/80-65, PmB 65/105-60	-	11): 50/70, PmB 45/80-55, PmB 45/80-65, PmB 65/105-60 12): PmB 45/80-55, PmB 45/80-65, PmB65/105-60	-	12): PmB 45/80-55, PmB 45/80-65, PmB 65/105-60	-	-	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	7,2	-	7,0	-	6,4	-	-	-	-	-
Reino Unido (aerportos)	TRL, 1994	Tipo de betume	-	-	40/60, 70/100	-	40/60, 70/100	-	-	40/60, 70/100	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	7,5	-	6,8	-	-	6,5	-	-	-
República Checa	TP 109 ZMENA C.1, 2000	Tipo de betume	-	-	-	AM45, AM 65	-	AM45, AM65	-	-	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	-	6,8 - 7,2	-	6,5 - 7,0	-	-	-	-	-
Roménia	SR 174-1, 2009	Tipo de betume	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	-	7,0	-	-	(6,5)	-	6,2	-	-
Suécia	TDOK 2013:0529, 2014	Tipo de betume	70/100, 100/150, 160/220	-	-	50/70, 70/100, 100/150, 160/220	-	50/70, 70/100, 100/150, 160/220	-	-	50/70, 70/100, 100/150, 160/220	-	-
		Percentagem mínima de betume	6,6, 6,6, 6,4	-	-	6,4, 6,4, 6,2, 6,2	-	6,2, 6,2, 6,0, 6,0	-	-	6,0, 6,0, 5,8, 5,8	-	-
Suíça	SN 640 431-5, 2015	Tipo de betume	-	-	-	50/70; 70/100	-	50/70; 70/100	-	-	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	-	6,4	-	6,2	-	-	-	-	-
Argentina	CPA, 2005	Tipo de betume	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	-	-	6,5	-	6,5	-	-	-	-
Brasil	DER, 2007	Tipo de betume	-	PmB SBS 40/70-60, PmB SBS 40/70-65	-	PmB SBS 40/70-60, PmB SBS 40/70-65	-	-	(PmB SBS 40/70-60, PmB SBS 40/70-65)	-	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EUA	AASHTO M325-08, 2012	Tipo de betume	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	-	-	(6,0 - 7,0)	-	(6,0 - 7,0)	-	-	(6,0 - 7,0)	-
China	JTG F40-2004, 2004	Tipo de betume	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	-	-	6,2	-	-	6,0	5,8	5,6	-
HongKong	RD/GN/038, 2012	Tipo de betume	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	-	-	6,0	-	-	-	-	6,0	-

País	Especificações Norma	Propriedades	SMA4	SMA5	SMA6	SMA8 (SMA7)	SMA10 (SMA9,5)	SMA11	SMA12 (SMA12,5)	SMA14 (SMA13)	SMA16 (SMA15)	SMA20 (SMA19)	SMA22
Índia	IRC:SP:79-2008, 2008	Tipo de betume	-	-	-	-	-	-	VG-30, PmB40	-	-	VG-30, PmB40	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	-	-	-	-	5,8	-	-	5,8	-
Singapura	E/GD/09/104/A1, 2010	Tipo de betume	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	-	-	-	-	-	(6,0 - 7,0)	-	-	-
Rússia	ГОСТ 31015-2002	Tipo de betume	-	-	-	-	40/90, 60/130, 90/200	-	-	-	(40/90, 60/130, 90/200)	40/90, 60/130, 90/200	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	-	-	6,5 - 7,5	-	-	-	(6,0 - 7,0)	5,5 - 6,0	-
Nova Zelândia e Austrália	NZTA M10:2014; AAPA National Asphalt Specification, 2004	Tipo de betume	-	-	-	Classe 320 ¹¹⁾ ; Classe 320 ou Multigrade ¹³⁾ ; PmB ¹⁴⁾	Classe 320 ¹¹⁾ ; Classe 320 ou Multigrade ¹³⁾ ; PmB ¹⁴⁾	-	-	-	-	-	-
		Percentagem mínima de betume	-	-	-	(6,0 - 7,3)	6,0 - 7,0	-	-	5,8 - 6,8	-	-	-

Legenda: 1) misturas especiais (S), tráfego elevado; 2) misturas normais (N) tráfego médio e reduzido; 3) ADT ≤ 2000; 4) ADT entre 2000 e 10000; 5) ADT entre 10000 e 20000; 6) ADT > 20000; 7) ESA < 1×10⁷; 8) ESA ≥ 1×10⁷; 9) Volume de vazios entre 3 % e 4 %; 10) volume de vazios superior a 4 %; 11) tráfego médio e reduzido; 12) tráfego elevado; 13) tráfego elevado e muito elevado; 14) tráfego muito elevado ou condições especiais

ANEXO I-J

Quadro I-J.1 – Evolução dos requisitos indicados nas especificações publicadas na Alemanha para as misturas SMA

Especificação	ZTV bit StB-84 (1984)				ZTV Asphalt StB-07 (2007)				
	SMA 11S	SMA 8S	SMA 8N	SMA 5N	SMA 11S	SMA 8S	SMA 8N	SMA 5S	SMA 5N
Peneiro (mm)									
16	100				100				
11,2	90 - 100	100	100		90 - 100	100	100		
8	máx. 60	90 - 100	90 - 100	100	50 - 65	90 - 100	90 - 100	100	100
5,6	30 - 40	máx. 45	30 - 55	90 - 100	35 - 45	40 - 55	35 - 60	90 - 100	90 - 100
2	20 - 25	20 - 25	20 - 30	30 - 40	20 - 30	20 - 30	20 - 30	30 - 40	30 - 40
0,063	9 - 13	10 - 13	8 - 13	8 - 13	8 - 12	8 - 12	7 - 12	7 - 12	7 - 12
Agregados									
Resistência à fragmentação	-	-	-	-	SZ18; LA20	SZ18; LA20	SZ18; LA20	SZ18; LA20	SZ18; LA20
Resistência ao polimento	-	-	-	-	PSV _{Declarado} (51)	PSV _{Declarado} (51)	PSV _{Declarado} (48)	PSV _{Declarado} (48)	PSV _{Declarado} (48)
Índice de forma	-	-	-	-	20	20	20	20	20
Índice de achatamento	-	-	-	-	20	20	20	20	20
Betume									
Tipo de betume	PmB45; 50/70	PmB45; 50/70	70/100	70/100	PmB45; PmB25; 50/70	PmB45; PmB25; 50/70	50/70; 70/100; PmB 65	PmB65; PmB45; 50/70	50/70; 70/100
Porcentagem de betume mínima (%)	6,5	7,0	7,2	7,2	6,6	7,2	7,2	7,4	7,4
Tipo de aditivo estabilizante	Fibras orgânicas ou minerais, sílica e polímeros								
Aditivo estabilizante (%)	0,3 - 1,15				0,3 - 1,5				
Mistura betuminosa									
Volume de Vazios (%)	3,0 - 4,0	3,0 - 4,0	2,0 - 4,0	2,0 - 4,0	2,5 - 3,0	2,5 - 3,0	1,5 - 3,0	2,0 - 3,0	1,5 - 3,0
VFB (%)	-	-	-	-	VFB _{Declarado}	VFB _{Declarado}	VFB _{Declarado}	VFB _{Declarado}	VFB _{Declarado}
Porcentagem da profundidade de rodeira - PRD _{AIR} (%)	-	-	-	-	PRD _{AIR} Declarado	PRD _{AIR} Declarado	PRD _{AIR} N R	PRD _{AIR} N R	PRD _{AIR} N R

ANEXO I-K

Quadro I-K.1 – Valores recomendados para as propriedades das misturas SMA

País	Especificação/ Norma	Mistura betuminosa	Método de compactação	Propriedades								
				Volume de vazios (%)	VMA (%)	VFB (%)	Estabilidade Marshall (kN)	Deformação permanente	ITSR/IRC (%)	Escorrimto (%)	VCA _{MIX}	
Alemanha	TL Asphalt StB- 07	SMA 5N e SMA 8N	Marshall ¹⁾	1,5 - 3,0	-	-	-	-	-	-	D _{0,3}	-
		SMA 5S		2,0 - 3,0								
		SMA 8S e SMA 11S		2,5 - 3,0								
Áustria	RVS 8S.01.41 (5/2004)	SMA 8 S1+, SMA 11 S1+	Marshall ¹⁾	1,5 - 4,0	-	-	-	-	-	-	-	-
		SMA 8 S2+ SMA 11 S2+		3,0 - 6,0								
Bulgária	TC-2009	SMA 8S e SMA 11S	Marshall ²⁾	3,0 - 4,0	-	-	-	-	-	-	D _{0,3}	-
Dinamarca	VEJREGLER, 2012 VEJREGLER, 2012a	SMA 8, SMA 11 e SMA 16	Marshall ¹⁾	2,0 - 5,0	≥ 16	77 - 92	-	-	-	-	D _{0,3}	-
Escócia	TS2010, 2012	SMA 6 e SMA 8	-	3,5 - 4,0	-	-	-	WTS _{AIR} 1,00 PRD _{AIR} 50	ITSR _{Declarado}	D _{0,3}	-	-
		SMA 10 e SMA 14	-	3,0 - 3,5	-	-						
Eslovénia	TSC 06.300/06.410:2 009	SMA 4 e SMA 8	Marshall ¹⁾	2,0 - 4,0	-	75 - 90 ⁹⁾ 75 - 92 ¹⁰⁾	-	-	-	-	-	-
		SMA 8S e SMA 11S		3,0 - 4,5		70 - 85						
Finlândia	PANK, 2000	SMA 6, SMA 8, SMA 11, SMA 16 e SMA 22	-	≤ 5,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Grécia	Stone Mastic Asphalt, Rev A, 2001	SMA 8 e SMA 11	Marshall ¹⁾	3,5 - 4,5	-	VFB ₇₆ ²¹⁾ VFB ₇₈ ²²⁾ VFB ₈₀ ²³⁾	-	-	-	IRC > 80	D _{0,3}	-
Holanda	CROW, 2014	SMA 5, SMA 8A, SMA 11A	Marshall ¹⁾ Giratório	4,0	-	VFB _{Declarado}	-	-	-	ITSR ₈₀	D _{Declarado}	-
		SMA 8B SMA 11B		5,0								

País	Especificação/ Norma	Mistura betuminosa	Método de compactação	Propriedades							
				Volume de vazios (%)	VMA (%)	VFB (%)	Estabilidade Marshall (kN)	Deformação permanente	ITSR/IRC (%)	Escorrimento (%)	VCA _{MIX}
Noruega	Handbok 018, 2011	¹⁹⁾ ; SMA 8 e SMA 11	Marshall ¹⁾	2,0 - 6,0	-	71 - 89	-	-	-	-	-
		SMA 16 ²⁰⁾		2,5 - 6,0		71 - 86					
Polónia	WT-2 2010, 2010	SMA 5 ⁷⁾ SMA 8 ⁷⁾ SMA 11 ⁹⁾	Marshall ¹⁾	1,5 - 3,0	-	-	-	WTS _{AIR} 0,5 ⁹⁾ PRD _{AIR} Declarado ⁹⁾	ITSR ₉₀ ¹²⁾	D _{0,3}	-
		¹⁰⁾ ; SMA 8 e SMA 11		2,0 - 3,5							
Reino Unido (aeropostos)	TRL, 1994	SMA 6 e SMA 10	Marshall ¹⁾	2,0 - 4,0	-	-	-	WTS _{AIR} 5,0 PRD _{AIR} 11,0	ITSR ₇₀	D _{0,3}	-
República Checa	TP 109 ZMENA C.1, 2000	SMA 8 e SMA 11	Marshall	3,0 - 4,5 ¹⁾ ≥ 2,5 ³⁾	-	-	≥ 6,0	≤ 1,6 mm ¹³⁾ ≤ 0,2 mm ¹⁴⁾ ≤ 0,3 mm ¹⁵⁾	-	D _{0,3}	-
Roménia	SR 174-1, 2009	SMA 8	Marshall ²⁾	2,5 - 3,5	-	77 - 83	≥ 7,0	WTS _{AIR} 0,80 PRD _{AIR} 8,0 WTS _{AIR} 0,60 PRD _{AIR} 7,0	-	D _{0,2}	-
		SMA 12,5 e SMA 16		3,0 - 4,0							
Suécia	TDOK 2013:0529, 2014	SMA 4 e SMA 8	Marshall ¹⁾	2,0 - 4,0	-	-	-	-	ITSR ₇₅	-	-
		SMA 11 e SMA 16		2,0 - 3,5							
Suíça	SN 640 431-5, 2015	SMA 8 e SMA 11	Marshall ¹⁾	2,0 - 5,0	-	-	-	-	-	≤ 0,6 ¹⁶⁾	-
Argentina	CPA, 2005	SMA 10 e SMA 12	Marshall ¹⁾	2,0 - 4,0	> 18	75 - 85	-	-	IRC > 80	D _{0,3}	-
Brasil	DER, 2007	SMA 4,75, SMA 8 e SMA 12,5	Marshall ¹⁾	4,0	≥ 17	-	-	-	-	D _{0,3}	< VCA _{DRC} ¹⁷⁾
EUA	AASHTO M325- 08, 2012	SMA 9,5, SMA 12,5 e SMA 19	Marshall ¹⁾ Giratório ⁵⁾	3,0 - 4,0	≥ 17	-	≥ 6,2	-	IRC ≥ 80	D _{0,3}	< VCA _{DRC} ¹⁷⁾
China	JTG F40-2004, 2004	SMA 10, SMA 13, SMA 16, SMA 20	Marshall ¹⁾	3,0 - 4,0	≥ 17	75 - 85	≥ 6,0	-	-	-	< VCA _{DRC} ¹⁷⁾
Hong Kong	RD/GN/038, 2012	SMA 10	Marshall ²⁾	3,0 - 4,5	≥ 17	-	≥ 6,0 Deformação ≤ 4 mm	-	-	D _{0,3}	-
Índia	IRC:SP:79- 2008, 2008	SMA 13 e SMA 19	Marshall ¹⁾	4,0	≥ 17	-	-	-	IRC ≥ 85	D _{0,3}	< VCA _{DRC} ¹⁷⁾

País	Especificação/ Norma	Mistura betuminosa	Método de compactação	Propriedades							
				Volume de vazios (%)	VMA (%)	VFB (%)	Estabilidade Marshall (kN)	Deformação permanente	ITSR/IRC (%)	Escorrimento (%)	VCA _{MIX}
Singapura	E/GD/09/104/A 1, 2010	SMA 13	Marshall ¹⁾	3,0 - 4,0	-	-	≥ 9,0 Deformação 8 - 16	-	-	-	-
Rússia	ГОСТ 31015- 2002	SMA 10, SMA 15 e SMA 20	Marshall ¹⁾	2,0 - 4,5 ⁸⁾ 1,5 - 4,5 ⁹⁾ 1,5 - 4,0 ¹⁰⁾	15 - 19	-	-	-	IRC ≥ 75 ⁸⁾ IRC ≥ 85 ⁹⁾ IRC ≥ 90 ¹⁰⁾	-	-
Nova Zelândia e Austrália	NZTA M10:2014; AAPA National Asphalt Specification, 2004	SMA 7	Marshall ¹⁾	4,0	≥ 19	-	-	18)	IRC ≥ 75	D _{0,3}	-
		SMA 10	⁷⁾ ; Marshall ¹⁾ Giratório ⁴⁾	4,0	≥ 18 ⁷⁾ ≥ 17 ¹⁰⁾						
		SMA 14	¹⁰⁾ ; Marshall ²⁾ Giratório ⁶⁾	4,0	≥ 16						

Legenda: 1) compactação com 50 pancadas por topo; 2) compactação com 75 pancadas por topo; 3) compactação com 100 pancadas por topo 4) compactação com 80 giros; 5) compactação com 100 giros; 6) compactação com 120 giros 7) tráfego médio e reduzido; 8) tráfego reduzido; 9) tráfego médio; 10) tráfego elevado; 11) zonas com temperaturas elevadas; 12) compactação com 35 pancadas por topo; 13) Profundidade de rodeira para 10000 ciclos a 50 °C; 14) incremento da profundidade de rodeira entre 10000 e 15000 ciclos; 15) incremento da profundidade de rodeira entre 10000 e 20000 ciclos; 16) ensaio de acordo com a norma SN 670 418; 17) volume de vazios determinado utilizando a compactação com varão; 18) caso se utilize uma percentagem de agregados finos (areias não britadas) superior a 10 % deve ser avaliada a deformação permanente para assegurar um adequado comportamento; 19) ADT ≤ 15000; 20) ADT > 15000; 21) para 3,5 % vazios; 22) para 4,0 % vazios; 23) para 4,5 % vazios

ANEXO II – Materiais utilizados



C/ Venezuela, 103 planta 4
08019 Barcelona
Tel.: 34 -933 262 888
Fax: 34 -933 262 889
E-mail: info@jrsiberica.com
www.jrsiberica.com

FIBRAS DE CELULOSE, GRANULADAS

➤ Definição

Grânulos constituídos por uma mistura de fibras naturais de celulose com betume, que podem ser utilizados como aditivo para modificar misturas betuminosas, de modo a melhorar as suas características, aumentando a sua durabilidade e o seu desempenho.

➤ Características do material

Características do granulado:

Aspecto	grânulos cilíndricos
Conteúdo de fibras	87 a 93 %
Comprimento médio dos grânulos.....	2 a 8 mm
Diâmetro médio dos grânulos	5 ± 1 mm
Densidade aparente	440 a 520 g/l
Análise granulométrica, # < 4,5 mm.....	máx. 10 %

Não é tóxico e é fisiologicamente seguro

Características da fibra:

Composição básica	fibra de celulose técnica
Conteúdo em celulose	80 ± 5 %
Valor do pH (5 g/100 ml)	7,5 ± 1,0
Comprimento médio da fibra	1100 µm
Diâmetro médio da fibra	45 µm

➤ Dosificação das fibras em misturas betuminosas fabricadas a quente

Em todos os casos, a proporção de fibras na mistura betuminosa deve estar compreendida entre os seguintes valores: 0,3 e 0,5 % da mistura (em peso).

JUL.2012.PT

**ANEXO III – Resultados dos ensaios de avaliação
da sensibilidade à água**

Quadro III.1 – Resultados da avaliação da sensibilidade à água obtidos para a mistura SMA 11 segundo a EN 12697-12 e a MIL-STD-620A

Identificação do grupo	Identificação das amostras	Resultados obtidos							
		Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_v (%)	Resistência à tração indireta, <i>ITS</i> (kPa)	Resistência conservada em tração indireta, <i>ITSR</i> (%)	Força de rotura corrigida, F_r (kN)	Resistência conservada <i>IRC</i> (%)		
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA11-SA1.1	2,430	7,1	1593	91	-	-		
	SMA11-SA1.2	2,427	7,2						
	SMA11-SA1.3	2,432	7,0						
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA11-SA1.4	2,455	6,1	1443					
	SMA11-SA1.5	2,448	6,4						
	SMA11-SA1.6	2,440	6,7						
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA11.AR-SA1.1	2,529	3,3	1594	93	-	-		
	SMA11.AR-SA1.2	2,531	3,2						
	SMA11.AR-SA1.3	2,530	3,3						
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA11.AR-SA1.4	2,521	3,6	1485					
	SMA11.AR-SA1.5	2,530	3,3						
	SMA11.AR-SA1.6	2,524	3,5						
Provetes imersos durante 40 minutos a 60 °C	SMA11.AR-SA2.1	2,523	3,6	-	-	12,68	88		
	SMA11.AR-SA2.2	2,523	3,6						
	SMA11.AR-SA2.3	2,522	3,6						
	SMA11.AR-SA2.4	2,527	3,4						
Provetes imersos durante 24 horas a 60 °C	SMA11.AR-SA2.5	2,526	3,4			-		-	11,17
	SMA11.AR-SA2.6	2,521	3,6						
	SMA11.AR-SA2.7	2,530	3,3						
	SMA11.AR-SA2.8	2,522	3,6						

Quadro III.2 – Tipo de rotura dos provetes avaliados à sensibilidade à água para a mistura SMA 11 segundo a EN 12697-12

Identificação do grupo	Identificação das amostras	Resultados obtidos		
		Tipo de rotura (Trac. ind., def., comb.)	Revestimento de ligante na superfície do agregado exposto (N.A., Rr, Er)	Presença de agregado fraturado ou esmagado (N.A., Rf, Ef)
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA11-SA1.1	Trac. Ind.	N.A.	N.A.
	SMA11-SA1.2	Comb.	N.A.	Rf
	SMA11-SA1.3	Comb.	Rr	Rf
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA11-SA1.4	Comb.	Rr	Rf
	SMA11-SA1.5	Comb.	Rr	Rf
	SMA11-SA1.6	Comb.	Rr	Rf
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA11.AR-SA1.1	-	-	-
	SMA11.AR-SA1.2	-	-	-
	SMA11.AR-SA1.3	-	-	-
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA11.AR-SA1.4	-	-	-
	SMA11.AR-SA1.5	-	-	-
	SMA11.AR-SA1.6	-	-	-

Legenda: Trac. Ind. - rotura por tração indireta evidente; Def. - rotura por deformação; Comb. - rotura combinada; Rr - foram observadas deficiências no revestimento com reduzida expressão; Er - foram observadas deficiências no revestimento com elevada expressão; Rf - foram observadas algumas partículas fraturadas ou esmagadas (com reduzida expressão); Ef - foram observadas partículas fraturadas ou esmagadas com elevada expressão

Quadro III.3 – Resultados da avaliação da sensibilidade à água obtidos para a mistura SMA 12.O segundo a EN 12697-12 e a MIL-STD-620A

Identificação do grupo	Identificação das amostras	Resultados obtidos					
		Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_v (%)	Resistência à tração indireta, ITS (kPa)	Resistência conservada em tração indireta, ITS _R (%)	Força de rotura corrigida, F_n (kN)	Resistência conservada IRC (%)
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA12.O-SA1.1	2,442	3,5	1710	88	-	-
	SMA12.O-SA1.2	2,447	3,3				
	SMA12.O-SA1.3	2,445	3,4				
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA12.O-SA1.4	2,445	3,4	1504			
	SMA12.O-SA1.5	2,445	3,4				
	SMA12.O-SA1.6	2,440	3,6				
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA12.O-SA2.1	2,247	11,2	1460	79 ¹⁾	-	-
	SMA12.O-SA2.2	2,263	10,6				
	SMA12.O-SA2.3	2,282	9,8				
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA12.O-SA2.4	2,260	10,7	1160			
	SMA12.O-SA2.5	2,265	10,5				
	SMA12.O-SA2.6	2,265	10,5				
Provetes imersos durante 40 minutos a 60 °C	SMA12.O-SA3.1	2,448	3,3	-	-	16,65	79
	SMA12.O-SA3.2	2,455	3,0				
	SMA12.O-SA3.3	2,441	3,6				
	SMA12.O-SA3.4	2,441	3,6				
Provetes imersos durante 24 horas a 60 °C	SMA12.O-SA3.5	2,438	3,7				
	SMA12.O-SA3.6	2,440	3,6			13,16	
	SMA12.O-SA3.7	2,457	2,9				
	SMA12.O-SA3.8	2,451	3,2				

Legenda: 1) provetes fabricados com amostras de mistura betuminosa não compactada recolhida durante os trabalhos de pavimentação do trecho experimental

Quadro III.4 – Tipo de rotura dos provetes avaliados à sensibilidade à água para a mistura SMA 12.O segundo a EN 12697-12

Identificação do grupo	Identificação das amostras	Resultados obtidos		
		Tipo de rotura (Trac. ind., def., comb.)	Revestimento de ligante na superfície do agregado exposto (N.A., Rr, Er)	Presença de agregado fraturado ou esmagado (N.A., Rf, Ef)
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA12.O-SA1.1	Comb.	N.A.	Rf
	SMA12.O-SA1.2	Comb.	N.A.	Rf
	SMA12.O-SA1.3	Comb.	N.A.	Rf
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA12.O-SA1.4	Comb.	N.A.	Rf
	SMA12.O-SA1.5	Comb.	N.A.	Rf
	SMA12.O-SA1.6	Comb.	N.A.	Rf
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C (20 pancadas) ¹⁾	SMA12.O-SA2.1	Comb.	N.A.	Rf
	SMA12.O-SA2.2	Comb.	N.A.	Rf
	SMA12.O-SA2.3	Comb.	N.A.	Rf
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C (20 pancadas) ¹⁾	SMA12.O-SA2.4	Comb.	N.A.	Rf
	SMA12.O-SA2.5	Comb.	N.A.	Rf
	SMA12.O-SA2.6	Comb.	N.A.	Rf

Legenda: 1) provetes fabricados com amostras de misturas SMA não compactada recolhida durante os trabalhos de pavimentação do trecho experimental; Trac. Ind. - rotura por tração indireta evidente; Def. - rotura por deformação; Comb. - rotura combinada; Rr - foram observadas deficiências no revestimento com reduzida expressão; Er - foram observadas deficiências no revestimento com elevada expressão; Rf - foram observadas algumas partículas fraturadas ou esmagadas (com reduzida expressão); Ef - foram observadas partículas fraturadas ou esmagadas com elevada expressão

Quadro III.5 – Resultados da avaliação da sensibilidade à água obtidos para as misturas SMA 14-1 segundo a EN 12697-12 e a MIL-STD-620A

Identificação do grupo	Identificação das amostras	Resultados obtidos							
		Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_V (%)	Resistência à tração indireta, <i>ITS</i> (kPa)	Resistência conservada em tração indireta, <i>ITSR</i> (%)	Força de rotura corrigida, F_n (kN)	Resistência conservada <i>IRC</i> (%)		
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA14-1.O-SA1.1	2,511	4,1 [3,0 ¹]	1737	100 (101)	-	-		
	SMA14-1.O-SA1.2	2,490	4,9 [3,8 ¹]						
	SMA14-1.O-SA1.3	2,485	5,0 [4,0 ¹]						
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA14-1.O-SA1.4	2,507	4,2 [3,1 ¹]	1755					
	SMA14-1.O-SA1.5	2,493	4,7 [3,7 ¹]						
	SMA14-1.O-SA1.6	2,481	5,2 [4,1 ¹]						
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA14-1.PR-SA1.1	2,541	1,8	2035	93	-	-		
	SMA14-1.PR-SA1.2	2,537	2,0						
	SMA14-1.PR-SA1.3	2,541	1,8						
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA14-1.PR-SA1.4	2,532	2,2	1883					
	SMA14-1.PR-SA1.5	2,530	2,2						
	SMA14-1.PR-SA1.6	2,534	2,1						
Provetes imersos durante 40 minutos a 60 °C	SMA14-1.PR-SA2.1	2,539	1,9	-	-	9,40	88		
	SMA14-1.PR-SA2.2	2,543	1,7						
	SMA14-1.PR-SA2.3	2,540	1,9						
Provetes imersos durante 24 horas a 60 °C	SMA14-1.PR-SA2.4	2,536	2,0			-		-	8,26
	SMA14-1.PR-SA2.5	2,541	1,8						
	SMA14-1.PR-SA2.6	2,538	1,9						

Legenda: 1) valor da porosidade assumindo a mesma baridade máxima teórica do estudo da Pragosa S.A. (2,588 Mg/m³)

Quadro III.6 – Tipo de rotura dos provetes avaliados à sensibilidade à água para as misturas SMA 14-1 segundo a EN 12697-12

Identificação do grupo	Identificação das amostras	Resultados obtidos		
		Tipo de rotura (Trac. ind., def., comb.)	Revestimento de ligante na superfície do agregado exposto (N.A., Rr, Er)	Presença de agregado fraturado ou esmagado (N.A., Rf, Ef)
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA14-1.O-SA1.1	Comb.	N.A.	Rf
	SMA14-1.O-SA1.2	Comb.	N.A.	Rf
	SMA14-1.O-SA1.3	Comb.	N.A.	Rf
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA14-1.O-SA1.4	Comb.	N.A.	Rf
	SMA14-1.O-SA1.5	Comb.	N.A.	Rf
	SMA14-1.O-SA1.6	Comb.	N.A.	Rf

Legenda: Trac. Ind. - rotura por tração indireta evidente; Def. - rotura por deformação; Comb. - rotura combinada; Rr - foram observadas deficiências no revestimento com reduzida expressão; Er - foram observadas deficiências no revestimento com elevada expressão; Rf - foram observadas algumas partículas fraturadas ou esmagadas (com reduzida expressão); Ef - foram observadas partículas fraturadas ou esmagadas com elevada expressão

Quadro III.7 – Resultados da avaliação da sensibilidade à água obtidos para a mistura SMA 14-2 segundo a EN 12697-12 e a MIL-STD-620A

Identificação do grupo	Identificação das amostras	Resultados obtidos					
		Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_V (%)	Resistência à tração indireta, <i>ITS</i> (kPa)	Resistência conservada em tração indireta, <i>ITSR</i> (%)	Força de rotura corrigida, F_n (kN)	Resistência conservada <i>IRC</i> (%)
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA14-2-SA1.1	2,400	1,2	1830	90	-	-
	SMA14-2-SA1.2	2,358	2,9				
	SMA14-2-SA1.3	2,391	1,6				
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA14-2-SA1.4	2,388	1,7	1640	-	-	-
	SMA14-2-SA1.5	2,387	1,7				
	SMA14-2-SA1.6	2,390	1,6				
Provetes imersos durante 40 minutos a 60 °C	SMA14-2-SA2.1	2,394	1,4	-	-	8,60	84
	SMA14-2-SA2.2	2,362	2,8				
	SMA14-2-SA2.3	2,381	2,0				
Provetes imersos durante 24 horas a 60 °C	SMA14-2-SA2.4	2,363	2,7	-	-	7,22	84
	SMA14-2-SA2.5	2,401	1,2				
	SMA14-2-SA2.6	2,380	2,0				

Quadro III.8 – Tipo de rotura dos provetes avaliados à sensibilidade à água para a mistura SMA 14-2 segundo a EN 12697-12

Identificação do grupo	Identificação das amostras	Resultados obtidos		
		Tipo de rotura (Trac. ind., def., comb.)	Revestimento de ligante na superfície do agregado exposto (N.A., Rr, Er)	Presença de agregado fraturado ou esmagado (N.A., Rf, Ef)
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA14-2-SA1.1	Comb.	N.A.	Rf
	SMA14-2-SA1.2	Comb.	N.A.	Rf
	SMA14-2-SA1.3	Comb.	N.A.	Rf
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA14.2-SA1.4	Comb.	N.A.	Rf
	SMA14-2-SA1.5	Comb.	N.A.	Rf
	SMA14-2-SA1.6	Comb.	N.A.	Rf

Legenda: Trac. Ind. - rotura por tração indireta evidente; Def. - rotura por deformação; Comb. - rotura combinada; Rr - foram observadas deficiências no revestimento com reduzida expressão; Er - foram observadas deficiências no revestimento com elevada expressão; Rf - foram observadas algumas partículas fraturadas ou esmagadas (com reduzida expressão); Ef - foram observadas partículas fraturadas ou esmagadas com elevada expressão

Quadro III.9 – Resultados da avaliação da sensibilidade à água (SMA 12.A) segundo a EN 12697-12

Identificação do grupo	Identificação das amostras	Resultados obtidos			
		Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_v (%)	Resistência à tração indireta, ITS (kPa)	Resistência conservada em tração indireta, ITSR (%)
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA12.A-SA1.1	2,452	1,3	1508	104
	SMA12.A-SA1.2	2,451	1,3		
	SMA12.A-SA1.3	2,453	1,2		
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA12.A-SA1.4	2,455	1,2	1572	
	SMA12.A-SA1.5	2,456	1,1		
	SMA12.A-SA1.6	2,454	1,2		

Quadro III.10 – Tipo de rotura dos provetes avaliados à sensibilidade à água para a mistura SMA 12.A segundo a EN 12697-12

Identificação do grupo	Identificação das amostras	Resultados obtidos		
		Tipo de rotura (Trac. ind., def., comb.)	Revestimento de ligante na superfície do agregado exposto (N.A., Rr, Er)	Presença de agregado fraturado ou esmagado (N.A., Rf, Ef)
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA12.A-SA1.1	Comb.	N.A.	Rf
	SMA12.A-SA1.2	Comb.	N.A.	Rf
	SMA12.A-SA1.3	Comb.	N.A.	Rf
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA12.A-SA1.4	Comb.	N.A.	Rf
	SMA12.A-SA1.5	Comb.	N.A.	Rf
	SMA12.A-SA1.6	Comb.	N.A.	Rf

Legenda: Trac. Ind. - rotura por tração indireta evidente; Def. - rotura por deformação; Comb. - rotura combinada; Rr - foram observadas deficiências no revestimento com reduzida expressão; Er - foram observadas deficiências no revestimento com elevada expressão; Rf - foram observadas algumas partículas fraturadas ou esmagadas (com reduzida expressão); Ef - foram observadas partículas fraturadas ou esmagadas com elevada expressão

Quadro III.11 – Resultados da avaliação da sensibilidade à água (SMA 12.B) segundo a EN 12697-12

Identificação do grupo	Identificação das amostras	Resultados obtidos			
		Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_V (%)	Resistência à tração indireta, ITS (kPa)	Resistência conservada em tração indireta, ITSR (%)
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA12.B-SA1.1	2,375	4,4	1496	86
	SMA12.B-SA1.2	2,382	4,2		
	SMA12.B-SA1.3	2,386	4,0		
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA12.B-SA1.4	2,398	3,5	1281	
	SMA12.B-SA1.5	2,394	3,7		
	SMA12.B-SA1.6	2,398	3,5		

Quadro III.12 – Tipo de rotura dos provetes avaliados à sensibilidade à água para a mistura SMA 12.B segundo a EN 12697-12

Identificação do grupo	Identificação das amostras	Resultados obtidos		
		Tipo de rotura (Trac. ind., def., comb.)	Revestimento de ligante na superfície do agregado exposto (N.A., Rr, Er)	Presença de agregado fraturado ou esmagado (N.A., Rf, Ef)
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA12.B-SA1.1	Comb.	N.A.	Rf
	SMA12.B-SA1.2	Comb.	N.A.	Rf
	SMA12.B-SA1.3	Comb.	N.A.	Rf
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA12.B-SA1.4	Comb.	Rr	Rf
	SMA12.B-SA1.5	Comb.	N.A.	Rf
	SMA12.B-SA1.6	Comb.	N.A.	Rf

Legenda: Trac. Ind. - rotura por tração indireta evidente; Def. - rotura por deformação; Comb. - rotura combinada; Rr - foram observadas deficiências no revestimento com reduzida expressão; Er - foram observadas deficiências no revestimento com elevada expressão; Rf - foram observadas algumas partículas fraturadas ou esmagadas (com reduzida expressão); Ef - foram observadas partículas fraturadas ou esmagadas com elevada expressão

Quadro III.13 – Resultados da avaliação da sensibilidade à água (SMA 12.C) segundo a EN 12697-12

Identificação do grupo	Identificação das amostras	Resultados obtidos			
		Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_v (%)	Resistência à tração indireta, ITS (kPa)	Resistência conservada em tração indireta, ITSR (%)
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA12.C-SA1.1	2,367	4,7	1339	75
	SMA12.C-SA1.2	2,383	4,1		
	SMA12.C-SA1.3	2,378	4,3		
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA12.C-SA1.4	2,374	4,4	1008	
	SMA12.C-SA1.5	2,375	4,4		
	SMA12.C-SA1.6	2,369	4,6		

Quadro III.14 – Tipo de rotura dos provetes avaliados à sensibilidade à água para a mistura SMA 12.C segundo a EN 12697-12

Identificação do grupo	Identificação das amostras	Resultados obtidos		
		Tipo de rotura (Trac. ind., def., comb.)	Revestimento de ligante na superfície do agregado exposto (N.A., Rr, Er)	Presença de agregado fraturado ou esmagado (N.A., Rf, Ef)
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA12.C-SA1.1	Comb.	Rr	Rf
	SMA12.C-SA1.2	Comb.	N.A.	Rf
	SMA12.C-SA1.3	Comb.	N.A.	Rf
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA12.C-SA1.4	Comb.	N.A.	Rf
	SMA12.C-SA1.5	Comb.	Rr	Rf
	SMA12.C-SA1.6	Comb.	N.A.	Rf

Quadro III.15 – Resultados da avaliação da sensibilidade à água (SMA 14-1.E) segundo a EN 12697-12

Identificação do grupo	Identificação das amostras	Resultados obtidos			
		Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_V (%)	Resistência à tração indireta, ITS (kPa)	Resistência conservada em tração indireta, ITS _R (%)
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA14-1.E-SA1.1	2,527	3,5	1532	100 (101)
	SMA14-1.E-SA1.2	2,526	3,5		
	SMA14-1.E-SA1.3	2,520	3,8		
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA14-1.E-SA1.4	2,530	3,4	1550	
	SMA14-1.E-SA1.5	2,530	3,4		
	SMA14-1.E-SA1.6	2,530	3,4		

Quadro III.16 – Tipo de rotura dos provetes avaliados à sensibilidade à água para a mistura SMA 14-1.E segundo a EN 12697-12

Identificação do grupo	Identificação das amostras	Resultados obtidos		
		Tipo de rotura (Trac. ind., def., comb.)	Revestimento de ligante na superfície do agregado exposto (N.A., Rr, Er)	Presença de agregado fraturado ou esmagado (N.A., Rf, Ef)
Provetes acondicionados durante 70 horas ao ar a 20 °C	SMA14-1.E-SA1.1	Comb.	N.A.	Rf
	SMA14-1.E-SA1.2	Comb.	N.A.	Rf
	SMA14-1.E-SA1.3	Comb.	N.A.	Rf
Provetes submetidos a vácuo e imersos durante 70 horas a 40 °C	SMA14-1.E-SA1.4	Comb.	N.A.	Rf
	SMA14-1.E-SA1.5	Comb.	N.A.	N.A.
	SMA14-1.E-SA1.6	Comb.	N.A.	Rf

Legenda: Trac. Ind. - rotura por tração indireta evidente; Def. - rotura por deformação; Comb. - rotura combinada; Rr - foram observadas deficiências no revestimento com reduzida expressão; Er - foram observadas deficiências no revestimento com elevada expressão; Rf - foram observadas algumas partículas fraturadas ou esmagadas (com reduzida expressão); Ef - foram observadas partículas fraturadas ou esmagadas com elevada expressão

ANEXO IV – Resultados dos ensaios de avaliação do módulo de deformabilidade e resistência ao fendilhamento à fadiga

Quadro IV.1 – Resultados do módulo de deformabilidade e vida à fadiga para as vigas ensaiadas à flexão (SMA 11)

Identificação das amostras	Resultados obtidos a 20 °C								
	Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_v (%)	Módulo de deformabilidade médio (MPa)					ε_6 ($\times 10^{-6}$ m/m)	Inclinação da lei de fadiga, p
			1 Hz	4 Hz	8 Hz	10 Hz	30 Hz		
F.S11.1.1	2,465	5,8	2067	3050	3673	3908	5140	273	-6,9
F.S11.1.2	2,476	5,4							
F.S11.1.3	2,471	5,5							
F.S11.1.4	2,479	5,2							
F.S11.1.5	2,461	5,9							
Desvio padrão (σ)	0,007	0,3	207	193	195	217	386	-	-
Coefficiente de variação (%)	0,3	5,2	10,0	6,3	5,3	5,6	7,5	-	-

Quadro IV.2 – Resultados do módulo de deformabilidade e vida à fadiga para as vigas ensaiadas à flexão (SMA 12.O)

Identificação das amostras	Resultados obtidos a 20 °C								
	Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_v (%)	Módulo de deformabilidade médio (MPa)					ε_6 ($\times 10^{-6}$ m/m)	Inclinação da lei de fadiga, p
			1 Hz	4 Hz	8 Hz	10 Hz	30 Hz		
F.S12.O.1.1	2,305	8,9	2757	3801	4374	4571	5537	230 ¹⁾	-5,6
F.S12.O.1.2	2,280	9,9							
F.S12.O.1.4	2,250	10,8							
F.S12.O.1.5	2,258	9,5							
F.S12.O.1.6	2,259	11,1							
F.S12.O.2.1	2,258	10,8	2402	3106	3624	3818	4455	-	-
Desvio padrão (σ)	0,021	0,9	352	522	577	600	719	-	-
Coefficiente de variação (%)	0,9	8,6	13,6	15,1	14,4	14,3	14,4	-	-
F.S12.O.4.1	2,434	3,8	1437	2355	2906	3106	4128	337	-8,6
F.S12.O.4.2	2,439	3,6							
F.S12.O.4.3	2,438	3,7							
F.S12.O.4.4	2,446	3,4							
F.S12.O.4.5	2,442	3,5							
F.S12.O.5.1	2,373	6,2	1631	2565	3128	3255	4417	-	-
F.S12.O.5.2	2,419	4,4							
F.S12.O.5.3	2,417	4,5							
F.S12.O.5.4	2,410	4,8							
F.S12.O.5.5	2,381	5,9							
Desvio padrão (σ)	0,026	1,0	111	158	209	160	193	-	-
Coefficiente de variação (%)	1,1	22,8	7,2	6,7	7,2	5,2	4,7	-	-

Legenda: 1) provetes obtidos de lajetas recolhidas no trecho experimental

Quadro IV.3 – Resultados do módulo de deformabilidade e vida à fadiga para as vigas ensaiadas à flexão (SMA 14-1.O)

Identificação das amostras	Resultados obtidos a 20 °C								
	Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_V (%)	Módulo de deformabilidade médio (MPa)					ϵ_6 ($\times 10^{-6}$ m/m)	Inclinação da lei de fadiga, p
			1 Hz	4 Hz	8 Hz	10 Hz	30 Hz		
F.S14-1.O-1.1	2,593	0,9	1643	2845	3559	3827	5173	525	-11,0
F.S14-1.O-1.2	2,588	1,1							
F.S14-1.O-1.3	2,581	1,4							
F.S14-1.O-1.4	2,586	1,2							
F.S14-1.O-1.5	2,587	1,1							
F.S14-1.O-2.1	2,592	1,0							
Desvio padrão (σ)	0,004	0,2	111	208	193	272	240	-	-
Coefficiente de variação (%)	0,2	15,4	6,8	7,3	5,4	7,1	4,6	-	-

Quadro IV.4 – Resultados do módulo de deformabilidade e vida à fadiga para as vigas ensaiadas à flexão (SMA 12.B)

Identificação das amostras	Resultados obtidos a 20 °C								
	Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_V (%)	Módulo de deformabilidade médio (MPa)					ϵ_6 ($\times 10^{-6}$ m/m)	Inclinação da lei de fadiga, p
			1 Hz	4 Hz	8 Hz	10 Hz	30 Hz		
F.S12.B-1.1	2,421	2,5	1375	2389	2971	3161	4437	400	-6,7
F.S12.B-1.2	2,420	2,6							
F.S12.B-1.3	2,414	2,8							
F.S12.B-1.4	2,412	2,9							
F.S12.B-1.5	2,419	2,6							
F.S12.B-2.1	2,415	2,8							
F.S12.B-2.2	2,411	2,9							
F.S12.B-2.3	2,407	3,1							
Desvio padrão (σ)	0,005	0,2	353	79	130	95	129	-	-
Coefficiente de variação (%)	0,2	7,1	25,7	3,3	4,4	3,0	2,9	-	-

Quadro IV.5 – Resultados do módulo de deformabilidade e vida à fadiga para as vigas ensaiadas à flexão (SMA 12.C)

Identificação das amostras	Resultados obtidos a 20 °C								
	Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_v (%)	Módulo de deformabilidade médio (MPa)					ε_6 ($\times 10^{-6}$ m/m)	Inclinação da lei de fadiga, p
			1 Hz	4 Hz	8 Hz	10 Hz	30 Hz		
F.S12.C-1.1	2,417	2,7	1493	2489	3030	3248	4509	425	-8,3
F.S12.C-1.2	2,419	2,6							
F.S12.C-1.3	2,417	2,7							
F.S12.C-1.4	2,415	2,8							
F.S12.C-1.5	2,417	2,7							
F.S12.C-2.1	2,414	2,8							
F.S12.C-2.2	2,407	3,1							
Desvio padrão (σ)	0,004	0,2	149	136	99	73	135	-	-
Coefficiente de variação (%)	0,2	5,8	10,0	5,5	3,3	2,2	3,0	-	-

Quadro IV.6 – Resultados do módulo de deformabilidade e vida à fadiga para as vigas ensaiadas à flexão (SMA 14-1.E)

Identificação das amostras	Resultados obtidos a 20 °C								
	Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_v (%)	Módulo de deformabilidade médio (MPa)					ε_6 ($\times 10^{-6}$ m/m)	Inclinação da lei de fadiga, p
			1 Hz	4 Hz	8 Hz	10 Hz	30 Hz		
F.S14-1.E-1.1	2,540	3,0	1766	2943	3564	3839	5270	459	-9,0
F.S14-1.E-1.2	2,542	2,9							
F.S14-1.E-1.3	2,539	3,0							
F.S14-1.E-1.4	2,541	2,9							
F.S14-1.E-1.5	2,544	2,8							
F.S14-1.E-2.1	2,539	3,0							
F.S14-1.E-2.2	2,536	3,1							
Desvio padrão (σ)	0,003	0,1	100	111	112	145	198	-	-
Coefficiente de variação (%)	0,1	3,3	5,7	3,8	3,1	3,8	3,8	-	-

Quadro IV.7 – Resultados do módulo de deformabilidade e vida à fadiga para as vigas envelhecidas ensaiadas à flexão (SMA 12.O)

Identificação das amostras	Resultados obtidos a 20 °C								
	Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_V (%)	Módulo de deformabilidade médio (MPa)					ϵ_6 ($\times 10^{-6}$ m/m)	Inclinação da lei de fadiga, p
			1 Hz	4 Hz	8 Hz	10 Hz	30 Hz		
F.e.S12.O-6.1	2,469	2,4	5214	7074	8265	8592	10508	212 ¹⁾	-5,7
F.e.S12.O-6.2	2,470	2,4							
F.e.S12.O-6.3	2,469	2,4							
F.e.S12.O-6.4	2,469	2,4							
F.e.S12.O-6.5	2,465	2,6							
F.e.S12.O-7.1	2,461	2,8							
F.e.S12.O-7.2	2,467	2,5							
Desvio padrão (σ)	0,003	0,2	307	191	206	214	190	-	-
Coeficiente de variação (%)	0,1	6,1	5,9	2,7	2,5	2,5	1,8	-	-

Legenda: 1) envelhecida em laboratório a 85 °C, durante 5 dias

Quadro IV.8 – Resultados do módulo de deformabilidade e vida à fadiga para as vigas envelhecidas ensaiadas à flexão (SMA 12.O)

Identificação das amostras	Resultados obtidos a 20 °C								
	Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_V (%)	Módulo de deformabilidade médio (MPa)					ϵ_6 ($\times 10^{-6}$ m/m)	Inclinação da lei de fadiga, p
			1 Hz	4 Hz	8 Hz	10 Hz	30 Hz		
F.te.S12.O-8.1	2,299	9,2	3886	4882	5314	5456	5901	157 ¹⁾	-12,2
F.te.S12.O-8.2	2,299	9,2							
F.te.S12.O-8.3	2,292	9,4							
F.te.S12.O-8.4	2,299	9,2							
F.te.S12.O-8.5	2,290	9,5							
F.te.S12.O-9.1	2,291	9,5							
F.te.S12.O-9.2	2,287	9,6							
F.te.S12.O-9.3	2,293	9,4							
F.te.S12.O-9.4	2,276	10,1							
F.te.S12.O-9.5	2,287	9,7							
F.te.S12.O-10.1	2,289	9,7							
F.te.S12.O-10.2	2,290	9,7							
F.te.S12.O-10.3	2,295	9,5							
F.te.S12.O-10.4	2,306	9,1							
Desvio padrão (σ)	0,007	0,3	436	423	602	588	1087	-	-
Coeficiente de variação (%)	0,3	2,8	11,2	8,7	11,3	10,8	18,4	-	-

Legenda: 1) recolhida do trecho experimental após quatro anos em serviço

Quadro IV.9 – Resultados do módulo de deformabilidade e vida à fadiga para as vigas envelhecidas ensaiadas à flexão (SMA 12.B)

Identificação das amostras	Resultados obtidos a 20 °C								
	Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_V (%)	Módulo de deformabilidade médio (MPa)					ε_6 ($\times 10^{-6}$ m/m)	Inclinação da lei de fadiga, p
			1 Hz	4 Hz	8 Hz	10 Hz	30 Hz		
F.e.S12.B-3.1	2,436	2,0	1846	2917	3570	3819	5193	410 ¹⁾	-8,3
F.e.S12.B-3.2	2,434	2,1							
F.e.S12.B-3.3	2,434	2,1							
F.e.S12.B-3.4	2,436	2,0							
F.e.S12.B-3.5	2,431	2,2							
F.e.S12.B-4.1	2,441	1,8							
Desvio padrão (σ)	0,003	0,1	90	160	154	156	246	-	-
Coeficiente de variação (%)	0,1	6,7	4,9	5,5	4,3	4,1	4,7	-	-

Legenda: 1) envelhecida em laboratório a 85 °C, durante 5 dias

Quadro IV.10 – Resultados do módulo de deformabilidade e vida à fadiga para as vigas envelhecidas ensaiadas à flexão (SMA 12.C)

Identificação das amostras	Resultados obtidos a 20 °C								
	Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_V (%)	Módulo de deformabilidade médio (MPa)					ε_6 ($\times 10^{-6}$ m/m)	Inclinação da lei de fadiga, p
			1 Hz	4 Hz	8 Hz	10 Hz	30 Hz		
F.e.S12.C-3.1	2,364	2,4	3240	4782	5600	5938	7428	248 ¹⁾	-6,2
F.e.S12.C-3.2	2,361	2,1							
F.e.S12.C-3.3	2,342	2,1							
F.e.S12.C-3.4	2,344	2,1							
F.e.S12.C-3.5	2,367	2,1							
F.e.S12.C-4.1	2,363	2,2							
F.e.S12.C-4.2	2,336	2,3							
F.e.S12.C-4.3	2,353	2,0							
Desvio padrão (σ)	0,012	0,13	250	365	383	369	451	-	-
Coeficiente de variação (%)	0,5	6,0	7,7	7,6	6,8	6,2	6,1	-	-

Legenda: 1) envelhecida em laboratório a 85 °C, durante 5 dias

Quadro IV.11 – Resultados do módulo de deformabilidade e vida à fadiga para as vigas envelhecidas ensaiadas à flexão (SMA 14-1.O)

Identificação das amostras	Resultados obtidos a 20 °C								
	Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_V (%)	Módulo de deformabilidade médio (MPa)					ε_6 ($\times 10^{-6}$ m/m)	Inclinação da lei de fadiga, p
			1 Hz	4 Hz	8 Hz	10 Hz	30 Hz		
F.te.S14-1.O-1.1	2,425	6,3	1998	2773	3283	3542	4159	282 ¹⁾	-4,9
F.te.S14-1.O-1.2	2,408	7,0							
Desvio padrão (σ)	0,012	0,5	55	52	44	74	65	-	-
Coeficiente de variação (%)	0,5	7,4	2,8	1,9	1,3	2,1	1,6	-	-

Legenda: 1) recolhida na TEXSA após dois anos em serviço

Quadro IV.12 – Resultados do módulo de deformabilidade e vida à fadiga para as vigas envelhecidas ensaiadas à flexão (SMA 14-1.E)

Identificação das amostras	Resultados obtidos a 20 °C								
	Baridade, ρ_{ba} (Mg/m ³)	Porosidade, V_V (%)	Módulo de deformabilidade médio (MPa)					ε_6 ($\times 10^{-6}$ m/m)	Inclinação da lei de fadiga, p
			1 Hz	4 Hz	8 Hz	10 Hz	30 Hz		
F.e.S14-1.E-3.1	2,551	2,6	2222	3490	4244	4540	6082	432 ¹⁾	-13,9
F.e.S14-1.E-3.2	2,565	2,0							
F.e.S14-1.E-3.3	2,559	2,3							
F.e.S14-1.E-3.4	2,564	2,1							
F.e.S14-1.E-3.5	2,559	2,3							
F.e.S14-1.E-4.1	2,551	2,6							
F.e.S14-1.E-4.2	2,557	2,3							
Desvio padrão (σ)	0,006	0,2	160	159	213	237	307	-	-
Coefficiente de variação (%)	0,2	9,8	7,2	4,6	5,0	5,2	5,0	-	-

Legenda: 1) envelhecida em laboratório a 85 °C, durante 5 dias

ANEXO V – Aspeto das lajetas antes e após remoção da película de betume existente à superfície

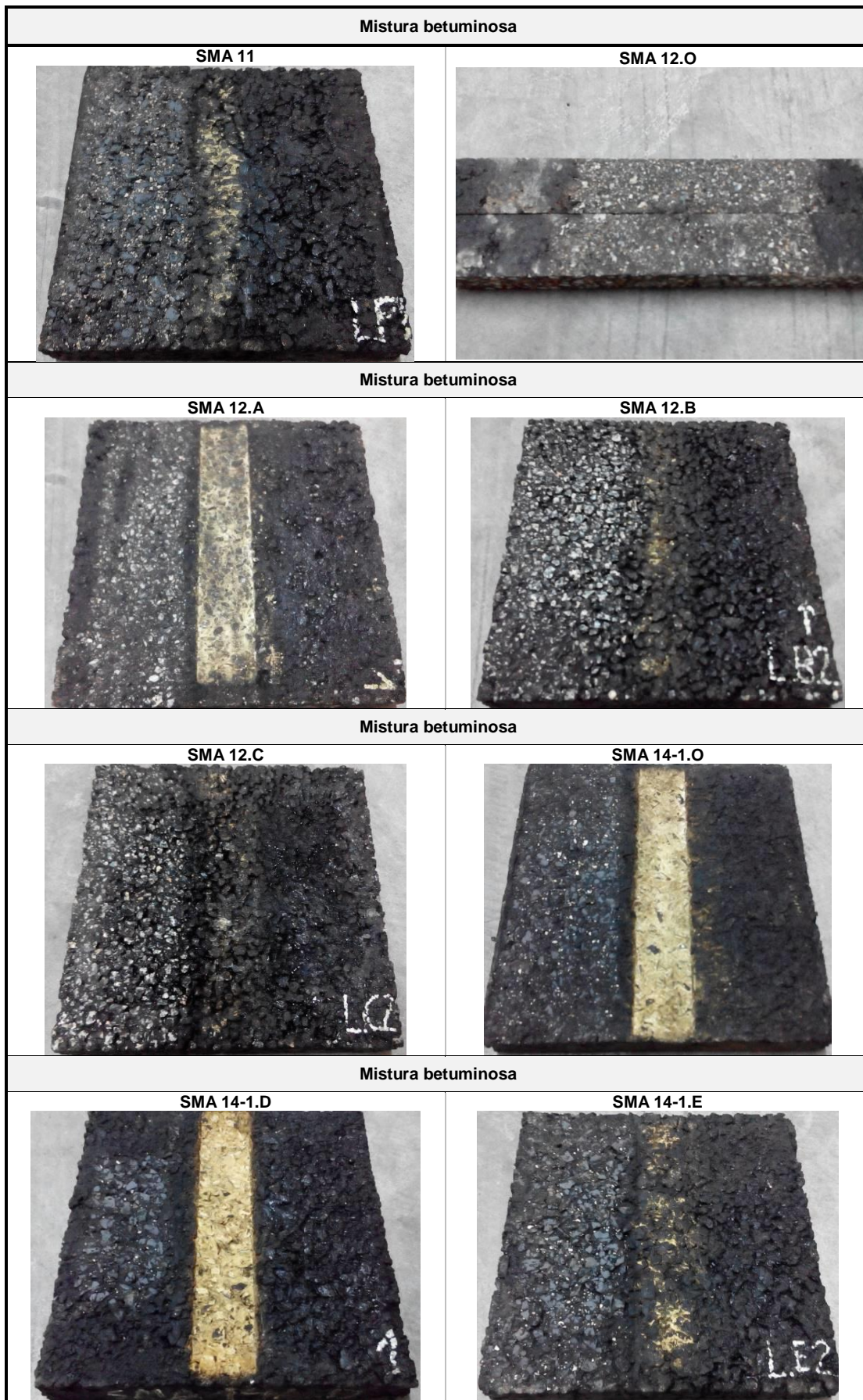


Figura V.1 – Aspeto das lajetas antes e após remoção da película de betume existente à superfície