



M 2018

ESTUDO DA FORMULAÇÃO E APLICAÇÃO DE UMA MISTURA BETUMINOSA STONE MASTIC ASPHALT

PEDRO MIGUEL FERNANDES NOGUEIRA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DA FORMULAÇÃO E APLICAÇÃO DE UMA MISTURA BETUMINOSA STONE MASTIC ASPHALT

PEDRO MIGUEL FERNANDES NOGUEIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientador: Professor Doutor Jaime Manuel Queirós Ribeiro

Coorientador: Eng.º Victor César Barbosa de Almeida Pais

JUNHO DE 2018

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2017/2018

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2017/2018 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2018.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À memória do meu avô Aventino e bisavó Judite,

“É comprida a estrada que vai desde a intenção à execução.”

Jean B. P. Molière

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação foi realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, no ramo de especialização de Vias de Comunicação, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Para ser possível desenvolver este trabalho foram vários os contributos de pessoas, que me auxiliaram em cada etapa e em cada dificuldade que me surgiu. Pretendo agradecer-lhes, pois direta ou indiretamente, contribuíram para o meu percurso como estudante e como pessoa.

Em primeiro, agradecer aos docentes da FEUP, sobretudo a todos os professores do ramo de Vias de Comunicação.

Especialmente ao meu orientador, Professor Doutor Jaime Manuel Queirós Ribeiro, por ter aceite este projeto, pela sua motivação, disponibilidade, empenho, dedicação, conhecimento científico e empírico transmitidos, e pela vontade de ir sempre mais além nos assuntos abordados neste documento, bem como na qualidade dos mesmos. Foram fatores preponderantes para o resultado deste trabalho.

À Câmara Municipal de Lisboa por remeter os meus pedidos ao Dr. Fernando Martinho, e ao próprio que atendeu ao apoio pedido para esta dissertação, com fornecimento de recursos, partilha de documentos técnicos e do seu conhecimento sobre o assunto em causa.

À Rettenmaier Ibérica (JRS), particularmente ao seu Diretor Geral, Santiago Lanchas, pela explicação detalhada do funcionamento das fibras que comercializam, pela partilha dos seus estudos e ensaios efetuados e pela cedência das amostras de fibras que carecia para o ensaio de escorrimento.

Ao Laboratório de Acústica da FEUP, particularmente ao Prof. Dr. António Pedro Oliveira de Carvalho (diretor do laboratório), pois deu permissão do ensaio e ao Eng.º António Eduardo Costa (técnico do laboratório principal) que acompanhou todo o trabalho.

À Mota-Engil Engenharia e Construção, SA, pela oportunidade de escrever a tese em ambiente empresarial, sobretudo: ao meu coorientador, Eng.º Victor César Barbosa de Almeida Pais, pelos recursos fulcrais que autorizou fornecer em nome da empresa; ao Eng.º José Morais pelo acompanhamento, esclarecimento, bibliografia disponibilizada e partilha da sua experiência enquanto Diretor de Obra; ao Eng.º João Afonso, responsável pelo Núcleo Técnico de Pavimentos, por toda a documentação fornecida e pela partilha de conhecimento na área dos pavimentos em geral e mais concretamente, do SMA; e ao Luís Ferreira, pela disponibilização de informações de obras já concluídas (cadernos de encargos, propostas comerciais e MTQ).

Em geral, a todas as empresas que cederam informações das obras em que estiveram envolvidos.

A todos aqueles, quer professores quer amigos, que me acompanharam durante o meu trajeto enquanto estudante, salientando dois grandes amigos e colegas de curso, José Faria e Luís Correia, pois sem eles, certamente, muita coisa seria diferente; à minha namorada, Ana Catarina, que acompanhou todo o meu percurso académico, dando-me a estabilidade, serenidade e afeto que precisei.

Distintamente à minha família, que ao longo de toda a minha formação, ainda que com os sacrifícios que tiveram de fazer, me deram excelentes condições em tudo o que necessitei, além do apoio incondicional que sempre demonstraram. Por isso, ao meu pai, José Artur, à minha mãe, Paula e à minha irmã, Andreia, um grande e especial obrigado.

RESUMO

As misturas betuminosas Stone Mastic Asphalt começaram a ser utilizadas na Alemanha e só mais tarde passaram a aplicar-se no resto da Europa, nomeadamente em Portugal.

As características comprovadas no país de origem, distintamente a elevada resistência à deformação permanente e à fadiga, e a durabilidade superior, justificam a vontade de as aplicar para camadas de desgaste em outros países, ajustando-se ao paradigma nacional atual, de promoção de ações de beneficiação das estradas existentes, de modo a conservá-las.

Os objetivos desta dissertação passam por procurar conhecer um pouco da história do SMA, entender as suas características, perceber onde já foram aplicadas e o intuito dessas aplicações e analisar bibliografia acerca dos materiais e da própria mistura. De seguida, analisar e resumir a EN 13108-5 (CEN, 2016d), descrevendo também as etapas a respeitar na formulação de uma mistura deste género.

Apenas será feita a formulação da mistura através do método de Marshall, dado ser o método usado em Portugal. O SUPERPAVE não é alvo de análise neste trabalho.

Um outro objetivo passa por acompanhar uma obra, perceber o porquê de se utilizar SMA na mesma e fazer a descrição da sequência de acontecimentos a partir da formulação até à compactação da mistura.

Serão realizados ensaios de escoamento com duas fibras de celulose (uma revestida com betume e outra com cera) para avaliar comparativamente os resultados. Com o intuito de caracterizar acusticamente a mistura, serão ainda apresentados resultados de um ensaio laboratorial efetuado ao ruído de percussão.

PALAVRAS-CHAVE: Misturas betuminosas, Stone Mastic Asphalt, Análise da EN 13108-5, Formulação da mistura SMA, Aplicação da mistura SMA.

ABSTRACT

The SMA bituminous mixtures started being used in Germany and only later on were they applied in the rest of Europe, namely in Portugal.

The characteristics verified in the origin country, in particular the high resistance to permanent deformation and to fatigue, and its superior durability account for the will to apply them for surface courses in other countries adjusting it to the current national paradigm, of promotion of improvement works of the existing roads in order to preserve them.

The aims of this essay lead to getting to know a bit of the SMA history, understanding its characteristics, realising where they were applied before and the aim of those. Also, researching bibliography about the materials and the mixture itself. Next, analysing and summing up the EN 13108-5 (CEN, 2016d), describing the steps to be respected in the formulation of a mixture of this kind.

The mixture formulation will only be done through the Marshall method, given that it is the one used in Portugal. The SUPERPAVE is not an analysis target in this work.

Another aim is to run the work, understand the reason why to use SMA anyway and describe the events sequence from the formulation to the mixture compaction.

Draining tests of two cellulose fibres will be carried out (one with bitumen and another one with wax) so as to assess the results in comparison. With the intention of characterising the mixture acoustically, results of a laboratory test performed to the percussion noise will still be presented.

KEY WORDS: Bitumen mixtures, Stone Mastic Asphalt, Analysis of the EN 13108-5, SMA formulation mixture, SMA mixture application.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
1.2. PROBLEMÁTICA E RELEVÂNCIA DO TEMA	2
1.3. OBJETIVOS	2
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
 2. NOÇÕES GERAIS	 5
 3. ESTADO DA ARTE	 11
3.1. INTRODUÇÃO	11
3.2. ESTRUTURA DOS PAVIMENTOS	12
3.3. PATOLOGIAS MAIS FREQUENTES EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	14
3.4. SOLUÇÕES PARA MANUTENÇÃO DA CAMADA DE DESGASTE	17
3.5. DEFINIÇÕES DE SMA	18
3.6. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO DAS SMA	19
3.7. PROPRIEDADES GERAIS E APLICAÇÕES	19
3.7.1. AVENIDA DO BRASIL – LISBOA	24
3.7.2. “VIADUTO IX – AE7: BASTO/RIBEIRA DE PENA”	24
3.7.3. “AE25 – BENEFICIAÇÃO ENTRE CARVOEIRO E BOA ALDEIA”	25
3.7.4. “AE24 – LANÇOS G E F, GRANDES REPARAÇÕES”	25
3.7.5. “IC2 (EN1) – REQUALIFICAÇÃO ENTRE LEIRIA E BARRAÇÃO”	26
3.7.6. “EN15 – REQUALIFICAÇÃO ENTRE PAREDES (KM 26+944) E A EN106 (KM 29+444)”	26
3.8. ESTRUTURA DA MISTURA BETUMINOSA SMA	27
3.9. ESTUDOS DE MATERIAIS E SUAS PROPRIEDADES QUANDO USADOS EM SMA	28
3.9.1. LIGANTE	28
3.9.2. ADITIVO: FIBRAS	31
3.9.3. RESTANTES ADITIVOS	36
3.9.4. AGREGADOS	36
3.10. USO DA NANOTECNOLOGIA NA ENGENHARIA DOS PAVIMENTOS. APLICAÇÕES EM SMA	38

4. ANÁLISE DA EN 13108-5. FORMULAÇÃO DA MISTURA	41
4.1. ANÁLISE DA EN 13108-5 DE 2016	41
4.1.1. REQUISITOS PARA OS MATERIAIS CONSTITUINTES	42
4.1.1.1. Ligante	42
4.1.1.2. Agregado	44
4.1.2. REQUISITOS PARA A MISTURA	44
4.1.2.1. Gerais, composição, granulometria, teor de ligante e aditivos	44
4.1.2.2. Propriedades	46
4.1.2.2.1. Porosidade	46
4.1.2.2.2. Vazios preenchidos com betume	47
4.1.2.2.3. Vazios na mistura de agregados	47
4.1.2.2.4. Escorrimento do ligante	47
4.1.2.2.5. Sensibilidade à água	47
4.1.2.2.6. Resistência à abrasão provocada por pneus pitonados	48
4.1.2.2.7. Resistência à deformação permanente	48
4.1.2.2.8. Rigidez	50
4.1.2.2.9. Resistência à fadiga	50
4.1.2.2.10. Propriedades a baixas temperaturas	50
4.1.2.2.11. “Fracture Toughness”	51
4.1.2.2.12. Atrito após polimento	51
4.1.2.2.13. Revestimento e homogeneidade	51
4.1.2.2.14. Reação ao fogo	51
4.1.2.2.15. Resistência aos combustíveis para aplicação em aeródromos	51
4.1.2.2.16. Resistência aos fluídos descongelantes para aplicação em aeródromos	51
4.1.2.3. Temperatura da mistura	52
4.1.2.4. Substâncias perigosas	52
4.1.2.5. Requisitos conflitantes: Sobre especificação	53
4.2. FORMULAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS SMA	53
4.2.1. PROPRIEDADES DE SMA EM PORTUGAL	54
4.2.1.1. Fuso granulométrico da mistura de agregados do SMA11	54
4.2.1.2. Propriedades dos agregados	55
4.2.1.3. Propriedades da mistura betuminosa	57
4.2.2. DETERMINAÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA DA MISTURA DE AGREGADOS	58
4.2.3. DETERMINAÇÃO DA PERCENTAGEM ÓTIMA DE BETUME	60
4.2.3.1. Preparação de provetes	60
4.2.3.2. Ensaio Marshall	61
4.2.4. FIBRAS	62

4.2.4.1. Fibras comercializadas atualmente, usadas no SMA	62
4.2.4.2. Verificação da quantidade de fibras pelo Ensaio de Escorrimento	63
4.2.5. FÓRMULA DE TRABALHO PARA A MISTURA BETUMINOSA	66

5. ACOMPANHAMENTO DE OBRA: FABRICO E APLICAÇÃO DE SMA

5.1. DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO LOCAL E DA OBRA	67
5.2. FABRICO DA MISTURA	73
5.2.1. CENTRAL DE PRODUÇÃO	73
5.2.2. TRANSPOSIÇÃO DO ESTUDO LABORATORIAL PARA A CENTRAL DE PRODUÇÃO	78
5.3. APLICAÇÃO DA MISTURA	79
5.3.1. TRECHO EXPERIMENTAL E RESULTADOS	79
5.3.2. TRANSPORTE, APLICAÇÃO E COMPACTAÇÃO DA MISTURA	80

6. ESTUDO DE PROPRIEDADES: ESCORRIMENTO E RUÍDO

6.1. COMPARAÇÃO DO EFEITO DAS FIBRAS DE CELULOSE REVESTIDAS A BETUME E A CERA NO ESCORRIMENTO DO LIGANTE	85
6.1.1. ENQUADRAMENTO	85
6.1.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO	86
6.1.3. RESULTADOS E CONCLUSÕES	87
6.2. CARACTERIZAÇÃO DO SMA11 AO RUÍDO DE PERCUSSÃO E COMPARAÇÃO COM O AC14 TRADICIONAL	88
6.2.1. ENQUADRAMENTO	88
6.2.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO	89
6.2.3. RESULTADOS E CONCLUSÕES	90

7. CONCLUSÕES

7.1. CONCLUSÕES GERAIS	93
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	94

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
---	-----------

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3. 1 – A) Fendilhamento; B) Deformações; [Fonte: adaptado de EP (2008b)]	15
Figura 3. 2 – A) Defeitos de Superfície; B) Movimentos de Materiais; [Fonte: adaptado de EP (2008b)]	16
Figura 3. 3 – Reparações [Fonte: adaptado de EP (2008b)]	17
Figura 3. 4 – Média europeia da vida útil das misturas betuminosas [Fonte: adaptado de EAPA (2007)]	20
Figura 3. 5 – Composição de uma mistura Stone Mastic Asphalt [Fonte: adaptado de Technology (2013)]	27
Figura 3. 6 – A) Esquema da degradação de cargas numa camada em SMA [Fonte: adaptado de SEMINAR (2011)]; B) Carote de SMA [Fonte: Própria];	28
Figura 3. 7 – Quadro de caracterização das misturas usadas no ensaio com 5,9 % de ligante [Fonte: adaptado de Manosalvas-Paredes et al. (2016)]	29
Figura 3. 8 – Gráfico da PDRair de acordo com a taxa de substituição do ligante [Fonte: adaptado de Liphardt, Król e Radziszewski (2016)]	30
Figura 3. 9 – A) Resultados do Módulo de Rigidez; B) Resultados do ensaio da Drenagem de Ligante; [Fonte: adaptado de García-Travé et al. (2018)]	31
Figura 3. 10 – Gráfico da profundidade da rodeira em função do número de ciclos de carga de SMA com fibras sintéticas ou naturais [Fonte: adaptado de Kumar et al. (2011)]	32
Figura 3. 11 – Gráfico da Drenagem de Ligante numa mistura SMA14 com fibras naturais ou sintéticas [Fonte: adaptado de Arshad et al. (2016)]	32
Figura 3. 12 – Quadro resumo dos resultados do ensaio de escorrimento de SMA sem fibras, com fibras de coco ou de celulose [adaptado de Vale et al. (2006)]	33
Figura 3. 13 – Gráfico de resultados do ensaio de Análise à Fadiga de SMA sem fibras, com fibras de coco ou de celulose [Fonte: adaptado de Vale, Casagrande e Soares (2014)]	34
Figura 3. 14 – Gráfico de resultados da Estabilidade Marshall em função do teor de PET [adaptado de Ahmadinia et al. (2011)]	35
Figura 3. 15 – Gráfico de resultados do Módulo de Rigidez para cada percentagem de PET, a 3 níveis de pressão [adaptado de Baghaee Moghaddam, Karim e Syammaun (2012)]	35
Figura 3. 16 – Gráfico de resultados do Módulo de Rigidez de misturas SMA em função da quantidade de grafite e das condições de envelhecimento [adaptado de Kök, Yilmaz e Erkus (2017)]	36
Figura 3. 17 – Gráfico de resultados da profundidade da rodeira; A) a 25°C; B) a 60°C; [adaptado de Kuo, Du e Shen (2010)]	37
Figura 3. 18 – Gráfico de resultados do Módulo de Rigidez em função do teor de Nano Fe ₂ O ₃ : A) a 5°C; B) a 15°C; C) a 25°C; [adaptado de Kordi e Shafabakhsh (2017)]	39
Figura 3. 19 – Gráfico de resultados da Profundidade da Rodeira em diferentes amostras, função do teor de Nano Fe ₂ O ₃ e da temperatura de ensaio: A) com carga de 500 kN; B) com carga de 700 kN; [adaptado de Kordi e Shafabakhsh (2017)]	39
Figura 4. 1 – A) Equipamento do Indirect Tensile Test; B) Provetes ensaiados; [Fonte: Própria]	48
Figura 4. 2 – A) Equipamento do ensaio Whell-Tracking; B) Placa 40x30 cm ensaiada; [Fonte: Própria]	49
Figura 4. 3 – Curva granulométrica da mistura de agregados e respetivo fuso granulométrico [Fonte: EXCEL]	58
Figura 4. 4 – Compactadores Marshall: A) do Laboratório Central Mota Engil; B) do Laboratório do estaleiro da obra no Passil [Fonte: Própria]	60
Figura 4. 5 – Prensa Marshall do Laboratório da obra [Fonte: Própria]	62
Figura 4. 6 – Misturas betuminosas descontínuas: A) sem fibras; B) e C) com fibras [Fonte: Martinho et al. (2013)]	63
Figura 4. 7 – A) “Cesto perfurado” [Fonte: Group (2018)] ; B) Tabuleiro [Fonte: Group (2018)]; C) Estufa [Fonte: Gilson Company (2018)]	64
Figura 4. 8 – A) Enchimento dos gobelés com mistura betuminosa; B) Gobelés após escorrimento [Fonte: Própria]	65

Figura 5. 1 – Tráfego pesado na EN4, entre Montijo e Pegões [Fonte: Própria]	67
Figura 5. 2 – Troço de da EN4, entre Montijo e Pegões: 1) Estaleiro da obra e central do Passil; 2) Rotunda de interseção da EN4 com a EN118; 3) Rotunda de interseção da EN4 com a EN10 [Fonte: Google Maps]	68
Figura 5. 3 – Novas gares de transporte público da EN4 [Fonte: Própria]	68
Figura 5. 4 – Saneamento do pavimento no local da anomalia [Fonte: Própria]	72
Figura 5. 5 – Extração de raízes e colocação da tela anti raízes [Fonte: Própria]	72
Figura 5. 6 – A) Exterior da cabine da central de Benafessim; B) Interior da cabine da central de Benafessim; C) Exterior da central do Passil; [Fonte: Própria]	73
Figura 5. 7 – A) Stock de agregado 0/6; B) Stock de agregado 6/10; [Fonte: Própria]	76
Figura 5. 8 – Central de produção do Passil [Fonte: Própria]	76
Figura 5. 9 – Central de produção de Benafessim [Fonte: Própria]	77
Figura 5. 10 – A) Sacos de fibras termo fundíveis; B) Central do Passil com sacos de fibras; C) Comporta para introdução das fibras no misturador; [Fonte: Própria]	77
Figura 5. 11 – Curva granulométrica da mistura de agregados e respetivo fuso granulométrico após Transposição para a central de produção [Fonte: Excel]	79
Figura 5. 12 – Trecho experimental em SMA11 [Fonte: Própria]	80
Figura 5. 13 – Camiões com reboques basculantes integrados com tela de cobertura: A) Fechada; B) Aberta; [Fonte: Própria]	81
Figura 5. 14 – A) Camião a descarregar mistura SMA na pavimentadora; B) Mistura a sair na mesa de espalhamento e equipa de pavimentação; C) Pavimentadora ABG7820; [Fonte: Própria]	82
Figura 5. 15 – A) Cilindros HAMM HD90 desligados; B) e C) Cilindro HAMM HD90 ligado; D) Mancha de água libertada pelos aspersores; E) Aspersores ligados; [Fonte: Própria]	82
Figura 5. 16 – Cilindros não utilizados na compactação de misturas SMA: A) misto; B) de pneus; Cilindros de rolos utilizados na compactação de SMA: C) Caterpillar CB-534D; D) HAMM HD90; [Fonte: Própria]	83
Figura 6. 1 – A) Equipamento do ensaio Los Angeles; B) Esferas metálicas; C) Fibras de celulose revestidas a betume trituradas; D) Fibras de celulose revestidas a cera trituradas; E) Pesagem dos materiais constituintes das misturas; F) Introdução dos materiais no misturador; G) Adição do betume; H) Aquecimento da mistura; [Fonte: Própria]	86
Figura 6. 2 – A) e B) Termómetro laser; C) Pesagem dos gobelés vazios; D) Pesagem dos gobelés + misturas SMA; E) Pesagem dos gobelés após escorrimento; [Fonte: Própria]	87
Figura 6. 3 – Placa serrada de: A) SMA11; B) AC14; [Fonte: Própria]	89
Figura 6. 4 – Máquina de impactos normalizada Brüel & Kjaer na câmara reverberante emissora (pisos superior) em diferentes posições: A) Posição 2; B) Posição 3; C) Posição 4; [Fonte: Própria]	90
Figura 6. 5 – Microfones na câmara reverberante recetora (pisos térreo) em diferentes posições: A) Posição 1; B) Posição 2; [Fonte: Própria]	90

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Definição de cada camada da estrutura de um pavimento rígido [Branco, Pereira e Santos (2006), JAE (1995) e Cepsa Portuguesa (2018)]	12
Quadro 3.2 – Definição de cada camada da estrutura de um pavimento flexível [IPQ (2011) e Cepsa Portuguesa (2018)]	13
Quadro 3.3 – Inventário de obras em Portugal e no mundo, onde pelo menos uma das misturas aplicadas foi SMA [(Martinho, Nunez e Lanchas, 2013)]	21
Quadro 4.1 – Requisitos gerais de classificação da composição _ Peneiros da série base + série 1	45
Quadro 4.2 – Requisitos gerais de classificação da composição _ Peneiros da série base + série 2	45
Quadro 4.3 – Temperatura máxima da mistura em função da classe de penetração do betume (CEN, 2016d)	52
Quadro 4.4 – Proporções (em %) do agregado em cada peneiro, definidas pela IP	55
Quadro 4.5 – Propriedades dos agregados que compõem a mistura SMA11, definidas pela IP	56
Quadro 4.6 – Propriedades da mistura betuminosa SMA11, definidas pela IP	57
Quadro 4.7 – Proporções de agregados determinadas no EF	59
Quadro 4.8 – Curva granulométrica do estudo de SMA11 para a EN4	59
Quadro 4.9 – Fórmula de trabalho para a mistura betuminosa SMA11 Surf PMB 45/80-65	66
Quadro 5.1 – Proporções dos componentes da mistura após transposição para a central de Montemor	78
Quadro 6.1 – Resultados do ensaio de escorrimento da mistura SMA11 com fibras de celulose revestidas a cera	87
Quadro 6.2 – Resultados do ensaio de escorrimento da mistura SMA11 com fibras de celulose revestidas a betume	87
Quadro 6.3 – Resultados do ensaio ao ruído de percussão	91

LISTA DE ABREVIATURAS

Dr. – Doutor
Eng.^a – Engenharia
Eng.^o – Engenheiro
Fig. – Figura
n^o – Número
p.e. – Por exemplo
Prof. – Professor
Prox. – Próxima
séc. – Século

LISTA DE FÓRMULAS QUÍMICAS

Fe₂O₃ – Óxido de Ferro III
SiO₂ – Dióxido de Silício

LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

Abr – Abrasão
AC – Asphalt Concrete
ACVTL – Asphalt Concrete for Very Thin Layers
AE – Autoestrada
BBr – Betão Betuminoso rugoso
BD – Binder Drainage (drenagem de ligante) [%]
BOF – Basic Oxygen Furnace
CBR – California Bearing Ratio (ensaio)
CE – Caderno de Encargos
CEN – European Committee for Standardization
CHR – Cement Roadstone Holdings
CS – Crushed Stone (agregado britado)
CWC – Crushed Waste Concrete (resíduo de betão britado)
DNA – Ácido Desoxirribonucleico (referente à genética)
D.O. – Dono de Obra
EAPA – European Asphalt Pavement Association
EF – Estudo de Formulação

Em – Módulo de rigidez da mistura betuminosa [MPa]
EN – Estrada Nacional (EN+número) ou Norma Europeia (somente EN)
EP – Estradas de Portugal
EUA – Estados Unidos da América
f – finos [%]
F – Deformação Marshall [mm]
FAP – Friction After Polishing (fricção após polimento)
FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FG – Fibras Granuladas
FI – Flatness Index (Índice de Achatamento)
FIG – Fibras Impregnadas e Granuladas
FWD – Falling Weight Deflectometer (defletómetro de impacto)
HRA – Hot Rolled Asphalt
IC – Itinerário Complementar
IP – Infraestruturas de Portugal
IPQ – Instituto Português da Qualidade
IRI – Internacional Roughness Index (Índice de Irregularidade longitudinal) [mm/km]
ISO – International Organization for Standardization
ITSR – Indirect Tensile Strength Ratio
JAE – Junta Autónoma de Estradas
JRS – J. Rettenmaier & Söhne
LA – Los Angeles
MACOPAV – Manual de Conceção de Pavimentos
MB – Methylene Blue (ensaio do Azul de Metileno)
MBD – Mistura Betuminosa Densa
MBR-BBA – Mistura Betuminosa Rugosa com Betume modificado de Alta percentagem de Borracha
M_{DE} – Micro-Deval
MDJ – Memória Descritiva e Justificativa
MS – Magnesium Sulfate (sulfato de magnésio)
MSWI – Municipal Solid Waste Incinerator (Resíduos sólidos municipais incinerados)
MTQ – Mapa de Trabalhos e Quantidades
NAPA – Nacional Asphalt Pavement Association
NP – Norma Portuguesa

PA – Porous Asphalt
PERSU – Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos
PET – Polyethylene Terephthalate
PK – Ponto de Quilometragem
PMB – Betume Modificado com Polímeros
Q – Quociente Marshall [kN/mm]
RAP – Reclaimed Asphalt Pavement
RGMB – Reclaimed Geomembrane Modified Binder
S – Estabilidade Marshall [kN]
SA – Sociedade Anónima
SAMI-BMB – Stress Absorbing Membrane Interlayer-Betume Modificado com Borracha
SBS – Styrene-Butadiene-Styrene (estireno-butadieno-estireno)
SE – Sand Equivalent (ensaio do equivalente de areia)
SMA – Stone Mastic Asphalt
S_{min} ou S_{máx} – Stiffness (rigidez mínima ou máxima) [MPa]
ST – Starch (Amido)
SUPERPAVE – Superior Performing Asphalt Pavement
TSRST – Thermal Stress Restrained Specimen Test
V – Void (vazios/porosidade) [%]
VFB – Voids filled with binder (vazios preenchidos com betume) [%]
VMA – Vazios na mistura de agregados [%]
WA – Water Absorption (absorção de água)
ZTV Asphalt StB – Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen Asphalt Straßenbau

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

cm – centímetro
dB – decibel
g – gramas
Hz – Hertz
kg/m² – quilograma por metro quadrado
km – quilómetro
kN – kilo Newtons
m – metro

m^2 – metro quadrado

m^3 – metro cúbico

Mg – Megagrama

Mg/ m^3 – Megagrama por metro cúbico

m/km – metros por quilómetro

ml - mililitro

mm – milímetro

mm/ 10^3 – milímetros (de deformação) em 10000 passagens da roda

MPa – Mega Pascal

m/s – metro por segundo

$\mu m/min$ – micrómetro por minuto

$^{\circ}C$ – Graus Celsius

% – por cento (percentagem)

< – menor

> – maior

= – igual

+ – mais (indicador de adição)

$\pm$ – mais ou menos

1.

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

De uma forma geral, os pavimentos flexíveis são constituídos por várias camadas. Uma camada é, segundo a NP EN 13108-1 (IPQ, 2011), um “elemento de um pavimento aplicado numa única operação”. Estas dividem-se em dois tipos, de acordo com a posição que ocupam na estrutura do pavimento: as mais profundas, de materiais granulares, compactadas com determinado teor de água; as mais próximas da superfície, em que os materiais estão ligados com betume.

A estrutura estratificada, composta pelas diversas camadas aludidas, está sujeita a dois tipos de solicitações: as do clima, onde as altas temperaturas diminuem o módulo de rigidez do betume, tornando-o mais vulnerável à degradação; e as do tráfego, onde por ação dos veículos (essencialmente pesados) se vão desgastando os pavimentos.

Para responder às solicitações, os pavimentos devem conter bom desempenho estrutural, assegurando resistência à deformação. Contudo, isso só não chega, e o desempenho funcional deve garantir propriedades, como por exemplo, regularidade da superfície, aderência do pneu ao pavimento, capacidade de drenagem das águas pluviais, entre outras.

Ainda que as propriedades conferidas ao pavimento à data da sua construção sejam as melhores, o que é certo é que um pavimento se projeta pensando num determinado período de dimensionamento (normalmente de 20 anos, em pavimentos flexíveis), e quando começa a apresentar sinais de degradação devem promover-se ações de conservação, para evitar uma futura reconstrução total, que como é evidente seria desinteressante do ponto de vista económico. Ainda assim, não deve ser esquecido que o orçamento nunca é ilimitado e, por isso, há sempre um compromisso entre custo e a durabilidade da solução encontrada.

Há várias ações de reabilitação que podem ser implementadas, tendo presente o compromisso citado. Tanto pode ser feita uma simples selagem de fendas, como uma fresagem da camada de desgaste com posterior reposição, ou outras, mais simples ou mais complexas que estas.

No âmbito destas ações, ao invés de se utilizarem misturas tradicionais, podem equacionar-se algumas soluções (função do objetivo para a obra em estudo), nomeadamente, revestimentos superficiais, leitadas betuminosas (slurry seal), ACVTL, entre outras, onde figuram os Stone Mastic Asphalt (misturas que teoricamente têm alta durabilidade e desempenho).

Concretamente em Portugal (país com uma vasta rede de estradas de hierarquias distintas, já construídas), onde houve a necessidade de mudar o paradigma de construir vias de comunicação de raiz para passar a conservar-se as existentes, começaram a aparecer algumas obras com uso de SMA, maioritariamente como camada de desgaste.

As misturas betuminosas SMA devem ter um esqueleto pétreo forte (que confere um grande imbricamento entre partículas e maior resistência às cargas aplicadas) e uma alta percentagem de betume que envolva o agregado e dê homogeneidade à mistura.

Devido à elevada quantidade de betume que apresentam, a drenagem do mesmo seria frequente caso não se juntasse um aditivo para a contrariar. Nesse sentido, seria possível usar vários aditivos no betume ou na mistura, como polímeros, pó de borracha, estireno-butadieno-estireno ou fibras de diversas origens, embora continuem a ser comumente empregues fibras celulósicas porque são as comercializadas em larga escala.

Em suma, as aplicações de SMA a nível nacional têm vindo a crescer nos últimos anos. Não deixa de ser curioso que, um material que teve origem na Alemanha, na década de 1960, com o objetivo de resistir às cargas dos pneus pitonados (pneus esses que atualmente até são proibidos no país), hoje em dia, em vez de se ver extinta a sua produção, esta veio ganhar força junto de outros países para dar resposta a questões que não estão diretamente ligadas com o motivo da sua conceção.

1.2. PROBLEMÁTICA E RELEVÂNCIA DO TEMA

Apesar do interesse no tema estar a aumentar, pela vontade notável de utilizar estas misturas em Portugal, ainda há algumas reticências sobre o seu uso, muito em parte porque não existe qualquer documento que defina com clareza as propriedades da mistura adaptadas ao país e a norma europeia é muito vaga.

Quando a experiência é pouca e se sente a falta da documentação, a desconfiança e a insegurança por vezes elevam-se, e é normal ter receio de fabricar e aplicar estas misturas.

Também a desinformação constitui um problema! A verdade é que se diz muita coisa sem se ter provas daquilo que se diz, surgindo uma carência enorme de reunir todos os resultados dos estudos publicados e respetivas conclusões, tentando cruzar informações, filtrar aquilo que é verdadeiro daquilo que é pura especulação e chegar a ilações pertinentes. Em caso de dúvidas fazer-se ensaios (se se tiver oportunidade), ou ter consciência que deviam ser feitos para inferir fundamentadamente.

É esta ânsia da busca pelo conhecimento, do ter de fazer algo para chegar a uma conclusão, que torna o estudo das misturas SMA um desafio permanente.

Assim, fica a consciência que o tempo é curto para esclarecer tantas dúvidas, mas que qualquer pequeno contributo pessoal é extremamente relevante para no futuro se poderem trabalhar estas misturas com maior segurança.

1.3. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal dar o tal contributo pessoal no estudo das misturas betuminosas Stone Mastic Asphalt.

Nesse sentido, primeiro pretende-se descrever a informação disponível à data, sobre as misturas propriamente ditas e seus materiais constituintes, clarificando o que é um SMA e para que serve.

Estando esta fase concluída, o objetivo passa por dar o tal contributo aludido anteriormente. Será analisada a norma EN 13108-5, com posterior definição da metodologia de formulação, onde serão descritos sumariamente os ensaios, as propriedades que a mistura deve respeitar (nomeadamente a percentagem de betume ideal e a percentagem e tipo de fibras necessárias para evitar escorrimento de ligante).

Depois, com o intuito de dar um exemplo prático da aplicação de SMA numa obra, serão descritos todos os passos da beneficiação na EN4 (entre o Montijo e Pegões), executada em simultâneo com esta dissertação e acompanhada no local.

Por último, os dois objetivos finais são: perceber porque se usam fibras de celulose revestidas a betume em detrimento das revestidas a cera; e caracterizar acusticamente a mistura (com ensaio laboratorial).

Como se sabe, do laboratório para a obra existe uma enorme discrepância, mais que não seja ao nível da escala. Dada a oportunidade de poder assistir e fotografar “in loco” todas as etapas efetuadas até chegar à mistura compactada, estas serão relatadas.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A organização do presente trabalho segue a seguinte metodologia:

- Primeiro capítulo, a introdução ao tema: serve apenas para introduzir a dissertação e de certa forma explicar quais as razões que motivaram a escolha do tema apresentado;
- Segundo capítulo, algumas noções gerais: são sinteticamente apresentadas algumas definições de palavras contidas neste relatório, de acordo com documentos normativos ou com a bibliografia estudada;
- Terceiro capítulo, a pesquisa bibliográfica: é analisada a informação disponível e relevante da matéria em estudo, sobretudo investigações sobre cada componente da mistura ou sobre a própria mistura. É assim apresentado o “Estado da Arte”, elemento fulcral da dissertação, no sentido de entendimento daquilo que de pertinente se concluiu até então, relativamente ao tema;
- Quarto capítulo, a formulação laboratorial: serve de análise da norma EN 13108-5 e da sua aplicação na formulação da mistura betuminosa Stone Mastic Asphalt;
- Quinto capítulo, um caso prático de estudo: obra a cargo da empresa Mota-Engil Engenharia e Construção “EN4 - Interseção com a EN118 Prox. de Montijo (km 18+750) e Interseção com a EN10 Pegões (km 44+257). Reabilitação.”, onde são descritas diferentes fases da mesma, desde o fabrico até à aplicação do SMA;
- Sexto capítulo, são apresentados resultados do ensaio de escorrimento envolvendo duas misturas, em que uma tinha fibras de celulose impregnadas e revestidas a betume e a outra, fibras de celulose impregnadas e revestidas a cera. Além disso, apresentam-se os resultados de outro ensaio (este não normalizado), ao ruído de percussão num SMA11, e comparação ao de um AC14;
- Sétimo e último capítulo: são expostas as considerações finais. Em jeito de conclusão, são tiradas as inferências fundamentais da pesquisa e do tratamento de dados efetuado, sendo exposta a opinião do autor sobre assuntos que considera relevantes. São também dadas indicações acerca do trabalho a realizar no futuro, em função da falta de informação encontrada.

2.

NOÇÕES GERAIS

Aditivo – “Material constituinte que pode ser adicionado em pequenas quantidades à mistura, por ex.: fibras orgânicas ou inorgânicas ou polímeros, capazes de influenciar as características mecânicas, a trabalhabilidade ou a cor da mistura.” [IPQ (2011)]

Agregado – “Material granular usado na construção. O agregado pode ser natural, artificial ou reciclado.” [Coutinho (2004)]

Agregado de granulometria extensa – “Agregado que consiste numa mistura de agregados grossos e agregados finos em que $d = 0$; $D \leq 45$ mm. Pode ser produzido sem separar as frações grossa e fina do agregado ou pela mistura de agregado grosso e agregados finos.” [Coutinho (2004)]

Agregado fino – “Designação dada às frações granulométricas com partículas de menor dimensão, para as quais D é menor ou igual a 2 mm, com predominância das partículas retidas no peneiro de 0,063 mm.” [CEN (2013a)]

Agregado grosso – “Designação dada às frações granulométricas com partículas de maior dimensão, para as quais D é menor ou igual a 45 mm e d é maior ou igual a 2 mm.” [CEN (2013a)]

Aquaplanagem – fenómeno traduzido pela perda de aderência entre o pneu e o pavimento, devido à presença de uma fina lâmina de água na superfície de contacto destes.

Baridade – “Massa por unidade de volume, incluindo os vazios preenchidos com ar, de um provete a uma temperatura de ensaio conhecida.” [CEN (2009a)]

Baridade máxima teórica – “Massa por unidade de volume, isenta de vazios preenchidos com ar, de uma mistura betuminosa a uma temperatura de ensaio conhecida.” [CEN (2009a)]

Berma – “Faixa longitudinal adjacente à faixa de rodagem geralmente revestida, mas não destinada à circulação de veículos, exceto em casos excepcionais.” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Betão betuminoso – “Mistura betuminosa de composição granulométrica contínua ou descontínua formando uma estrutura perfeitamente imbricado.” [IPQ (2011)]

Betão pobre – “Mistura homogénea de agregados, cimento e aditivos, utilizada em camadas de base de pavimentos rígidos (...)” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Betão pobre cilindrado – Mistura de agregados, cimento e aditivos, aplicada em obra com recurso a compactação com cilindros.

Betume – “Procedente da destilação de petróleo bruto.” [Ribeiro (2017b)]

Betume-borracha – “Ligante hidrocarbonado resultante da interação de uma determinada percentagem de borracha moída (...), com betume (...)” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Betume modificado de alta viscosidade – “Ligante hidrocarbonado resultante da interação física e/ou química de elevadas quantidades de polímeros com betume (...), que apresenta uma coesão, ponto de amolecimento e recuperação elástica muito elevados, e temperaturas de trabalho moderadas, conferindo às misturas betuminosas elevado desempenho.” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Betume modificado com polímeros – “Ligante hidrocarbonado resultante da interação física e/ou química de polímeros com betume (...).” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Borracha (modificador) – “Elastómero que já está ou pode ser modificado para um estado no qual é essencialmente insolúvel, se bem que suscetível a aumentar de volume num solvente em ebulição, tal como benzeno, metiletilcetona e etanol-tolueno azeotrópico, e que, no seu estado modificado, não pode ser processado para uma forma permanente por aplicação de calor e pressão moderadas.” [Ribeiro (2017b)]

Composição laboratorial – “Definição da fórmula de uma mistura em termos dos materiais constituintes, da curva granulométrica e da percentagem de betume adicionada.” [IPQ (2011)]

Deformação – “Degradação relativa de um corpo em relação a uma configuração inicial de comprimentos, superfície ou volume.” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Deformação Marshall (F) – “Diferença em milímetros (mm) entre a deformação na rotura do provete e a deformação obtida extrapolando até zero a tangente do gráfico da carga função da deformação.” [CEN (2012e)]

Degradação – “Alteração produzida na superfície de um pavimento, detetável visualmente e produzida por um defeito de construção ou pela ação do tráfego, da água ou dos agentes atmosféricos.” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Durabilidade – Traduz a “resistência às ações do tráfego (abrasiva) e do clima (ar e água).” [Ribeiro (2017b)]

Efeito de laje – Rigidez à flexão que permite à laje de betão transmitir as cargas às camadas inferiores numa área muito maior, isto é, com tensões inferiores.

Elastómero – “Material macromolecular que recupera rapidamente a sua forma e dimensões iniciais, após cessar a aplicação de uma tensão.” [Ribeiro (2017b)]

Emulsão betuminosa – “Dispersão de pequenas partículas de um ligante hidrocarbonado numa solução de água e num agente emulsionante, de caráter aniónico ou catiónico, o que determina a designação da emulsão.” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Estabilidade – “Propriedade da mistura resistir às deformações plásticas, o que geralmente ocorre para as temperaturas elevadas e tempos de carga longos (...).” [Ribeiro (2017b)]

Estabilidade Marshall (S) – “Resistência máxima à deformação, em kilonewtons (kN), de um provete moldado de mistura betuminosa.” [CEN (2012e)]

Estrutura do pavimento – “Conjunto de camadas de materiais selecionados situados sobre a fundação.” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Faixa de rodagem – “Parte da estrada destinada à circulação de veículos. É composta por uma ou mais vias.” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Fenda – “Descontinuidade ou linha de rotura na superfície de um pavimento.” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Fíler – “Agregado cuja maior parte passa no peneiro de 0,063 mm e que pode ser adicionado aos materiais de construção para lhes conferir certas propriedades.” [Coutinho (2004)]

Fíler comercial – “Fíler adicionado à mistura de agregados, geralmente constituído por cimento, cal hidráulica ou material calcário.” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Fíler recuperado – “Fíler incluído na mistura de agregados e recuperado do sistema de despoeiramento da central de fabrico betuminosa.” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Flexibilidade – “Aptidão das misturas em se adaptarem às deformações das camadas subjacentes.” [Ribeiro (2017b)]

Fórmula da mistura – “Fórmula de uma única mistura expressa em termos da sua composição.” [IPQ (2011)]

Frações granulométricas – “Todos os agregados devem ser descritos em termos de fração granulométrica com a designação d/D.” (d – menor dimensão do agregado; D – maior dimensão do agregado) [CEN (2013a)]

Fresagem – “Levantamento dos materiais que constituem o pavimento à temperatura ambiente, até uma certa profundidade, utilizando equipamento autopropulsionado que dispõe de um rotor equipado com elementos pontiagudos, cuja função é desagregar o material existente.” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Imbricamento – Sobreposição dos agregados uns sobre os outros, gerando forças de contacto entre eles.

Inspeção visual – “Reconhecimento do estado da superfície da estrada destinado a identificar as possíveis degradações do pavimento e os elementos envolventes que podem influenciar o estado do pavimento.” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Junta – “Descontinuidade prevista por razões estruturais ou construtivas, entre duas zonas adjacentes de uma camada de pavimento.” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Mastique betuminoso – “Mistura de betume e agregado fino que pode ser aplicado a quente ou a frio, geralmente utilizado para selagem de juntas e de fendas em pavimentos e noutras estruturas.” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Método do Anel e Bola – Ensaio que “avalia o comportamento do betume a temperaturas elevadas (resistência à fluência, tendência à exsudação).” [Ribeiro (2017b)]

Microaglomerado a frio – “Mistura fabricada à temperatura ambiente, com emulsão betuminosa de rotura lenta convencional, agregados finos, fíler, água e aditivos, cuja consistência é adequada para a colocação em obra, podendo ser aplicada em uma ou mais camadas.” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Mistura betuminosa a quente – “Mistura de um ligante hidrocarbonado, agregados, fíler e aditivos, fabricada de modo a que todas as partículas de agregado sejam cobertas com uma película de ligante. O seu processo de fabrico implica o aquecimento do ligante e dos agregados, e a sua aplicação em obra é realizada a temperaturas significativamente superiores à temperatura ambiente.” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Mistura betuminosa descontínua – Mistura betuminosa onde a mistura de agregados apresenta uma forte descontinuidade de granulometria.

Módulo de elasticidade – “Define-se como o quociente entre a tensão aplicada e a deformação, num material perfeitamente elástico linear.” [Cepsa Portuguesa (2018)]

Módulo de rigidez (ou Rigidez) – “Relação entre a tensão aplicada e a deformação daí resultante. Utiliza-se no contexto dos materiais de pavimentação cujo comportamento não é elástico-linear (misturas betuminosas, materiais granulares).” [Cepssa Portuguesa (2018)]

Pavimentadoras – Equipamentos que “têm como finalidade colocar o material de forma homogénea (sem segregação e em quantidade suficiente), sem grande perda de calor e com precisão e qualidade de acabamento.” [Ribeiro (2017a)]

Pavimento – “Estrutura composta por uma ou mais camadas destinadas a permitir a circulação de tráfego sobre o terreno.” [IPQ (2011)]

Penetração – “Consistência, expressa pela profundidade, em décimas de milímetro, a que a agulha normalizada penetra verticalmente num provete do material em condições específicas de temperatura, carga e duração de aplicação da carga.” [Ribeiro (2017b)]

Período de dimensionamento – “Período durante o qual se espera que as degradações induzidas pelo tráfego não atinjam determinados limites.” [Cepssa Portuguesa (2018)]

Polímero – “Substância caracterizada pela repetição múltipla de uma ou várias espécies de átomos ligados entre si em quantidade suficiente para conferir um conjunto de propriedades que não variam de forma marcada por adição ou remoção de uma ou de algumas unidades constitutivas.” [Ribeiro (2017b)]

Quociente Marshall (Q) – “Rácio da estabilidade, S, à deformação, F.” [CEN (2012e)]

Reciclagem – “Medida de reabilitação de um pavimento que consiste na remoção, geralmente através de fresagem de materiais de um pavimento em serviço, na sua mistura com novos materiais e na sua aplicação no mesmo local ou num local diferente.” [Cepssa Portuguesa (2018)]

Reciclagem “in situ” – “Técnica de reciclagem no qual os materiais retirados do pavimento em serviço são de novo aplicados no mesmo local, sem serem transportados para fora da estrada.” [Cepssa Portuguesa (2018)]

Reconstrução parcial do pavimento – “Eliminação parcial e reposição do pavimento existente.” [Cepssa Portuguesa (2018)]

Reconstrução total do pavimento – “Substituição completa do pavimento existente por uma nova construção na totalidade de um troço ou numa zona de estrada.” [Cepssa Portuguesa (2018)]

Rega de colagem – “Aplicação de uma emulsão betuminosa sobre uma camada tratada com ligantes hidrocarbonados ou com ligantes hidráulicos, tendo em vista conseguir a sua união com uma camada betuminosa a aplicar.” [Cepssa Portuguesa (2018)]

Rega de cura – “Aplicação de uma película contínua e uniforme de emulsão betuminosa sobre uma camada tratada com ligantes hidráulicos, tendo em vista impedir a evaporação prematura da água.” [Cepssa Portuguesa (2018)]

Resistência à fadiga – “Propriedade da mistura betuminosa em resistir a esforços de flexão repetidos.” [Ribeiro (2017b)]

Selagem de fendas – “Atuação de conservação localizada nas fendas do pavimento, destinada a impedir a passagem da água através destas e a limitar, na medida do possível os movimentos dos seus bordos.” [Cepssa Portuguesa (2018)]

Solo-cimento – “Mistura homogénea de materiais granulares (agregados, solos granulares ou resíduos inertes), cimento, água e eventuais aditivos, realizada em central que, uma vez convenientemente compactada, é utilizada como componente estrutural do pavimento.” [Cepssa Portuguesa (2018)]

Temperatura de amolecimento – “Temperatura à qual o material nas condições de referência do ensaio atinge uma consistência específica.” [Ribeiro (2017b)]

Tensão – “Força por unidade de superfície.” [Cepso Portuguesa (2018)]

Trabalhabilidade – “Propriedade da mistura betuminosa em permitir com facilidade as operações de fabrico, espalhamento e compactação.” [Ribeiro (2017b)]

Tratamento superficial (ou da camada de superfície) – “Técnica cujo objetivo é dotar o pavimento de determinadas características superficiais ou o de constituir uma medida de conservação preventiva, que não implica um aumento significativo da capacidade de carga do pavimento, e tem pequena contribuição para a melhoria da sua regularidade superficial.” [Cepso Portuguesa (2018)]

Via – Corredor longitudinal inserido na faixa de rodagem, delimitado ou não através de sinalização horizontal, com largura suficiente para permitir a circulação de veículos ligeiros ou pesados. [adaptada da Cepso Portuguesa (2018)]

Vida útil – “Período de tempo durante o qual o pavimento (ou a camada do pavimento considerada) se mantém sem degradações estruturais generalizadas.” [Cepso Portuguesa (2018)]

Volume de vazios na mistura de agregados (VMA) – “Espaço vazio intergranular, entre as partículas dos agregados de uma mistura compactada, incluindo o volume de vazios e o volume de betume efetivo, expressos como percentagem do volume total.” [Ribeiro (2017b)]

3.

ESTADO DA ARTE

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo começa-se por explicar os diversos tipos de estruturas de pavimentos que podem existir e culmina-se com a estrutura mais interessante no contexto da dissertação: os pavimentos flexíveis, pois fazem uso de misturas betuminosas na sua constituição.

Nos flexíveis existe uma panóplia de patologias/anomalias, que podem ser detetadas com facilidade. Com vista à resolução de tais problemas, já se investigaram diversas misturas betuminosas, como o Stone Mastic Asphalt, no qual se tem apostado de forma gradual e crescente, principalmente para camada de desgaste.

As misturas SMA constituem o grande foco deste trabalho, sendo estudadas com especial minúcia. Para isso, primeiro procura-se fazer uma descrição daquilo que é um Stone Mastic Asphalt, ou seja, começa-se por mencionar a sua origem, enquadrando historicamente a sua utilização; depois são elencadas as propriedades que, teoricamente, mais se destacam nestas misturas, pelas quais são conhecidas e procuradas, além de serem dados alguns exemplos de aplicações em obras, quer em Portugal, quer no estrangeiro.

Seguidamente, são apresentadas uma série de pesquisas de alguns autores que dedicaram parte do seu tempo a tentar chegar a conclusões sobre este tema. Há autores que trataram de estudar os materiais constituintes mais básicos e suas propriedades, enquanto outros, mais audazes, quiseram perceber se era viável ou não utilizar materiais inovadores, diferentes dos materiais cliché.

Sem dúvida que a maioria dos estudos estão relacionados com os aditivos, em particular com as fibras a incorporar na mistura, que têm como principal objetivo evitar o escorrimento do betume durante a produção, transporte ou aplicação, fases em que a mistura tem temperaturas elevadas (Vale, Casagrande e Soares, 2014), embora, por vezes, possam servir para melhorar outras propriedades da mistura.

Como já vem sendo hábito, não só nos pavimentos, mas na indústria em geral, tem-se apostado cada vez mais em materiais reciclados. Talvez um dos maiores desafios da atualidade passe por gerir os resíduos de uma maneira mais eficaz que até ao momento. A título ilustrativo, em Portugal, está em vigor o “Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos – 2020” como resultado da revisão do PERSU 2007. Este plano, entre outras ações, apoia o aumento da recolha seletiva e o aumento da reciclagem, no sentido de, paulatinamente, eliminar a deposição direta de materiais em aterro sanitário.

Foi precisamente com o intuito de evitar que alguns resíduos fossem depositados num aterro que certos autores, cuja referência será feita nas publicações expostas em seguida, pensaram em reutilizar os

resíduos para melhorar o ambiente, adicionando-os às misturas, e o que é certo é que a maioria das ideias obtiveram sucesso, ou seja, trouxeram mais valias em termos de propriedades da mistura.

Por fim, encerra-se o capítulo com algo cada vez mais popular na área dos pavimentos, a nanotecnologia, explorando algumas experiências efetuadas.

3.2. ESTRUTURA DOS PAVIMENTOS

Um pavimento é distinguido pela sua estrutura, e quanto a esta existem essencialmente três tipos frequentemente utilizados: os pavimentos rígidos, os semi-rígidos e os pavimentos flexíveis, tal como refere o Manual de Conceção de Pavimentos (MACOPAV) para a Rede Rodoviária Nacional (JAE, 1995). Estes diferem entre si na constituição e no modo de funcionamento.

Os pavimentos rígidos são constituídos por uma só laje de betão, com papel simultâneo de camada de base e de desgaste, apoiada numa sub-base de material granular ou deste estabilizado com um ligante hidráulico, sempre que as solicitações sejam suficientemente fortes para o justificarem.

A laje contínua de betão permite uma distribuição uniforme das tensões verticais incitadas pelas cargas, criando-se o chamado “efeito de laje”.

A laje nunca deve possuir um polimento muito acentuado, isto é, deve estabelecer-se uma superfície suficientemente rugosa (com o atrito suficiente) para garantir aderência entre o pneumático e o piso. Além disso deve possuir cor clara e propriedades refletoras por motivos de segurança rodoviária noturna.

No quadro seguinte, resume-se a constituição dos pavimentos rígidos, definindo as camadas, já elencadas previamente.

Quadro 3.1 – Definição de cada camada da estrutura de um pavimento rígido [Branco, Pereira e Santos (2006), JAE (1995) e Cepsa Portuguesa (2018)]

CAMADA	DEFINIÇÃO
LAJE DE BETÃO	Camada constituída por betão de cimento que assenta sobre a sub-base e a impermeabiliza. É a grande componente estrutural de um pavimento rígido, que aproveita o “efeito de laje” para degradar eficazmente as cargas transmitidas pelos rodados dos veículos.
CAMADA DE SUB-BASE	Camada que tanto pode ser constituída por material granular como por betão pobre ou solo-cimento, que está sob a laje de betão e recebe as cargas desta, transferindo-as para a fundação.
FUNDAÇÃO	Superfície sobre a qual assenta o pavimento. Inclui a camada de leito de pavimento.

Os pavimentos rodoviários empregues com maior frequência são os flexíveis, e em Portugal não é exceção, pois praticamente toda a sua rede rodoviária possui este tipo de estrutura.

Na prática, a estrutura flexível é um conjunto de camadas sobrepostas, com disposição horizontal, assentes sobre uma fundação, que têm como principal função suportar e distribuir as cargas desde a superfície até às camadas mais profundas, conferindo segurança e conforto ao nível da superfície (Cepsa Portuguesa, 2018). Estas camadas foram apelidadas com diferentes terminologias, de acordo com a função e posição que ocupam: camadas estruturais (de sub-base, base, regularização e de ligação) e camada de desgaste.

Ainda que estas camadas estejam predefinidas, ou seja, que haja uma tipificação dos pavimentos desta natureza, eles podem ter constituições diversificadas em função da resistência do solo de fundação, da agressividade das ações e dos materiais usados. Resulta que, pelo dimensionamento, um pavimento flexível tenha espessuras de cada camada variáveis e que se possa abdicar de algumas.

A flexibilidade de soluções a adotar traduz uma vantagem económica, na medida em que se podem construir as camadas mais resistentes no material mais abundante do local da aplicação. Naturalmente, numa zona onde hajam materiais granulares de boa qualidade, a estrutura das camadas não ligadas por betume terá um papel preponderante na degradação de cargas, enquanto em zonas que não existam estes materiais, serão as camadas betuminosas a assumir esse papel. Sejam quais forem os estratos escolhidos, o mais importante é a estrutura no global ser capaz de suportar todas as solicitações existentes.

A adesão das camadas tem um papel fundamental no funcionamento do pavimento, razão pela qual na interface dos materiais betuminosos deva ser espalhada uma rega de colagem. Caso cada estrato funcionasse desligado, não trabalhando como uma “camada única”, deixava de fazer sentido dimensionar o pavimento com as extensões de tração da última camada betuminosa, pois na base de cada camada existiria um “pico” de extensões. Na falta da rega ou na sua aplicação deficiente, é possível registar-se algumas das anomalias (Branco, Pereira e Santos, 2006) que são apontadas na secção 3.3..

No quadro seguinte, resume-se a constituição dos pavimentos flexíveis, definindo as principais camadas, já elencadas previamente.

Quadro 3.2 – Definição de cada camada da estrutura de um pavimento flexível [IPQ (2011) e Cepsa Portuguesa (2018)]

CAMADA	DEFINIÇÃO
DESGASTE	“Camada superior do pavimento que está em contacto com o tráfego.”
LIGAÇÃO	“Camada em mistura betuminosa situada sob a camada de desgaste do pavimento, cuja função é a de assegurar a ligação entre a camada de desgaste e a camada de base ou regularização.”
REGULARIZAÇÃO	“Camada de espessura variável aplicada sobre uma camada ou superfície já existente para obtenção do perfil necessário à colocação de uma outra camada de espessura constante.”
BASE	“Principal elemento estrutural de um pavimento. A camada de base poderá ser disposta numa ou mais camadas, designadas por camada de base “superior”, camada de base “inferior”, etc.”
SUB-BASE	Camada inferior do pavimento, que complementa a função resistente das restantes camadas. Pode ser constituída por uma ou duas camadas ou não existir, particularmente nos pavimentos com fundação de classe elevada.
LEITO DO PAVIMENTO	Camada aplicada sobre a parte superior das terraplanagens que tem como principal função garantir um suporte uniforme para as camadas da estrutura do pavimento. Esta camada, juntamente com as camadas de solo subjacente, constitui a fundação do pavimento.
FUNDAÇÃO	Superfície sobre a qual assenta o pavimento. Inclui a camada de leito de pavimento.

Os pavimentos semi-rígidos são um híbrido dos rígidos e dos flexíveis, mas bem diferenciados destes, à custa da sua constituição particular. A camada de desgaste e regularização são análogas às presentes nos pavimentos flexíveis, a diferença reside na camada de base (Jacinto, 2003). Enquanto as camadas de regularização e desgaste são compostas por material betuminoso, a camada de base, como imagem

de marca que diferencia esta tipologia de pavimento de qualquer outra, é composta por material granular estabilizado por ligante, normalmente, por betão pobre cilindrado.

A camada de base é especial, não só pelo material usado ser diferente, mas também pela rigidez elevada que é detentora da absorção de grande parte das ações, levando a que estas cheguem à fundação muito enfraquecidas face ao seu valor original.

Por baixo da camada de base é usada uma sub-base, composta por material de granulometria extensa.

Nos pavimentos semi-rígidos pode fazer-se distinção entre estruturas “diretas” e “inversas”. As diretas, são assim designadas porque as camadas betuminosas assentam diretamente na camada estabilizada com ligante hidráulico, enquanto nas estruturas inversas, entre as camadas betuminosas e a camada de betão pobre é colocada uma camada com cerca de 12 cm de espessura, de material granular (Branco, Pereira e Santos, 2006).

3.3. PATOLOGIAS MAIS FREQUENTES EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS (EP, 2008A)

Ao longo do período de vida útil, os pavimentos vão sofrendo deteriorações da capacidade de carga e do nível de serviço determinado em projeto. São facilmente identificáveis por inspeção visual algumas das patologias que se registam com maior frequência, estando já inventariadas em catálogos de degradações de pavimentos.

Todavia, estes catálogos não retratam qualquer documento normativo, isto é, cada entidade é livre de catalogar as anomalias (porém, a nomenclatura assume um padrão, não sendo completamente aleatória).

Para esta dissertação foram analisados dois catálogos, o da Cepsa Portuguesa e o da Infraestruturas de Portugal. Contudo, somente o da ex-EP (atual IP) é resumidamente exposto de seguida por dois motivos: primeiro porque, mesmo não sendo vinculativo usar este catálogo, a entidade que o representa afirma-se na área dos pavimentos rodoviários, logo é o mais usado pela maioria das empresas portuguesas; depois porque o catálogo da Cepsa não está tão bem estruturado (muito texto e imagens pouco claras) e carece de justificação, com base na experiência, em ensaios laboratoriais ou “*in loco*”, das razões que aponta para cada anomalia inventariada.

Segundo a EP (2008b) a primeira grande família de patologias é o “fendilhamento” e existem três tipos de fendas distintas.

As fendas longitudinais são “(...) paralelas ao eixo da estrada, localizadas, geralmente, ao longo da zona de passagem dos rodados dos veículos e por vezes junto ao eixo”. Podem ter proveniência em defeitos de construção (de juntas longitudinais, da falta de ligação entre camadas), em misturas muito rígidas, no envelhecimento prematuro do betume, em drenagem de águas ineficaz ou no início da fadiga das misturas betuminosas.

Sendo certo que as solicitações continuam, a evolução destas e de outras patologias é inevitável. O progresso das fendas longitudinais pode culminar num aumento da largura e extensão da fenda (ramificação), o que leva à entrada de água nas camadas granulares, com consequente desprendimento de finos (que sobem até à superfície) e erosão da camada de base. Pode também originar outras anomalias, nomeadamente, ninhos, desagregações e peladas.

As fendas transversais são “(...) sensivelmente perpendiculares ao eixo da estrada, isoladas ou com um espaçamento variável, abrangendo parte ou toda a largura da faixa de rodagem”. As causas do seu aparecimento podem estar também conexas a defeitos na construção (de juntas transversais, quer na

camada superior, quer em camadas inferiores (por reflexão dos erros de construção à superfície a médio/longo prazo)) ou, por exemplo, a uma fundação com capacidade de suporte diferencial.

Estas também se podem ramificar, atingindo os mesmos termos da evolução das fendas longitudinais.

A tipologia de fendas mais severa é a do tipo “pele de crocodilo”, definidas como “fendas que formam entre si uma malha de dimensão variável, localizadas inicialmente na zona de passagem dos rodados dos veículos, abrangendo progressivamente toda a largura da via do tráfego”. Esta fendilhação marca o início da rotura por fadiga do pavimento, e embora esta seja uma possível causa da anomalia, não é exclusiva! Por exemplo, pode ser a falta de ligação entre as camadas devido a erros construtivos, de suporte da fundação e das camadas granulares ou a falta de qualidade dos materiais as possíveis causas.

Além da abertura das fendas e da sua densidade poderem aumentar (ou seja, de haver estreitamento da malha fendilhada), a evolução desta anomalia pode significar a formação de ninhos, desagregações, peladas (por desprendimento de material) ou de rodeiras.

A segunda grande família de patologias são as “deformações”, que tanto podem ser “deformações localizadas” como “rodeiras”.

As deformações localizadas são “alterações de nível do pavimento, formando depressões ou alteamentos, podendo surgir isoladamente em diferentes pontos do pavimento”. A falta de capacidade de carga da camada de fundação e/ou das camadas granulares, a falta de ligação entre camadas betuminosas, os erros construtivos (como uma junta de trabalho transversal mal-executada), ou esforços tangenciais consideráveis (fruto de acelerações e travagens brutas dos veículos) ... podem estar na origem deste tipo de patologia.

A evolução de uma deformação localizada pode estender-se a toda a largura da via, dando origem a fendilhamento do tipo pele de crocodilo, mas também pode aumentar em profundidade e comprimento, originando rodeiras.

A rodeira é definida como uma “deformação longitudinal localizada ao longo da zona de passagem dos rodados dos veículos pesados” e a definição já aponta para a origem destas anomalias! Além de resultarem da generalização de patologias menores, ou de compactação insuficiente de qualquer camada, estão essencialmente relacionadas com a diminuição do módulo de rigidez, que por sua vez está relacionada com o tráfego canalizado (lento) e com rodados de veículos a temperaturas elevadas (“> temperatura” e “> tempo de aplicação de carga” = “< Em”).

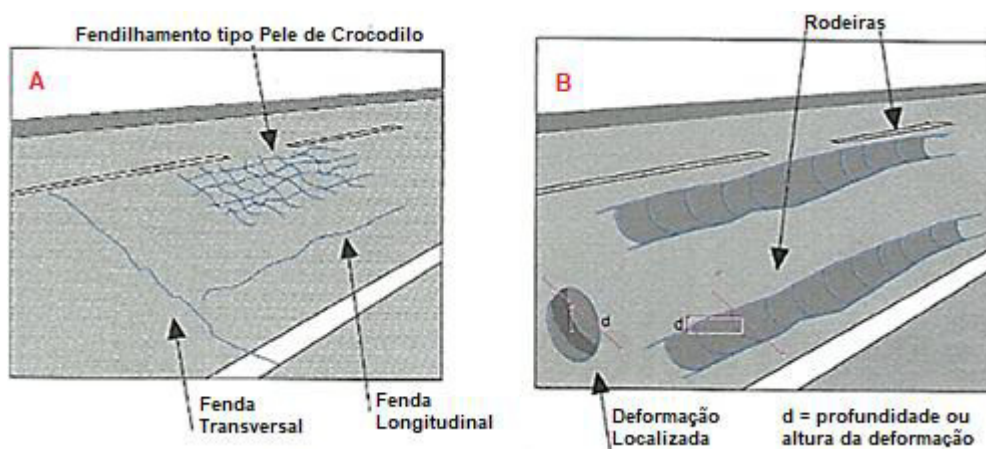


Figura 3. 1 – A) Fendilhamento; B) Deformações; [Fonte: adaptado de EP (2008b)]

A terceira grande família de patologias, catalogada pela IP, são os “defeitos de superfície”, onde figuram as desagregações superficiais, o polimento dos agregados, os ninhos e as peladas.

As desagregações superficiais são o “arranque de uma das frações do agregado, geralmente a mais grossa ou perda do mastique betuminoso (...)”. Entre outros motivos, na génese da anomalia podem estar a falta de adesividade, de limpeza do agregado ou de compactação das várias camadas, assim como a compactação a baixas temperaturas ou o fabrico da mistura com temperaturas excessivas.

O avanço de uma desagregação superficial dá-se, geralmente, aumentando a área e a profundidade afetada, começando a aparecerem peladas.

O polimento dos agregados, que traduz o “desgaste por abrasão, geralmente da fração grossa do agregado, conferindo à superfície do pavimento um aspeto polido e brilhante” tem, normalmente, origem na falta de qualidade dos materiais da camada superficial, na intensa ação do tráfego de veículos pesados e nas altas temperaturas. O polimento costuma generalizar-se, aumentando a área afetada.

Já as covas ou ninhos são “cavidades de forma arredondada localizadas na camada de desgaste, podendo progredir para as camadas inferiores, resultantes da evolução de outras degradações do pavimento”, e ao atingirem as camadas infra formam peladas (tal como se percebe pela figura 3.3). Ainda que possam ter origem na evolução de outras degradações (nomeadamente já citadas), também podem tê-lo em reparações deficientes ou em desprendimento de materiais envolvidos na mistura erradicamente (como vegetação ou pedaços de madeira, p.e.).

As peladas, que por definição consistem no “desprendimento em forma de placa, da camada de desgaste, relativamente à camada inferior”, podem advir de erros na camada de desgaste (qualidade fracas dos seus materiais, falta de adesão desta à inferior ou espessura subdimensionada), de esforços tangenciais muito grandes, ou da evolução de outras degradações (nomeadamente das anteriores).

A quarta grande família de patologias que a IP destaca é o “movimento de materiais”.

O ligante betuminoso pode subir “à superfície (...), em particular na zona de passagem dos rodados dos veículos, conferindo-lhes um aspeto negro e brilhante”, aquilo a que se chama de exsudação de betume. O ligante pode aparecer à superfície por diversos motivos, entre eles: excesso de ligante, ou baixa viscosidade deste; excesso de rega de colagem; misturas de baixa estabilidade; etc. É uma degradação que pode desenvolver-se, aumentando a superfície revestida pela película de betume formada.

Também se podem registar subidas de finos até à superfície. Deteta-se com facilidade esta anomalia dadas as “manchas de cor esbranquiçada (...), inicialmente junto das fendas, evoluindo para toda a superfície da camada de desgaste”. O arrasto de finos “provenientes das camadas granulares e do solo de fundação” é sobretudo consequência do contacto dos mesmos com a água.

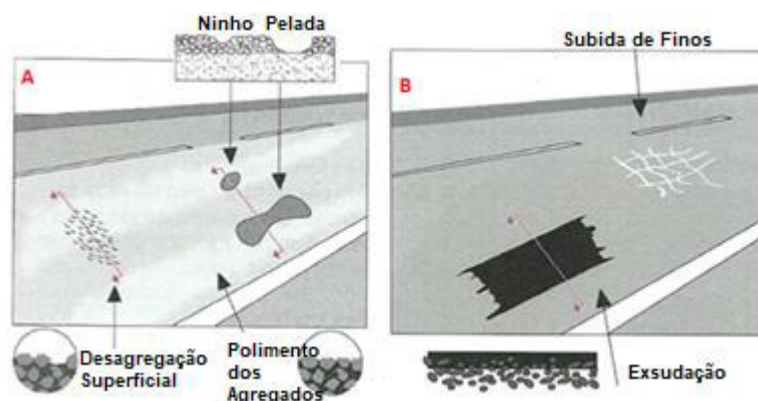


Figura 3. 2 – A) Defeitos de Superfície; B) Movimentos de Materiais; [Fonte: adaptado de EP (2008b)]

A quinta e última família identificada são as “reparações”. Embora hajam autores que, de uma forma mais elegante, preferem não subdividir esta família, a IP decidiu fazê-lo em “tapagem de covas” e “remendos”.

A primeira subfamília consiste em “reparações de pequenas dimensões e de forma irregular, destinadas a tratar os defeitos de superfície existentes em zonas localizadas”, enquanto na segunda subfamília, as reparações são “de forma retangular, abrangendo a zona de passagem dos veículos ou toda a via”.

Caso qualquer das duas intervenções não seja bem executada, pode tornar-se mais grave que as registadas antes da reparação, transformando uma reparação numa patologia.

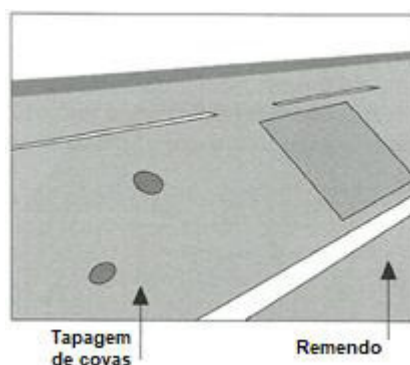


Figura 3. 3 – Reparações [Fonte: adaptado de EP (2008b)]

O 1º volume do livro da ex-EP contém também a classificação de cada degradação em três níveis de severidade distintos e imagens alusivas aos mesmos, sendo ambas apresentadas no anexo A1. No 2º volume (EP, 2008c) é dada a fórmula de trabalho para identificação das patologias no terreno, através da sua quantificação (localização, dados a registar e procedimentos de medição) e posterior enquadramento nos níveis que constam nos quadros do mesmo anexo.

Existem duas conclusões que se pode retirar desta análise: a primeira é que, no limite, os pavimentos podem atingir a rotura devido às anomalias que enfrentam; a segunda é que, a grande maioria das patologias é referente à camada de desgaste, razão que desperta interesse em arranjar diferentes misturas que solucionem a manutenção/substituição desta camada.

3.4. SOLUÇÕES PARA MANUTENÇÃO DA CAMADA DE DESGASTE

A camada de desgaste, já definida em 3.2., é a mais exposta a adversidades que suportam as patologias descritas anteriormente. Com o intuito de solucionar os problemas detetados, têm sido estudadas diversas soluções para aplicar na manutenção deste tipo de camada.

Estas soluções têm de assumir funções estruturais e funcionais. Enquanto as funcionais estão associadas aos utilizadores, devendo primar pela segurança (evitar projeção de água, aumentar a visibilidade e a aderência entre o pneu e o pavimento, garantindo o atrito suficiente para evitar derrapagens), pela economia (evitar consumos excessivos de combustível e diminuir o mais possível o desgaste dos pneu e do veículo no global), pela comodidade (devendo reduzir as vibrações e os ruídos sentidos pelo usuário) e têm extrema importância na formulação, as funções estruturais são impostas para dar resistência às cargas do tráfego transmitidas à estrutura do pavimento.

Para escolher uma solução a aplicar na conservação do desgaste do pavimento, tem de existir um motivo que suporte a escolha. Esse motivo é função das propriedades que cada mistura betuminosa permite e, por isso, são de seguida listadas algumas, bem como as propriedades que as mesmas procuram oferecer.

Tem-se conseguido obter camadas de desgaste com misturas especiais, como as rugosas e as drenantes (Cepsa Portuguesa, 2018), (Branco, Pereira e Santos, 2006) e (Freire et al., 2004).

As camadas drenantes são de espessura delgada, não são exatamente camadas de desgaste, mas são colocadas sobre estas por questões funcionais, e embora reduzam o risco de aquaplanagem, diminuem o ruído e melhorem a visibilidade em tempo de chuva, o processo de colmatação dos vazios por acumulação de partículas é relativamente simples e, por conseguinte, há perda de porosidade. A perda desta propriedade pode não acontecer nas zonas onde chove muito porque a água pluvial tende a eliminar a sujidade, abrindo, ao mesmo tempo, os poros (devem prever-se limpezas periódicas, por sopragem e aspiração, em que o período é função do tipo de estrada). Resumidamente, a durabilidade destas misturas é menor, embora atualmente, por utilização de betumes modificados, já se consiga prolongar.

A popularização do Porous Asphalt chegou a ser tão forte que se fizeram autoestradas completas com este material, embora o seu uso seja mais importante em curva e contracurva, onde o risco de acumulação de água e, consequente aquaplanagem, é elevado.

As camadas com misturas rugosas são mais eficazes na resistência oferecida à ação abrasiva do tráfego que o PA e as camadas tendem a apresentar uma excelente macro textura (Cepsa Portuguesa, 2018).

Pode utilizar-se Asphalt Concrete for Very Thin Layers, uma técnica para situações mais específicas, como quando se quer aumentar o número de pontos de contacto entre o pneu e o pavimento (aderência), diminuir o ruído e aumentar a capacidade de drenagem de água à superfície; ou revestimentos superficiais, uma técnica simples, que visa prolongar a vida útil do pavimento, consistindo num tratamento da camada de superfície por formação de uma nova camada “*in situ*” com ligante e agregado, aplicados rapidamente (quase em simultâneo).

Há ainda possibilidade de fabricar misturas betuminosas à temperatura ambiente, com agregados, água, emulsão betuminosa e, eventualmente, fíler e/ou aditivos, chamados de slurry seal. Estes não servem exatamente para constituir uma camada de desgaste, mas são muitas vezes utilizados para as impermeabilizar quando se encontram abertas, fendilhadas ou com défice de betume. Podem ser aplicadas em contínuo (criando uma superfície regular com grande aderência), ou apenas na selagem de fissuras (Ribeiro, 2017a).

No meio destas e de tantas outras formas de solucionar as anomalias de uma camada de desgaste, aparece uma, que embora não seja de aplicação exclusiva neste tipo de camada, é muitas vezes usada para tal. Trata-se das misturas do tipo Stone Mastic Asphalt, que são o foco deste trabalho e, por isso, são analisadas posteriormente com minúcia.

3.5. DEFINIÇÕES DE SMA

De acordo com a norma europeia que define as misturas betuminosas em causa (EN 13108-5), SMA é “uma mistura betuminosa de granulometria descontínua que tem o betume como ligante, composta por um esqueleto pétreo de agregado grosso que está ligado por mastique”.

Já de acordo com a definição que é encontrada em ZTV Asphalt StB, SMA é “feito de uma mistura mineral de granulometria descontínua, com o betume como ligante e usa aditivos estabilizadores”.

Segundo uma publicação da NAPA, SMA define-se como “uma mistura estável e resistente, em que o seu conceito se baseia no contacto pedra-a-pedra que lhe confere robustez e uma argamassa rica em ligante que lhe proporciona durabilidade, cumprindo estes parâmetros através de uma mistura descontínua de agregados e da adição de fibras e de um betume modificado com polímeros”.

Segundo o livro de J. O'Brien (CRH plc et al. (1998) o Stone Mastic Asphalt “é uma mistura betuminosa que contém um esqueleto grosso com, praticamente, uma dimensão uniforme (fração única), cujos vazios são preenchidos por um mastique betuminoso.”

Sendo definidas de uma ou de outra forma, por uma ou por outra entidade, o que inegável e importante absorver é que subsiste um DNA nas definições. Um SMA apresenta granulometria descontínua, o ligante é o betume e dadas as elevadas percentagens utilizadas deste ligante, podem necessitar de aditivos que estabilizem a mistura e evitem o escorrimento.

3.6. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO DAS SMA

O Stone Mastic Asphalt é atualmente uma mistura betuminosa com grande popularidade internacional, porém foi criada e aplicada pela primeira vez na Alemanha, em meados da década de 1960. As misturas SMA têm sido utilizadas noutros países europeus há quase três décadas à custa das propriedades que são capazes de proporcionar: melhor resposta às ações dos pneus pitonados, que apesar de terem visto o seu uso restringido na Alemanha em 1975, não são proibidos noutros países; capacidade em oferecer maior resistência às deformações permanentes; e, aumento da durabilidade dos pavimentos.

Após uma visita patrocinada por algumas instituições do ramo da construção e gestão de pavimentos em 1990 (na European Asphalt Study Tour of 1990), com o reconhecimento dos bons resultados obtidos na aplicação de SMA na Europa, em 1991, após construção de vários trechos experimentais no sentido de entender a mistura e sua utilização, os Estados Unidos da América também lançaram a construção de pavimentos em SMA, em alguns dos seus estados. De 1991 em diante, o aumento da utilização de misturas SMA na construção de pavimentos nos EUA tem sido significativo. Nos dias de hoje são mais de 28 os estados que usam a mistura, o que já comprovaram ter aumentado 20 a 30 % da vida útil dos seus pavimentos, em comparação com as misturas tradicionais.

O Japão também quis dar os primeiros passos na construção de pavimentos com esta mistura e até ao momento já deu provas de ter tido um sucesso apreciável, isto é, de garantir as propriedades chave aludidas na conceção da mistura (Ahmadinia et al., 2011) e (Gardete, Santos e Capitão, 2011).

Em Portugal, as primeiras aplicações de Stone Mastic Asphalt chegaram bastante mais tarde, já no séc. XXI, em 2004 e só a partir de 2009 têm sido utilizadas de uma forma mais regular (Martinho et al., 2013). Assim, a durabilidade, teoricamente superior da mistura, ainda não está comprovada no caso português, pois de 2004 a 2018 não é suficiente para tirar esse tipo de conclusões.

3.7. PROPRIEDADES GERAIS E APLICAÇÕES

É importante perceber que todas as propriedades têm sido referidas por várias entidades ao nível internacional, mas que em Portugal se deviam efetuar ensaios para confirmar se as misturas que se têm efetuado realmente as garantem.

Partindo do pressuposto que as misturas correspondem realmente à essência do SMA, Ahmadinia et al. (2011) referem que são já vários os estudos que apontam para um aumento da durabilidade e da resistência à deformação e à fadiga quando se utilizam as misturas nos pavimentos rodoviários.

Ahammed, Tighe e Klement (2010) e Gardete, Santos e Capitão (2011) constatarem as mesmas propriedades e remetem ainda para a redução de ruído que estas misturas permitem, para os valores elevados de macro textura e para os confortáveis níveis de atrito que possibilitam, em situações em que o piso está húmido.

A resistência à deformação rege-se pela forma como as cargas se dispersam, e esta, por sua vez, está diretamente associada à estrutura. O mecanismo de degradação de cargas será apresentado neste capítulo, na secção 3.8., onde se mostra também a estrutura de uma mistura SMA, essa que é a justificação da boa macro textura e da melhoria nas propriedades de aderência da camada superficial (Martinho, Nunez e Lanchas, 2013).

São os mesmos autores a apontar para o prolongamento da vida útil do pavimento para valores próximos dos HRA e Mastic Asphalt, fruto da elevada percentagem de betume que as misturas podem incorporar. Aliás, está comprovado, segundo a EAPA (2007) que um acréscimo de 20 % da percentagem de betume é responsável pelo aumento para o dobro da vida útil do pavimento (como é o caso das misturas SMA).

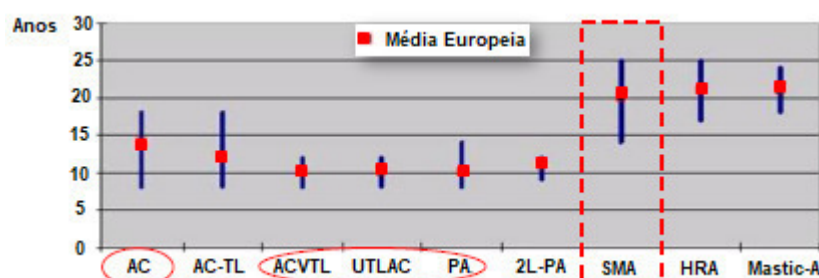


Figura 3. 4 – Média europeia da vida útil das misturas betuminosas [Fonte: adaptado de EAPA (2007)]

Martinho et al. (2013) reforçam a ideia do aumento da durabilidade e fazem menção ao elevado desempenho, razão que suporta a sua facilidade de encaixe em vários tipos de pavimentos, nomeadamente em pavimentos rodoviários, portuários e aeroportuários. São, segundo os mesmos, especialmente indicados para arruamentos urbanos, zonas com tráfego pesado (por exemplo, em portos e aeroportos), em rotundas (onde a aceleração, travagem (nas entradas e saídas) e esforços tangenciais (no interior da rotunda) são frequentes e severos), em zonas com forte inclinação, em viadutos e em túneis.

Martinho, Nunez e Lanchas (2013), decidiram fazer um apanhado de algumas aplicações de SMA em obras pelo mundo, que são exemplo de locais descritos anteriormente (p.e., em Portugal já 2 aeroportos foram reabilitados com uso deste material). A maioria dessas obras estão resumidas em seguida, tendo sido feita uma recolha mais profunda das concluídas em Portugal, através do contacto com algumas empresas de empreiteiros, de projetistas e câmaras municipais.

Quadro 3.3 – Inventário de obras em Portugal e no mundo, onde pelo menos uma das misturas aplicadas foi SMA [(Martinho, Nunez e Lanchas, 2013)]

PAÍS	OBRA	INFORMAÇÕES SOBRE A MISTURA E/OU OBRA ONDE É APLICADA	IMAGEM
ALEMANHA	Aeroporto Internacional de Frankfurt- Reconstrução das pistas de voo Norte e Sul	2 x 250000 m ² SMA11 S – PMB 45	
	Centro de Kiel, Andreas-Gayk-Str. - Pavimentação em ruas de cubos polidos	Mistura redutora de ruído SMA5 com PMB 45	
ARGENTINA	Autoestrada de Buenos Aires – Aeroporto EZEIZA	Mistura SMA, 6,9 % de betume, 8-10 cm de espessura	
COREIA	Autoestradas da Coreia do Sul	66 % das misturas usadas foram SMA	
ESPANHA	Terminal de contentores do Porto de Barcelona – TCB (2011 e 2012)	Misturas: SMA11 (em desgaste) e SMA16 (na base)	
	Aeroporto de Barajas (junho 2007)	Mistura betuminosa SMA numa área de 254000 m ²	
	Aeroporto de Santiago de Compostela (maio 2007)	Pista de voo com camada intermédia de SMA16	

PORTUGAL	Alto São João – Rua Morais Soares – Lisboa (2005)	Mistura betuminosa SMA11 <u>D.O.:</u> Câmara Municipal de Lisboa <u>Aplicador:</u> Pavia, SA	
	Autódromo do Algarve (2009)	Mistura betuminosa SMA10 PMB 40/100-65, com espessura de 4 cm <u>D.O.:</u> PARKALGAR <u>Aplicador:</u> MonteAdriano / Gabriel Couto, SA	
	Avenida do Brasil – Lisboa (2010)	Mistura SMA12 com 4 cm de espessura <u>D.O.:</u> Câmara Municipal de Lisboa <u>Aplicador:</u> Jaop, SA	
	Rotunda do Relógio – Lisboa (2011)	Mistura betuminosa SMA11 com 4 cm de espessura <u>D.O.:</u> Câmara Municipal de Lisboa <u>Aplicador:</u> Estrela do Norte – Eng. ^a e Construção, Lda.	
	IC29 / EN12 – Porto (2011)	Mistura betuminosa SMA10 com espessura variável <u>D.O.:</u> Infraestruturas de Portugal, SA <u>Aplicador:</u> Odebrecht, SA / Gabriel Couto, SA	
	Aeroporto de Lisboa (2012)	Mistura betuminosa SMA12 <u>D.O.:</u> ANA – Aeroportos de Portugal <u>Aplicador:</u> Alves Ribeiro, SA	
	Texsa – Parque Industrial “Alpiarça” (2012)	Mistura SMA16 com 6 cm de espessura <u>D.O.:</u> Texsa <u>Aplicador:</u> Ramos Catarino, SA / Pragosa, SA	

	Viaduto IX: A7 – Basto / Ribeira de Pena (2013)	Mistura SMA8 com 3 cm de espessura e mistura SMA12 com 4 cm de espessura <u>D.O.:</u> Ascendi <u>Aplicador:</u> Mota Engil Engenharia e Construção, SA	
	AE25 Carvoeiro / Boa Aldeia (2013)	Mistura betuminosa SMA12 com 5 cm de espessura em aplicações parciais <u>D.O.:</u> Ascendi <u>Aplicador:</u> Mota Engil Engenharia e Construção, SA	
	AE24 Castro Daire / Régua (2014)	Mistura SMA12 com 5 cm de espessura <u>D.O.:</u> NORSCUT – Concessionária de Autoestradas <u>Aplicador:</u> Mota Engil Engenharia e Construção, SA	
	IC2 (EN1) Leiria / Barracão (2015)	Mistura SMA8 com 14 cm de espessura no total de 2 camadas e mistura SMA11 com 5 cm de espessura numa camada (desgaste) <u>D.O.:</u> Infraestruturas de Portugal, SA <u>Aplicador:</u> Mota Engil Engenharia e Construção, SA	
	EN15 – Beneficiação entre Paredes e a EN106 (2017)	Mistura SMA8 com espessura média de 4 cm <u>D.O.:</u> Infraestruturas de Portugal, SA <u>Aplicador:</u> Mota-Engil Engenharia e Construção, SA	
	Aeroporto de Faro – Recarga de Pista 10 - 28 e Plataforma (2017)	Mistura SMA11 PMB 25/55-65 em espessuras variáveis <u>D.O.:</u> ANA – Aeroportos de Portugal <u>Aplicador:</u> Tecnovia - Sociedade de Empreitadas, SA	

Com os contactos realizados para inventariar as obras nacionais, foi possível aceder às MDJ de algumas delas e, assim, descrevê-las mais pormenorizadamente (tal como é perceptível no quadro 3.3).

3.7.1. AVENIDA DO BRASIL – LISBOA [CE DA OBRA E BATISTA (2010)]

Em 2010, a Avenida do Brasil, em Lisboa, careceu de ser repavimentada devido ao pavimento flexível existente já se encontrar fortemente degradado. A obra esteve a cargo da Jaop, SA.

A avenida contém 4 vias (2 em cada sentido) e nas vias da direita, as degradações encontradas eram mais severas, provavelmente devido à maior utilização destas por parte do tráfego pesado. Por isso, nas vias das extremidades (direitas de cada sentido), optou-se por fresar 8 cm das misturas betuminosas a quente existentes e repor 4 cm com mistura betuminosa densa. Nas vias esquerdas a fresagem não foi tão intrusiva (aproximadamente 3 cm), pois tal não se justificava.

Toda a obra de pavimentação na faixa de rodagem terminou com a aplicação de cerca de 4 cm de SMA12 para desgaste, justificados em CE pela maior durabilidade e menor deformação permanente permitida (dois objetivos desta reabilitação).

3.7.2. “VIADUTO IX – AE7: BASTO/RIBEIRA DE PENHA” [CE DA OBRA E AFONSO E GOMES (2016)]

A pavimentação do Viaduto IX, realizada em julho de 2013, foi a primeira obra em SMA executada pela Mota-Engil. A empreitada tinha como objetivo a impermeabilização do viaduto, composto por dois tabuleiros independentes, apenas no sentido decrescente (isto é, Ribeira de Pena/Basto), com cerca de 450 metros de extensão.

Tratou-se de uma intervenção necessária já que, mesmo tendo sido alvo de manutenções anteriormente, voltaram-se a registar patologias com elevado grau de severidade, como são título de exemplo, as fendas longitudinais, a pele de crocodilo e as covas/ninhos. As intervenções precedentes acabaram por falhar devido a erros cometidos na aplicação da impermeabilização preconizada, que provocaram grande porosidade às camadas de pavimento existente.

Tal como vem escrito, o SMA não era, *à priori*, uma solução. Inicialmente tinham-se definido duas soluções de impermeabilização alternativas, e embora fossem distintas tinham em comum ambas passarem pela remoção total das misturas betuminosas e da tela de impermeabilização, repondo as misturas após seleção da melhor solução de impermeabilização. A primeira solução contemplava a colocação de uma nova tela, aplicada corretamente e, a segunda solução requeria que o tabuleiro fosse impermeabilizado através de uma membrana tipo SAMI-BMB.

A empresa em questão, percebendo que aquilo que se propunha era algo semelhante ao que já tinha outrora falhado, não querendo reiterar os mesmos erros, resolveu estudar uma solução alternativa e inovadora, em comparação com as propostas iniciais. Embora sem qualquer experiência com misturas SMA, a verdade é que sabia da sua existência e propriedades que permitem. Assim, propôs ao D.O. a sua utilização e estes, que já conheciam a mistura, reconhecendo as provas dadas em outros países quanto à alta durabilidade e desempenho (propriedades fulcrais à reabilitação do tabuleiro), decidiram aprovar a construção do troço em SMA.

Sendo uma proposta alternativa e não existindo especificações em CE, teve de se procurar soluções, que foram posteriormente apresentadas à Ascendi com auxílio de uma Nota Técnica. É título de exemplo a

definição do fuso granulométrico por analogia com o normalmente utilizado Alemanha, com a nuance de se ter optado pela combinação dos peneiros da série base + série 2, por serem mais familiares ao país.

No seguimento do exposto, foram removidas na íntegra as telas de impermeabilização e as misturas existentes, e de seguida foram executadas duas camadas de SMA. Na primeira, SMA8 com 3 cm de espessura, que assume dupla função de regularização e impermeabilização e, na segunda, SMA12 com 4 cm de espessura, somente com função de desgaste.

Totalizaram-se cerca de 1150 toneladas aplicadas nesta empreitada.

3.7.3. “AE25 – BENEFICIAÇÃO ENTRE CARVOEIRO E BOA ALDEIA” [CE DA OBRA E AFONSO E GOMES (2016)]

A beneficiação do pavimento da autoestrada 25, entre Carvoeiro e Boa Aldeia, executada no período compreendido entre setembro e novembro de 2013, é outro exemplo de empreitada com aplicação de SMA em Portugal, onde o aplicador foi a Mota-Engil.

Inicialmente foi feito um levantamento das patologias que determinou a degradação superficial do pavimento, isto é, ao nível da camada de desgaste, embora pontualmente camadas inferiores tenham sido afetadas. As degradações com maior impacto registadas são fendas longitudinais, algumas do tipo pele de crocodilo e subida de finos.

Para evitar a subida de finos e que as fendas longitudinais se propagassem para camadas mais profundas devido à ação da água, foi efetuada selagem de fendas com mastique betuminoso. A pele de crocodilo é um forte sinal de indícios de rotura do pavimento por fadiga das misturas betuminosas, pelo que, a opção considerada mais viável no local onde tal se observou, foi a remoção absoluta das misturas e posterior reposição.

As aplicações foram parciais ao longo de 45 km e de dois tipos: 5 cm de SMA12 para repor a mesma espessura anteriormente fresada, onde apenas se tenha detetado anomalias na camada de desgaste; e, 6 cm de mistura do tipo AC20 subjacente, mais 5 cm de mistura SMA12 para desgaste, onde se tenham encontrado anomalias tanto na camada de desgaste, como na de regularização.

A formulação do SMA12 manteve-se semelhante aquela que outrora foi utilizada na obra do Viaduto IX e no conjunto de todos os troços reparados, totalizou-se um gasto de cerca de 20000 toneladas destas.

3.7.4. “AE24 – LANÇOS G E F, GRANDES REPARAÇÕES” [CE DA OBRA E AFONSO E GOMES (2016)]

Na AE24, entre julho e setembro de 2014, foram corrigidas as anomalias do pavimento e repostas as suas características funcionais e estruturais, em ambos os sentidos do lanço G, entre Lamego e Bigorne (com 11,5 km) e no sentido decrescente do lanço F, entre Castro Daire Norte e Castro Daire Leste (com 3,5 km).

Após os estudos necessários, conclui-se que toda a camada de desgaste, com 5 cm, estava degradada e necessitava de ser substituída e que, pontualmente, já era preciso permutar a camada de ligação, numa espessura variável entre 5 e 9 cm.

A camada de ligação foi repostada com uma mistura AC20 e a camada de desgaste em SMA12, ambas em iguais espessuras das fresadas. O facto de se usar SMA em desgaste está novamente relacionado com o reconhecimento da qualidade, à data, das reabilitações efetuadas com a mesma mistura e foi uma proposta alternativa ao projeto que a Mota-Engil propôs e a NORSCUT aprovou.

Desta vez, foram aplicadas cerca de 23000 toneladas da mistura.

3.7.5. “IC2 (EN1) – REQUALIFICAÇÃO ENTRE LEIRIA E BARRACÃO” [CE DA OBRA E AFONSO E GOMES (2016)]

Em junho de 2015, requalificou-se o pavimento do itinerário complementar nº 2 entre o PK 124+000 e o PK 126+536 (Leiria e Barracão), aumentando a sua vida útil e criando melhores condições de circulação e de segurança rodoviária.

A necessidade da reabilitação do pavimento justifica-se à luz daquilo que foi registado no levantamento das patologias, já que a fissuração longitudinal e do tipo pele de crocodilo estava bastante desenvolvida e com grande profundidade.

Como os sinais de rotura por fadiga já se evidenciavam em todos os carotes extraídos do pavimento justificou-se a fresagem da totalidade das misturas betuminosas a quente, numa espessura de 12 cm, substituindo-as por 19 cm de misturas do tipo SMA, ou seja, aumentou-se a capacidade de carga do pavimento pelo reforço de mais 7 cm de espessura, comparativamente ao que existia.

As misturas SMA usadas nas duas camadas mais profundas foram diferentes daquelas que se utilizam para camada de desgaste nas obras anteriores pois sendo estruturais as camadas de base e de ligação, a máxima dimensão do agregado que compõe as misturas deve ser superior (normalmente usa-se SMA16 ou SMA22). Nesta obra, optou-se por usar a mesma mistura (SMA16) para a camada de base (8 cm) e para a camada de ligação (6 cm). Na camada de superfície (5 cm), tal como nas três obras à data concluídas pela empresa, utilizou-se SMA11 (SMA12 ou SMA12,5, como são chamadas anteriormente, mas que no fundo são exatamente a mesma mistura – ver secção 4.2.1.1.).

Ao todo foram aplicadas cerca de 16000 toneladas, no conjunto dos três SMA descritos.

3.7.6. “EN15 – REQUALIFICAÇÃO ENTRE PAREDES (KM 26+944) E A EN106 (KM 29+444)” [CE DA OBRA]

A obra mais recentemente concluída em SMA (janeiro de 2017) pela Mota-Engil foi na Estrada Nacional 15 (mais propriamente onde esta cruza as freguesias de Guilhufe, Penafiel e Marecos), perfazendo 2,5 km de intervenções.

A requalificação da EN15 incluiu trabalhos de terraplanagens (no alargamento a 2 vias por sentido em 2 km), trabalhos de drenagem (para dar continuidade à que já existia e garantir a não acumulação de água na plataforma), obras de contenção, integração paisagística, iluminação, trabalhos para sinalização e segurança e, obviamente, os que mais interessam neste trabalho: trabalhos de pavimentação.

As pavimentações em locais onde houve alargamento de estrada, seguiram os mesmos 15 cm de camadas betuminosas do pavimento existente. Este também foi substituído devido às anomalias que apresentava à data da inspeção visual: fendilhamento generalizado e desagregação do microaglomerado, justificadas pelas solicitações do tráfego, principalmente pesado, que usa a estrada para conexão com a AE4; e, pontualmente, ondulações provenientes de raízes das árvores.

Ainda que estivesse previsto utilizar mistura com alta densidade de borracha em toda a camada de desgaste, achou-se por bem utilizar uma mistura que reduzisse as deformações permanente e acabou por se aplicar 3 cm de SMA8. Para isso recorreu-se a um pedido de alteração da solução e a IP acedeu à proposta, tendo sido aplicadas aproximadamente 4500 toneladas de SMA, ao longo de 48500 m² de área.

Além das obras acabadas de descrever, à data da presente dissertação, a Mota-Engil encontra-se a aplicar SMA na obra “EN4 - Interseção com a EN118 Prox. de Montijo (km 18+750) e Interseção com a EN10 Pegões (km 44+257). Reabilitação.”, cuja descrição e análise constam no capítulo 5 deste documento.

3.8. ESTRUTURA DA MISTURA BETUMINOSA SMA

Tal como vem sendo referido, e como afirmam Kordi e Shafabakhsh (2017), Stone Mastic Asphalt foi pensado para ser uma mistura com granulometria descontínua, composta essencialmente por duas partes: um esqueleto pétreo forte, com agregado grosso; e um mastique com alta percentagem de ligante betuminoso, quando comparado com as misturas tradicionais.

Para além do ligante, o mastique pode englobar fíler e aditivos estabilizadores, nomeadamente, fibras celulósicas, minerais ou outras, apresentadas na secção seguinte.

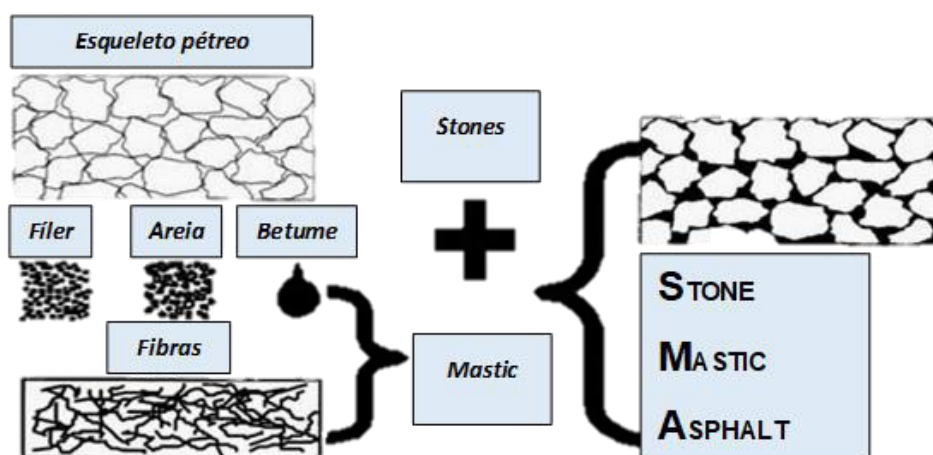


Figura 3. 5 – Composição de uma mistura Stone Mastic Asphalt [Fonte: adaptado de Technology (2013)]

Como pode ver-se no esquema da figura seguinte, tem de existir uma camada homogénea e espessa de betume, para assegurar aos agregados uma coesão adequada que, por sua vez, garante a eficiente dispersão de cargas (setas entre partículas de agregado na figura, alusivas à transferência de cargas por contacto). É o imbricamento entre os agregados (forças de contacto pedra-a-pedra) que permite assegurar as propriedades mecânicas já citadas em 3.7. (Ahmadinia et al., 2011).

Na prática, esta dispersão de cargas pode não existir se não houver o cuidado de garantir que a espessura das camadas de SMA presentes na estrutura do pavimento é maior ou igual a três vezes a dimensão máxima do agregado utilizado (Martinho, Nunez e Lanchas, 2013). É uma afirmação corroborada pelas espessuras praticadas nas obras que constam na secção anterior, como por exemplo: na Texsa utilizou-se SMA16 (espessura mínima superior a 4,8 cm) e confirma-se, a camada tinha espessura de 6 cm; na EN15 utilizou-se SMA8 (mínimo de 2,4 cm) e confirma-se, a camada tinha 4 cm de espessura; no Viaduto IX, utilizou-se SMA8 e SMA12 (mínimo de 3,6 cm). Confirma-se mais uma vez, pois na camada com a primeira mistura a espessura era de 3 cm e com a segunda era de 4 cm.

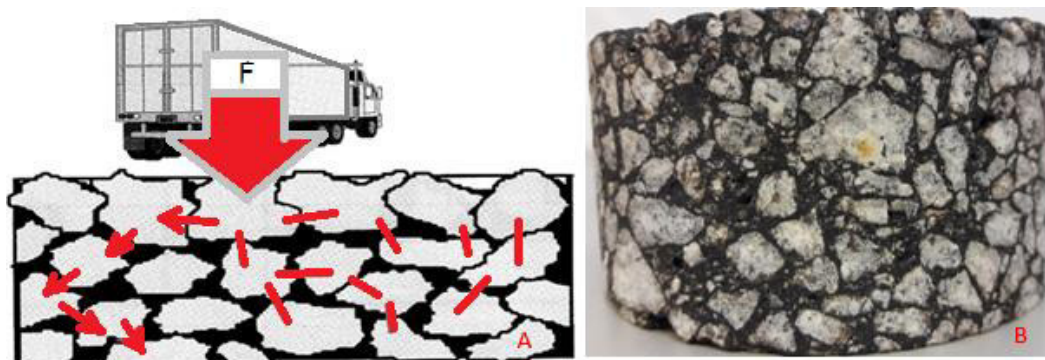


Figura 3. 6 – A) Esquema da degradação de cargas numa camada em SMA [Fonte: adaptado de SEMINAR (2011)]; B) Carote de SMA [Fonte: Própria];

3.9. ESTUDOS DE MATERIAIS E SUAS PROPRIEDADES QUANDO USADOS EM SMA

Desde que se começou a fabricar misturas SMA e até aos dias de hoje, são já vários os estudos desenvolvidos para testar materiais que se possam usar. A maioria desses estudos acompanham os tempos, querendo com isto dizer que inicialmente publicava-se apenas sobre assuntos convencionais, mas à medida que o tempo foi avançando foram surgindo inovações a todos os níveis, em todas as componentes da mistura (ligante, agregado e aditivos), sempre com o intuito de melhorar propriedades da mistura e, se possível, reduzir os custos de produção da mesma.

É inteligível declarar que a maioria dos estudos publicados abordam os aditivos. Pode parecer estranho que a componente que entra em menor proporção na formulação de uma mistura seja tão analisada, mas é natural pois os aditivos são capazes de incutir propriedades que alteram a mistura quase por completo.

Um dos aditivos mais abordados são as fibras. Por os SMA incorporar percentagens de betume elevadas quando comparados com as demais misturas betuminosas é necessário incluir um aditivo para evitar o escorrimento excessivo de ligante (Gardete, Santos e Capitão, 2011), sendo comum esse aditivo serem fibras. Segundo a Rettenmaier Ibérica e com base nos seus ensaios da “película de betume”, as fibras permitem maior homogeneidade na distribuição do mastique pela superfície dos agregados.

3.9.1. LIGANTE

Os ligantes das misturas SMA são, fundamentalmente, betumes de pavimentação ditos “convencionais”, com aplicação corrente na Alemanha, ou betumes modificados, correntemente aplicados em Portugal. A modificação dos betumes surgiu com objetivos muito claros nomeadamente, de melhorar a elasticidade, a flexibilidade, a coesão interna e a adesividade do ligante, diminuir a suscetibilidade térmica, a tempos de carga e a drenagem de ligante, para além de aumentar a resistência ao envelhecimento. Para isso, são geralmente utilizados dois modificadores: pó de borracha e polímeros.

Tendo presente que ambos os modificadores têm aparentemente as mesmas funções, interessa perceber qual dos dois as desempenha melhor. Nesse sentido houve já quem avalia-se comparativamente o comportamento das misturas SMA com um e outro composto.

Embora sendo certo que a redução da drenagem do ligante é, por norma, feita à custa de fibras, não inviabiliza que se use pó de borracha ou polímeros para o mesmo efeito. Por isso, na sua dissertação, Pazinato (2014) fez ensaios de escorrimento usando betume modificado com cada um dos aditivos anteriores e chegou à conclusão que a borracha é mais eficaz que os polímeros na obtenção de bons

resultados da propriedade em causa. Chega mesmo a dizer que esse “resultado indica que tecnicamente, em relação ao escorrimento do ligante, é possível excluir o aditivo estabilizador, no caso a fibra de celulose e o asfalto modificado por polímeros e incluir o asfalto-borracha”. Contudo, não deve ficar a ideia que as fibras podem ser excluídas, pois a afirmação é apenas relativa ao escorrimento de ligante!

Manosalvas-Paredes et al. (2016), entendendo ser importante perceber se, do ponto de vista do escorrimento, era possível usar betume modificado com borracha como alternativa, procederam aos respetivos ensaios.

No estudo, começaram por fabricar uma mistura betuminosa SMA de controlo, onde o ligante era um betume PMB 45/80-65 (polímero SBS) e se juntaram fibras celulósicas. Fabricaram ainda a mistura que realmente estavam interessados em estudar, onde abdicaram das fibras, substituindo-as por um modificador de borracha proveniente de pneus em fim de vida, adicionando-os ao mesmo ligante.

O modificador de borracha foi capaz de aumentar a viscosidade do ligante, de tal ordem que o escorrimento avaliado foi muito baixo. Do mesmo modo que (Pazinatto), face aos resultados, os autores defendem que, olhando apenas para a avaliação de escorrimento, se podem substituir as fibras por betume modificado com borrachas. Provaram ainda, com recurso ao ensaio Wheel Tracking, este betume pode minimizar as deformações permanentes (basta reparar na redução da rodeira da figura seguinte).

Propriedade	Referência Normativa	PMB 45/80-65 0,3% Fibra Celulose	PMB 45/80-65 0,5% Fibra Celulose	PMB 45/80-65 0,0% Fibra Celulose	SMA-DS
Drenagem de Ligante, BD (%)	EN 12697-18	0.14	0.05	0.05	<0.3
WTS.air (mm/10000 ciclos)	EN 12697-22	0.084	0.056	0.038	<0.07

Figura 3. 7 – Quadro de caracterização das misturas usadas no ensaio com 5,9 % de ligante [Fonte: adaptado de Manosalvas-Paredes et al. (2016)]

Al-Hadidy e Tan (2009) já tinham provado que modificar o betume utilizado no SMA, através do uso de 5,0 % do polímero estireno-butadieno-estireno (SBS) ou da mesma quantidade em amido (ST), é benéfico para as misturas pois além da redução da drenagem, permite: aumento da estabilidade (avaliada pelo ensaio Marshall); aumento do módulo de rigidez a temperaturas elevadas; minimização das deformações; redução da espessura das camadas (poupança de material).

Não há como negar que o SBS permita às misturas e, por conseguinte, aos pavimentos muitas vantagens, mas o ST consegue conferir um número ainda maior. É possível destacar algumas, nomeadamente: aumento da resistência ao corte a temperaturas médias e altas; resistência à deformação muito superior; aumento da resistência à tração; e evita com perícia o escorrimento de betume (podem também dispensar o uso de fibras). Além disso, de acordo com (Al-Hadidy e Tan), usar o amido em detrimento do estireno-butadieno-estireno pode significar: vantagens ao nível do fabrico (redução dos consumos de energia e maior facilidade de misturar com o ligante que usando SBS, pois não necessita de qualquer técnica ou cuidado especial); ao nível da aplicação (riscos reduzidos para a saúde durante este processo); e ao nível da acessibilidade (o ST existe em grande quantidade e, por conseguinte, a preços mais acessíveis).

Na mesma linha de pensamento, posteriormente a este estudo veio-se a desenvolver outro centrado apenas no amido como modificador. A motivação era definir a percentagem ou o intervalo de percentagens que garantisse melhores valores das propriedades estudadas. Foram testadas as proporções de 2,5, 5,0 e 7,5 % do peso da mistura e no intervalo entre 5,0 a 7,5 % de ST conseguia-se o objetivo de obter valores mais interessantes nas propriedades.

Todas as vantagens elencadas para o amido foram corroboradas. Destacaram uma novo, muito importante na aplicação de SMA em postos de abastecimento de combustível: a garantia de resistência à interação com combustíveis e químicos (Ai, Yi-qui e Hameed, 2011).

O ligante utilizado numa mistura SMA também pode ser proveniente de misturas betuminosas recicladas (RAP), que são cada vez mais utilizadas. Tendo plena consciência que atualmente a maioria das misturas têm sido produzidas com betumes modificados, e sabendo que são as misturas de “hoje” que no futuro serão fresadas para reciclar, também se sabe que a maioria do betume proveniente dessa reciclagem será inevitavelmente modificado.

Liphardt, Król e Radziszewski (2016) compreenderam o que se iria passar e procuraram saber a influência do ligante reciclado modificado com polímeros na deformação permanente, avaliando as rodeiras pelo ensaio Wheel Tracking (a 60°C), num pavimento em SMA. Como esta propriedade tem de estar garantida na mistura em causa, é bastante relevante terem avaliado se não há suscetibilidade deste composto interferir de forma negativa na característica requerida.

À partida já especulavam que só ia haver vantagens em utilizar o betume das misturas recicladas porque este tende a ser mais duro e o documento publicado vem confirmar essas suspeitas. Na figura pode ver-se que quanto maior a percentagem de material reciclado, menor a rodeira.

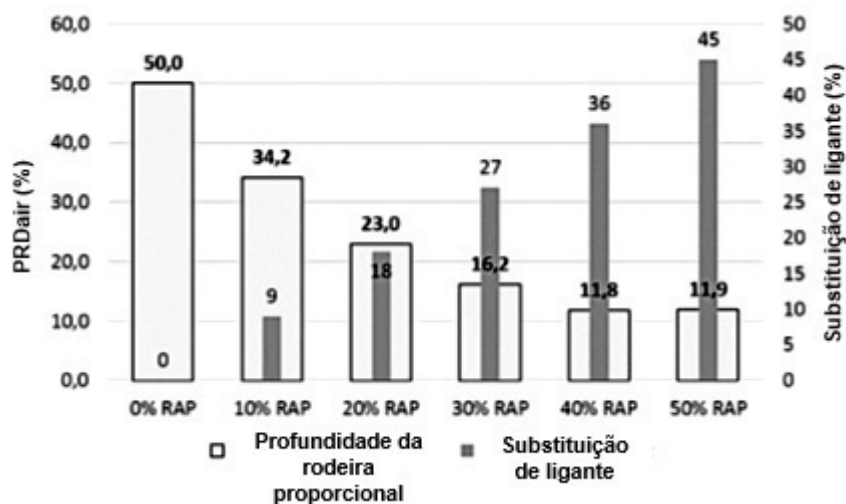


Figura 3. 8 – Gráfico da PDRair de acordo com a taxa de substituição do ligante [Fonte: adaptado de Liphardt, Król e Radziszewski (2016)]

Com os resultados apresentados pode-se involuntariamente passar a ideia errada que só se conseguem evitar rodeiras com betumes provenientes de misturas recicladas. A verdade é que também existem betumes de pavimentação duros, isto é, com menor classe de penetração a 25°C (p.e. betume 10/20), que podem perfeitamente garantir as mesmas vantagens. A vantagem do RAP face a estes é o custo!

Atualmente abundam maneiras diferentes de modificar o betume... uma geomembrana reciclada (RGMB) pode ser usada para o efeito. Foi efetuado um estudo laboratorial que visava entender qual o desempenho mecânico das misturas SMA fabricadas com betumes desta natureza.

De entre as misturas utilizadas no estudo, a que continha RGMB apresentou maior módulo de rigidez (ensaio de acordo com a EN 12697-26, Anexo C, a 20°C) que melhora a resistência às deformações plásticas e minimiza o escorrimento de ligante (García-Travé et al., 2018).

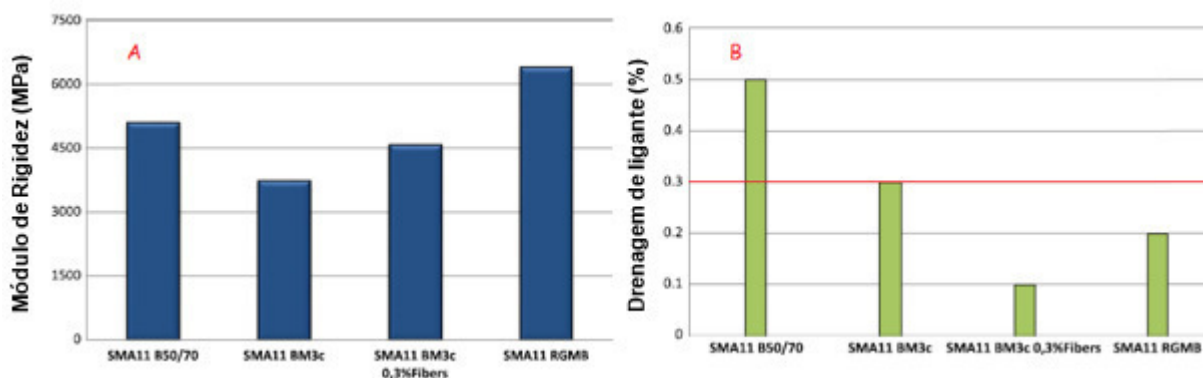


Figura 3. 9 – A) Resultados do Módulo de Rigidez; B) Resultados do ensaio da Drenagem de Ligante; [Fonte: adaptado de García-Travé et al. (2018)]

Quando se pretendem alterar as propriedades da mistura, pode-se modificar diretamente a mistura ou o ligante que as compões. Nesta secção ficaram registadas algumas formas de alterar o ligante, enquanto nas próximas serão abordadas formas de modificar a mistura.

3.9.2. ADITIVO: FIBRAS

Esquecendo um pouco a atuação ao nível do ligante, é altura de virar o foco para os aditivos a adicionar aos SMA de modo a minimizar o deslizamento de betume e, segundo a EN 12697-18 (CEN, 2017a), que normaliza o ensaio de escorrimento, um desses aditivos, talvez o mais vulgarizado, são as fibras.

Na realidade, apesar de (Pazinatto, 2014), Manosalvas-Paredes et al. (2016) e Al-Hadidy e Tan (2009) terem concluído que era possível substituir as fibras por um betume modificado, o mais comum não é abdicar das fibras, até porque a facilidade de incorporação destas na produção da mistura é maior que a modificação do betume com certos aditivos.

Embora existam vários tipos de fibras, nomeadamente, fibras têxteis, fibras de carbono, fibras de vidro e fibras minerais (Batista et al., 2012) e (Carvalho, 2012), são as fibras de celulose (revestidas a betume) as mais regularmente utilizadas devido ao seu comportamento e à sua facilidade de aquisição (Morea e Zerbino, 2018). Existem também fibras de celulose revestidas a cera, porém têm maior interesse quando se querem fabricar e aplicar misturas betuminosas a temperaturas mais baixas, p.e. em obras noturnas (Martinho et al., 2013).

Segundo Pank (1995) as proporções a utilizar de algumas das fibras mencionadas vêm nos intervalos de valores seguintes: 0,3 a 0,5 % em fibras de celulose (revestidas a betume); 0,7 a 0,9 % em fibras minerais; e 0,4 a 0,6 % em fibras de vidro.

As fibras dividem-se em dois grupos, conforme a sua origem/natureza. Existem as fibras “engendradas” pelo homem, isto é, as fibras sintéticas e as fibras naturais, provenientes de animais e plantas.

Na opinião de Abiola et al. (2014), as fibras naturais podem vir a substituir as fibras sintéticas em misturas SMA, para atuarem como estabilizadoras das mesmas. Aliás, Oda, Leomar Fernandes e Ildefonso (2011) testaram fibras naturais e, de acordo com os resultados dos ensaios realizados, concluíram que estas estão aptas a menorizar escorrimento do betume.

Além disso, as misturas SMA com fibras naturais podem apresentar profundidades de rodeira no Wheel Tracking inferiores às registadas com fibras sintéticas (ver gráfico da figura), módulo de rigidez da ordem de grandeza daquele que as fibras sintéticas permite e o custo da construção do SMA com fibras naturais é em média, aproximadamente, 18 % menor que quando se usam fibras sintéticas (Kumar et al., 2011).

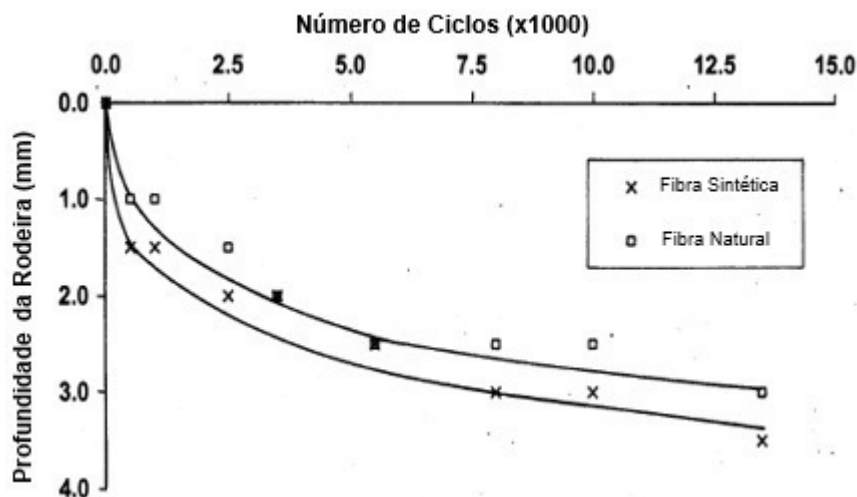


Figura 3. 10 – Gráfico da profundidade da rodeira em função do número de ciclos de carga de SMA com fibras sintéticas ou naturais [Fonte: adaptado de Kumar et al. (2011)]

Também Arshad et al. (2016) quiseram dar o seu contributo nesta matéria. Decidiram usar duas fibras de celulose numa mistura SMA14, em que uma delas tinha origem sintética (Viatop66) e a outra origem natural (Kenaf), ambas em 0,3 % do peso da mistura.

Embora a fibra sintética tenha concedido a inclusão de uma quantidade de betume ligeiramente superior à permitida pela Kenaf (6,1 % a sintética e 5,9 % a Kenaf), a última permite obter uma mistura mais resistente às deformações permanentes. Para além deste facto, concluíram por análise de microscopia eletrónica, que estas fibras interagem bem com outros compostos da mistura, nomeadamente o betume, e por isso podem reter com maior eficiência o ligante, cumprindo com perícia a função principal para o qual foram concebidas, ou seja, evitar drenagem de betume.

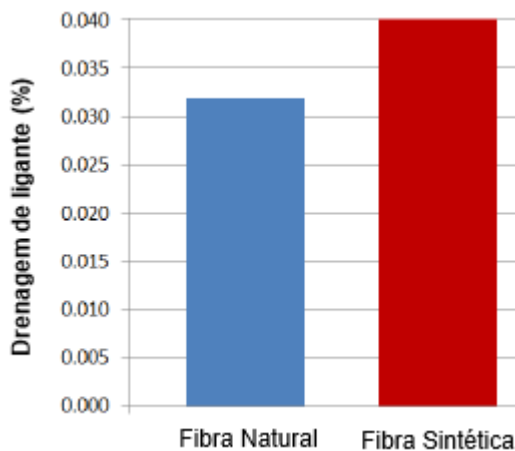


Figura 3. 11 – Gráfico da Drenagem de Ligante numa mistura SMA14 com fibras naturais ou sintéticas [Fonte: adaptado de Arshad et al. (2016)]

Seguindo esta ótica, Herráiz et al. (2016) experimentaram fibras de uma alga (*Posidonia oceânica*). Sabendo que as misturas devem incorporar mais ligante que as demais, vieram a provar que basta apenas 0,3 % (no peso total da mistura) de fibra *Posidonia* para garantir o teor mais elevado desse. Com esta proporção menor, já conseguiram obter melhorias ao nível da vida à fadiga, da rigidez e na resistência à deformação permanente, relativamente ao uso de fibras celulósicas. Contudo, na presença da água, cai por terra esta teoria e dão-se grandes variações do módulo de rigidez.

Portanto, fizeram incrementos sucessivos da percentagem de *Posidonia* e testaram as misturas obtidas. Foi entre 1,5 e 2,0 % que a resistência à fadiga e à deformação permanente aumentou, se registou a maior rigidez e onde a presença da água, não provocava variações nesta última propriedade.

Em 2006, (Vale et al.), efetuaram um estudo laboratorial onde comparavam três misturas: uma sem adição de qualquer fibra; uma com fibras de celulose (fibra de referência, pois diversos estudos comprovam a eficiência das mesmas); e uma com fibras de coco. As fibras de coco são naturais, e existem com abundância em certas partes do mundo (p.e. no nordeste do Brasil), sendo por isso uma motivação do ponto de vista económico estudá-las para saber se poderão vir a substituir outras fibras economicamente mais dispendiosas. O estudo revelou-se positivo sob o ponto de vista da minimização do escorrimento, se bem que permanecia a dificuldade na trabalhabilidade da mistura quando se tentavam moldar os provetes para os ensaios. Na tentativa de ultrapassar este obstáculo, limitaram o comprimento das fibras de coco a aproximadamente 2 cm, o que já garantiu maiores níveis de trabalhabilidade na mistura.

Fibra	Teor de fibra (%)	Drenagem de ligante (%)	
		$T = 165^{\circ}\text{C}$	$T = 180^{\circ}\text{C}$
Sem Fibra	0.0	1.06	0.70
Fibra de Coco	0.3	0.31	0.30
	0.5	0.08	0.25
	0.7	0.04	0.09
Fibra de Celulose	0.3	0.01	0.03
	0.5	0.01	0.02

Figura 3. 12 – Quadro resumo dos resultados do ensaio de escorrimento de SMA sem fibras, com fibras de coco ou de celulose [adaptado de Vale et al. (2006)]

Vale, Casagrande e Soares (2014) voltaram a estudar as fibras de coco, mas não lhes limitaram o comprimento a 2 cm numa fase inicial. Chegaram à conclusão que estas fibras são potenciais substitutas das fibras de celulose, como Vale já tinha considerado no estudo de 2006 e corroboraram o que este tinha inferido... realmente era necessária a limitação de 2 cm se se queria obter trabalhabilidade satisfatória. Até aqui praticamente nada de novo em relação ao estudo apresentado anteriormente. Contudo, para além das propriedades já referidas, avançaram no estudo de outras propriedades e provaram que a resistência à tração e a suscetibilidade à água são duas características que beneficiam da incorporação de fibras de coco, ao contrário da resistência à fadiga, que é substancialmente menor, talvez devido endurecimento das misturas quando incluem este composto.

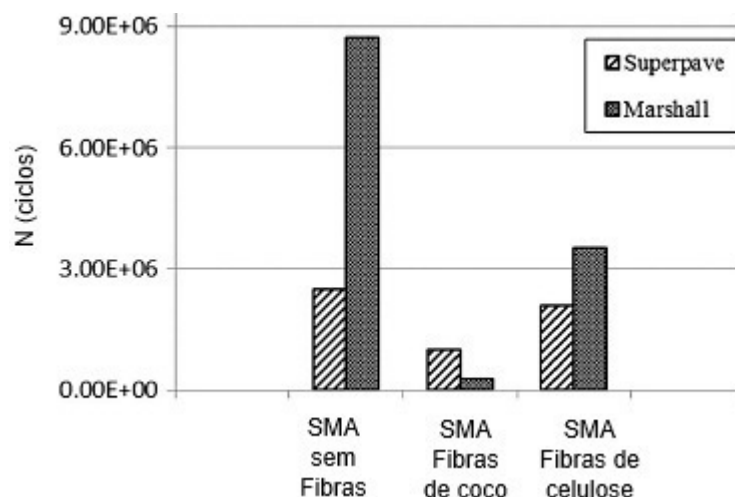


Figura 3. 13 – Gráfico de resultados do ensaio de Análise à Fadiga de SMA sem fibras, com fibras de coco ou de celulose [Fonte: adaptado de Vale, Casagrande e Soares (2014)]

No sentido de usar materiais de baixo preço e, ao mesmo tempo, contribuir para um meio ambiente melhor, foi estudada a hipótese de utilizar resíduos de palha como fibra estabilizadora do escorrimento excessivo de ligante. Através da análise de algumas propriedades (módulo de rigidez, estabilidade Marshall, ...) chegou-se à conclusão que 0,28 % é a percentagem a usar deste tipo de fibras como estabilizadoras do betume (Xue et al., 2013), aproximadamente o mesmo que as fibras de celulose, que andam entre 0,3 % e 0,4 %, do peso total da mistura (Santos e Capitão, 2011), ou entre 0,3 e 0,5 % segundo outros autores, nomeadamente já citados. O mais importante é que os autores provaram que esta fibra é capaz de aumentar 12,5 % da resistência à compressão e 21,5 % da resistência à flexão.

Como aludido, existem outras fibras além das naturais e a reciclagem de materiais pode constituir uma solução quer para as fibras quer para os restantes componentes. Shehata e Panhwer (2005) descobriram que 3 % de fibras provenientes da reciclagem de coberturas em material betuminoso (telhas asfálticas) tinham potencial para substituir as fibras de celulose de utilização mais comum, enaltecendo os bons resultados na resistência à tração e a imprescindível redução do escorrimento do ligante.

Putman e Amirkhanian (2004) estudaram também fibras provenientes de resíduos, desta feita de pneus e de tapetes dos automóveis. Estes são dois tipos de resíduos que até têm outras aplicações, mas que, na sua grande maioria, acabam por serem levados a aterro sanitário. Ora, caso fosse viável a sua aplicação como fibras estabilizadoras nas misturas com alta percentagem de betume, conseguia-se evitar que os materiais fossem depositados em aterro. Chegaram à conclusão que não só é possível utilizar estes dois tipos de resíduos para evitar o escorrimento, como ainda conferem à mistura uma ótima resistência à tração, dada a elasticidade conferida. Contudo, a percentagem de betume máxima é ligeiramente inferior relativamente àquela que se chega quando as tradicionais fibras celulósicas são usadas.

Mais uma vez com interesse de aproveitar os resíduos e integrá-los nos pavimentos, Ahmadinia et al. (2011) propuseram a utilização de resíduos de garrafas plásticas na composição das misturas SMA. Submeteram as misturas fabricadas a uma prensa Marshall e avaliaram a estabilidade e a deformação Marshall de cada uma delas, calculando através destas duas grandezas o quociente Marshall. A partir daqui foram várias as ilações tiradas do estudo efetuado, entre elas que independentemente da quantidade de garrafas plásticas [Polyethylene Terephthalate (PET)] utilizadas, desde que estas estejam presentes, vão aumentando os vazios da mistura, ao passo que a baridade vai diminuindo. Concluíram também que cerca de 6 % da percentagem de betume integrada é a proporção ideal de PET a usar, isto

porque, pelos ensaios na prensa Marshall, para baixas quantidades de PET, a estabilidade era baixa e, aumentando gradualmente a quantidade de Polyethylene Terephthalate até aos 6 %, havia um acréscimo de estabilidade da mistura, invertendo-se o panorama desta percentagem em diante.

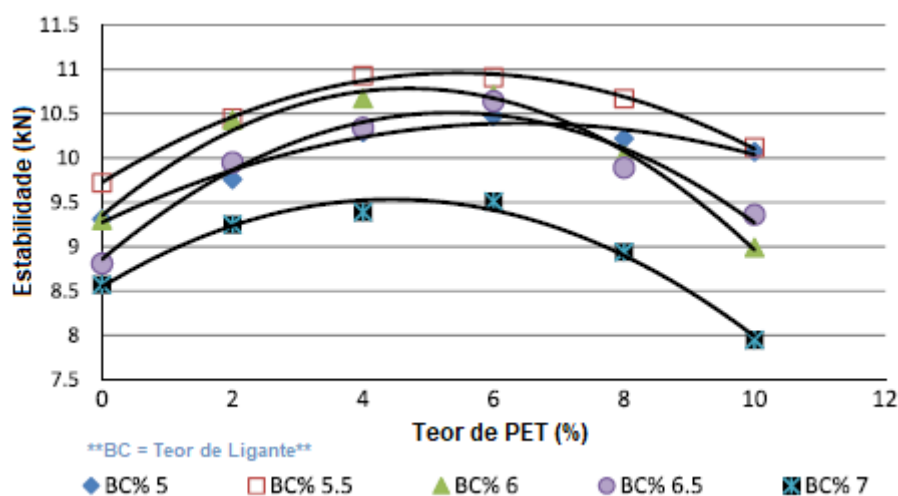


Figura 3. 14 – Gráfico de resultados da Estabilidade Marshall em função do teor de PET [adaptado de Ahmadinia et al. (2011)]

Interessados pelo assunto, Baghaee Moghaddam, Karim e Syammaun (2012) decidiram analisar as propriedades dinâmicas do SMA que contenha resíduos de garrafas plásticas (PET), com dimensão máxima de 2,36 mm neste caso em concreto. Ao longo do estudo obtiveram conclusões importantes: as propriedades elásticas das misturas melhoram quando se adiciona Polyethylene Terephthalate e esta evita a formação e propagação de fissuras por aplicação de cargas cíclicas; consequente registo de melhorias significativas das propriedades à fadiga, isto porque registavam que a vida dos pavimentos era maior em misturas com PET que em misturas sem este aditivo; já a rigidez (avaliada à temperatura de 20°C no Indirect Tensile Test) é menor quando se usam proporções de PET superiores (aproximadamente 1%), embora tenha um “pico” para quantidades de PET residuais.

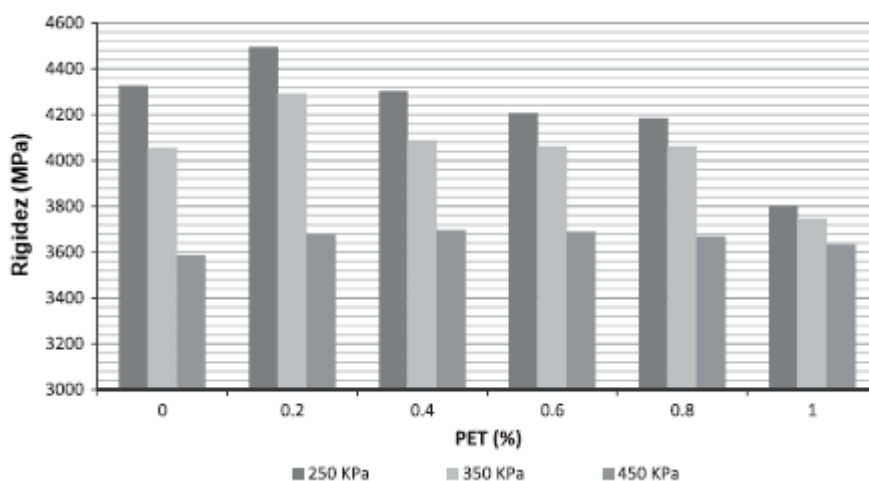


Figura 3. 15 – Gráfico de resultados do Módulo de Rigidez para cada percentagem de PET, a 3 níveis de pressão [adaptado de Baghaee Moghaddam, Karim e Syammaun (2012)]

Apesar dos resultados anteriores, deve haver consciência que para substituir as fibras de celulose mais usadas por quaisquer outras estudadas, se carece de um investimento para a comercialização em grande escala, e enquanto tal não for feito, serão essas as fibras aplicadas.

3.9.3. RESTANTES ADITIVOS

Além das fibras e das borrachas há outros aditivos especiais que se podem incorporar no SMA para, por exemplo, melhorar a adesividade betume-agregado, a trabalhabilidade dos microaglomerados a frio, entre outras (Garrido et al., 1998). Ora, o filler é um bom exemplo desses aditivos usados e pode aparecer como pedra moída, cimento ou cal (Shafiei e Latifi Namin, 2014).

Outro aditivo que pode eventualmente ser usado é a grafite. Kök, Yilmaz e Erkus (2017), com a intenção de definir as propriedades mecânicas das misturas com este composto, usaram 3 percentagens de grafite (10, 15 e 20 % do peso do betume). Chegaram à conclusão que 15% do peso de betume em grafite era a percentagem ideal quando se considera a resposta elástica, a energia absorvida e o comportamento à deformação do pavimento em SMA, após as fendas iniciais que induzem a deterioração do mesmo.

As propriedades anteriores foram avaliadas em misturas envelhecidas e não envelhecidas, para perceberem se havia constância ou alteração. Chegaram à conclusão que a partir de 15 % de grafite adicionada o tempo de envelhecimento perde importância no módulo de rigidez (avaliado no Indirect Tensile Test, a 50°C).

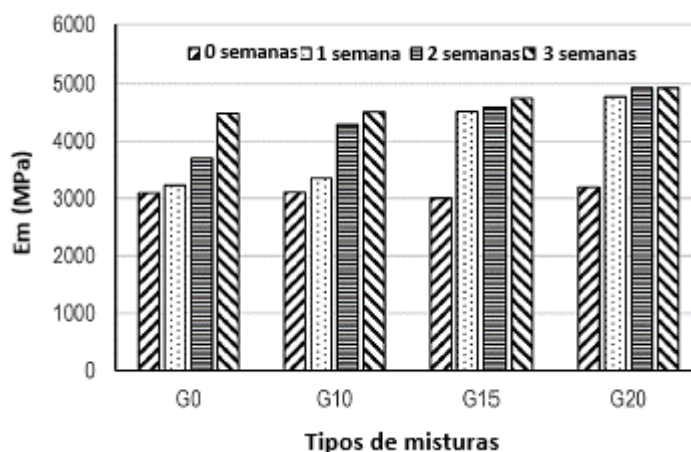


Figura 3. 16 – Gráfico de resultados do Módulo de Rigidez de misturas SMA em função da quantidade de grafite e das condições de envelhecimento [adaptado de Kök, Yilmaz e Erkus (2017)]

3.9.4. AGREGADOS

Não só de ligante e de aditivos são constituídas as misturas betuminosas. Os Stone Mastic Asphalt, tal como as outras misturas, contêm agregados! A granulometria, no caso específico dos SMA, deve ser descontínua (Gardete, Santos e Capitão, 2011) e com maior proporção de agregados grossos.

Quanto aos agregados para estas misturas, já existem algumas publicações distintas feitas, mas há uma característica comum a todas. Os seus autores escrevem com base nas necessidades, isto é, percebe-se que estudam incorporação de um inerte pela influência e abundância que o mesmo tem na sua região ou em outra que conheçam. Acaba por ser normal que assim o façam, pois, sendo os agregados uma parte “pesada” nas misturas, faz sentido utilizar-se o que os locais da aplicação têm de melhor.

Novamente pelo peso que os inertes têm, torna-se interessante explorar compostos naturais ou da reciclagem/reutilização de materiais velhos/inutilizados, para substituir os agregados tradicionais.

Por exemplo, depois dos terremotos no Taiwan em 1999 e na China em 2008, registaram-se imensas derrocadas que totalizavam enormes quantidades de betão provenientes das edificações destruídas. De maneira a minimizar os impactos ambientais e de modo a obter materiais económicos para a construção das vias de comunicação necessárias (porque tinham ficado igualmente destruídas), dois anos após o sismo na China, Kuo, Du e Shen (2010) resolveram tentar incorporar resíduos de betão triturado no SMA e obtiveram resultados satisfatórios, nomeadamente ao nível do desempenho, que pode mostrar-se superior ao das misturas betuminosas em geral. Não sabendo bem a quantidade de resíduo triturado (CWC) a incorporar, experimentaram algumas combinações, das quais chegaram à conclusão que a mais exequível e eficiente consistia em substituir 50 % do agregado britado tradicional (CS), pela mesma quantidade de CWC. Com esta proporção, a resistência à deformação permanente no Wheel-Tracking destacou-se pela positiva, ou seja, era significativamente superior (ver no gráfico a deformação menor).

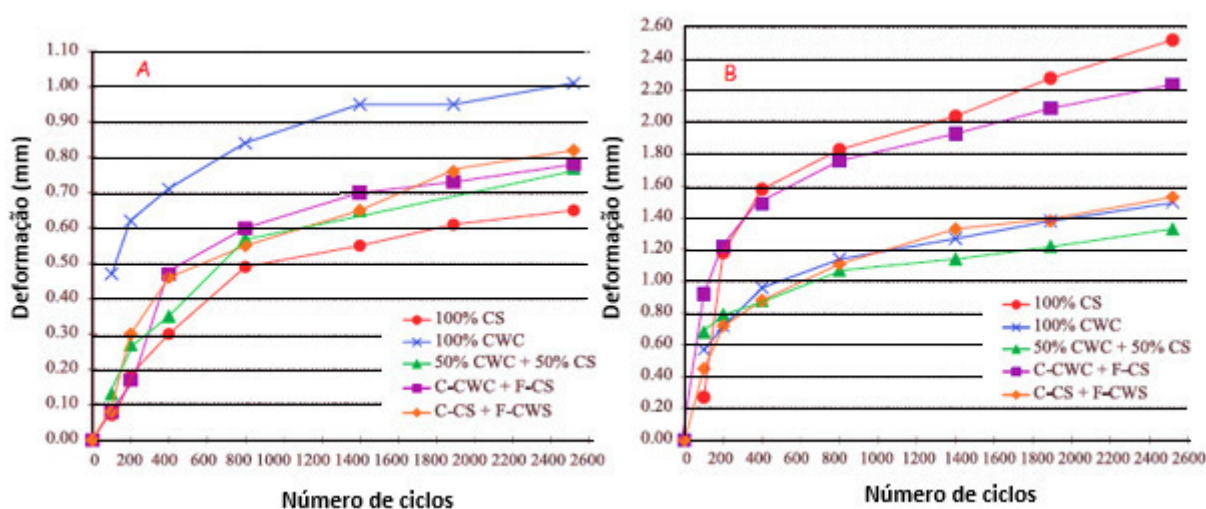


Figura 3. 17 – Gráfico de resultados da profundidade da rodeira; A) a 25°C; B) a 60°C; [adaptado de Kuo, Du e Shen (2010)]

Na mesma ótica (económica e ambiental), Xue et al. (2009) decidiram experimentar a substituição parcial dos agregados finos e do fíler por cinzas de inceneração de resíduos sólidos municipais (MSWI) e a substituição também parcial dos agregados grossos por escória BOF. Após alguns testes efetuados chegaram à conclusão ser necessário colocar 8 a 16 % de MSWI do peso da mistura SMA.

Concluíram também que estas misturas admitem incorporar quantidades significativas de escória BOF, quantidades essas que se conseguem com facilidade dada a abundância destes materiais. Assim, está-se perante agregados que apesar do estatuto de inovadores, constituem um potencial enorme para a economia de recursos naturais na construção rodoviária.

Em 2007, (Wu et al.) interessaram-se pelas escórias de aço. Cerca de 15 a 20 % dos compostos formados durante a produção do aço são escórias e há países, como por exemplo a China, que não têm aplicabilidade deste material. Por consequência os compostos acabam por parar em depósitos de escória extremamente prejudiciais para o meio ambiente.

Os autores perceberam que deviam envelhecer as escórias para aumentar a sua porosidade. Ao fazê-lo, podiam aumentar a quantidade de betume absorvida por estas nas misturas SMA.

Registaram ainda melhorias significativas do comportamento da mistura a altas temperaturas, na medida em que se consegue diminuir a deformação permanente nos pavimentos.

A aplicação de escórias de aço como agregado para betão de cimento já tinha sido abordada antes do trabalho feito pelos autores referidos. Todavia, quanto à aplicação das mesmas em material betuminoso existiam poucos registos de relatórios/estudos elaborados à data da publicação.

3.10. USO DA NANOTECNOLOGIA NA ENGENHARIA DOS PAVIMENTOS. APLICAÇÕES EM SMA

Nazarko et al. (2015) após efetuarem um estudo prospetivo de tecnologias de pavimentação rodoviária concluíram que, no futuro, os pavimentos serão cada vez mais inovadores, quer ao nível dos materiais quer nas tecnologias de aplicação e monitorização que tendem a incorporar.

A construção de pavimentos modernos e duráveis, quer sejam rígidos ou flexíveis, requer materiais de qualidade e uso de técnicas que tenham em consideração a sustentabilidade, conectada com a proteção ambiental. Podem, por exemplo, utilizar-se sensores de monitorização, gestão e controlo na rede rodoviária (que facilitam o sistema de gestão do pavimento) ou usar-se a nanotecnologia na melhoria de propriedades dos materiais da mistura (Radziszewski et al., 2016).

A nanotecnologia é um campo relativamente novo na ciência das estruturas das partículas. Para ilustrar aquilo que é a nano escala pode fazer-se a seguinte analogia: supondo que um fio de cabelo humano tem o diâmetro de um campo de futebol, então uma partícula de tamanho nano tem o diâmetro de um lápis de grafite (Amirkhanian, Xiao e Amirkhanian, 2011).

Desenvolveu-se inicialmente no âmbito da física, da química e da eletrónica e é ainda nestes três campos que atualmente mais desenvolvimentos se têm registado. Todavia, esta ideia tem-se tornado num campo interdisciplinar (Faruk et al., 2014) e para afetar a sociedade em geral, já que tem potencial para tal, ela deve ser aplicada em áreas como a engenharia (Steyn, 2009).

Nos últimos anos tem mesmo sido utilizada em muitas aplicações da engenharia, pois o uso das partículas nano permite melhorar propriedades de diversos materiais. Contudo, na indústria da construção e na engenharia civil não tem, no geral, grande popularidade (por várias razões, incluindo o custo que representa), embora se use pontualmente na melhoria de propriedades físicas e químicas de materiais deste âmbito, como em ligantes betuminosos para a construção de pavimentos (Amirkhanian, Xiao e Amirkhanian, 2011) e para a resolução de problemas gerais na engenharia de pavimentos (Steyn, 2009). Fora dos pavimentos, tem sido mais usada no tratamento de águas, em particular das residuais (Naganathan et al., 2014).

Foram Amirkhanian, Xiao e Amirkhanian (2011) que caracterizaram um ligante modificado (não envelhecido) com nano partículas de carbono. Chegaram à conclusão que betumes com 1,0 a 1,5 % de partículas desta natureza (em relação ao peso do próprio betume) ficam mais viscosos, concedendo o aumento da temperatura de fabrico e compactação. Contudo, caso a percentagem usada fosse menor, mais concretamente próxima de 0,2 %, as alterações na viscosidade não eram relevantes. Em suma, no futuro deve encontrar-se um equilíbrio na percentagem de nano partículas de carbono a utilizar, visto que por um lado o aumento da viscosidade representa um problema, mas por outro, estas partículas são capazes de melhorar algumas características, especialmente a resistência à deformação permanente.

Mais relacionada ao âmbito desta dissertação, está a publicação de Kordi e Shafabakhsh (2017), em que avaliaram as propriedades mecânicas do Stone Mastic Asphalt quando modificado com nano óxido de ferro III (Fe_2O_3), um modificador que, apesar de traduzir custos mais elevados de produção, tem benefícios a médio/longo prazo na durabilidade do pavimento.

Segundo os autores, deve modificar-se o betume com a percentagem ideal de nano Fe_2O_3 (0,9 %) e transportá-lo para a central de produção de SMA, onde será misturado com as restantes componentes da mistura. A proporção é suficiente para aumentar a resistência à fadiga e para atingir a maior modificação no módulo de rigidez da mistura, aumentando-o em quase 45 % quando comparado com a mistura de controlo usada no estudo. Uma consequência direta deste aumento do módulo de rigidez é o aumento do tempo para degradação do pavimento, ou numa outra perspetiva, uma possível diminuição da espessura do pavimento quando é dimensionada.

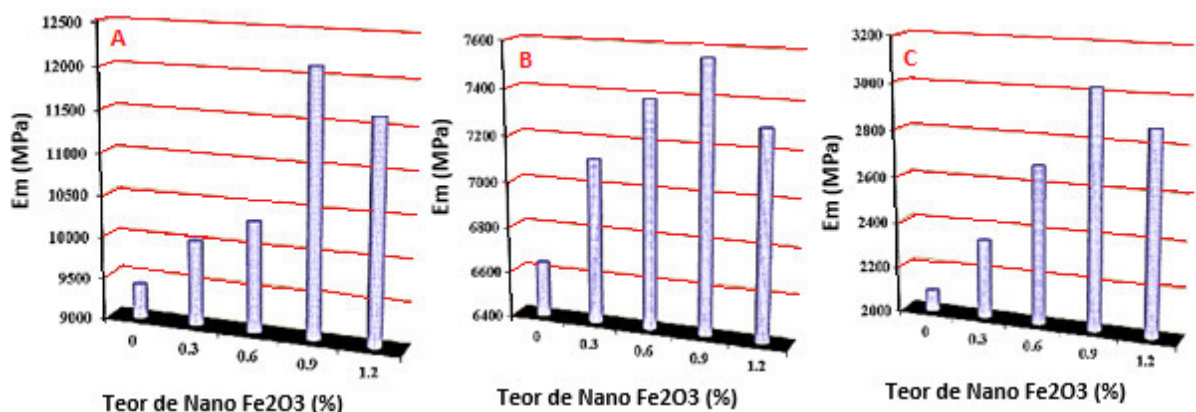


Figura 3. 18 – Gráfico de resultados do Módulo de Rigidez em função do teor de Nano Fe_2O_3 : A) a 5°C; B) a 15°C; C) a 25°C; [adaptado de Kordi e Shafabakhsh (2017)]

Face ao aumento do módulo de rigidez, registou-se uma redução da profundidade das deformações entre 25 e 40 %, relativamente à amostra de controlo, quando ambas eram submetidas a solicitações.

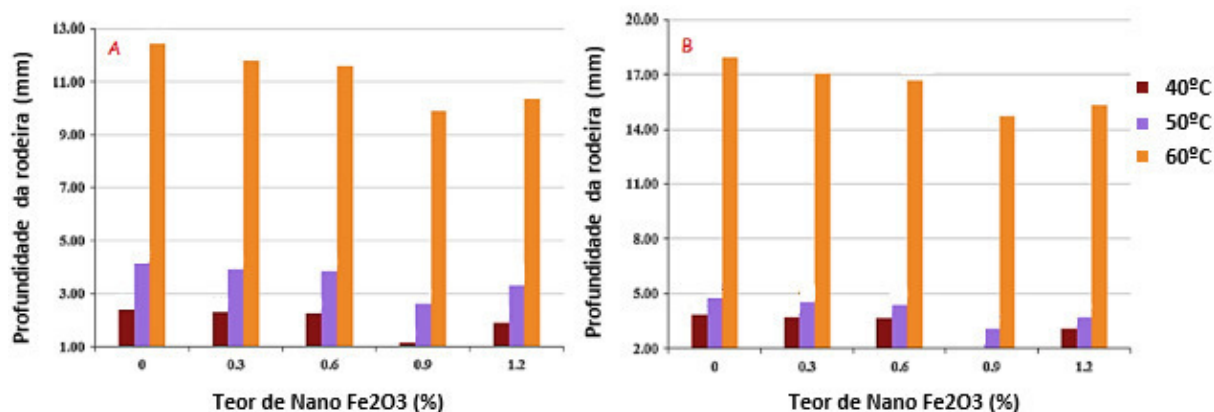


Figura 3. 19 – Gráfico de resultados da Profundidade da Rodeira em diferentes amostras, função do teor de Nano Fe_2O_3 e da temperatura de ensaio: A) com carga de 500 kN; B) com carga de 700 kN; [adaptado de Kordi e Shafabakhsh (2017)]

Quem lê toda a informação anterior sobre nanotecnologia e a sua aplicação nos pavimentos, pode ficar com a errada sensação que as propriedades se melhoram sempre que a nanotecnologia é aplicada e que só há vantagens em usá-la. É certo e já foi esclarecido que os nano materiais têm um enorme potencial como agente modificador dos ligantes betuminosos... aquilo que ainda não foi dito é que já existem

diversos estudos que apontam para melhorias de desempenho do ligante a altas temperaturas, mas a temperaturas baixas o desempenho vem enfraquecido pelo uso de tais materiais.

É quem o afirma, que também estuda uma solução para evitar que tal aconteça. Sun, Xin e Ren (2017), apercebendo-se desta limitação, combinaram o uso de nano materiais (SiO_2) com polímeros (SBR e PE) para melhorar o desempenho das misturas tanto a altas como a baixas temperaturas. Após estudarem a ductilidade, viscosidade e o ponto de amolecimento do betume com várias proporções destes compostos recomendaram utilizar 0,5 % SiO_2 + 5 % SBR + 1 % PE (relativo ao peso do betume) na fórmula de trabalho. E realmente, os resultados transpareciam melhorias no desempenho das misturas (pequenas rodadeiras no Wheel Tracking e sensibilidade à água satisfatória a qualquer temperatura), tal como pretendiam. Este estudo teve uma aplicação prática na província chinesa de Shanxi, onde se comprovou que as ilações dos testes laboratoriais estavam corretas.

É viável concluir que a combinação de duas ideias, no fundo do inovador com o convencional, pode trazer, como é o caso, mais valias nas propriedades e desempenho dos pavimentos rodoviários.

4.

ANÁLISE DA EN 13108-5 FORMULAÇÃO DA MISTURA

4.1. ANÁLISE DA EN 13108-5 DE 2016

A EN 13108-5, está escrita em três línguas oficiais (inglês, francês e alemão) e visa estabelecer princípios gerais para a formulação de misturas Stone Mastic Asphalt.

A norma é constituída por sete capítulos que são de seguida sinteticamente apresentados e a sua estrutura é semelhante à das outras normas europeias.

Essa semelhança é notória logo nos primeiros três capítulos. Como habitualmente acontece, o primeiro capítulo esclarece o âmbito da sua aplicação. Começa precisamente por explicar que o documento normaliza misturas do tipo SMA, produzidas a quente, para serem aplicadas em todas as camadas betuminosas dos pavimentos de estradas, aeródromos ou outras áreas com tráfego. Também esclarece que a norma veio substituir a anterior (de 2006) para atender aos requisitos baseados no desempenho em detrimento dos requisitos relacionados com o desempenho, embora não seja fácil pois estes últimos têm maior número de testes e conhecimento de resultados.

O segundo capítulo apresenta referências normativas relacionadas com as misturas betuminosas mencionadas, mais concretamente com a normalização de ensaios prescritos às mesmas.

O terceiro capítulo expõe um conjunto de “termos e definições, símbolos e abreviaturas” usadas ao longo do documento em causa.

O quarto e quinto capítulos são mais específicos, visando definir claramente requisitos para os materiais constituintes e para a mistura, respetivamente. Estes capítulos merecem especial atenção, razão pela qual são alvo de análise detalhada a seguir.

O sexto capítulo, de Análise da Conformidade, vem no sentido de avaliar e verificar a constância do desempenho e, por isso, vem escrito que a conformidade do Stone Mastic Asphalt deve ser demonstrada por determinação do tipo de produto de acordo com a EN 13108-20 (CEN, 2016b) e pelo controlo de produção de fábrica pelo produtor, incluindo a avaliação dos produtos segundo a norma 13108-21 (CEN, 2016c). É o produtor quem deve ser responsável pelo controlo e ter os meios necessários para o fazer, de maneira a poder assumir a responsabilidade pela conformidade do produto em relação aos requisitos estabelecidos.

O sétimo e último capítulo da norma refere-se à identificação/nomenclatura destas misturas. Nesse sentido está previsto que a guia de remessa contenha, pelo menos, as seguintes informações: produtor e

central de fabrico; código de identificação da mistura; designar a maneira de obter todos os detalhes que comprovam a conformidade com esta norma europeia; designação da mistura.

Na designação da mistura têm de constar quatro elementos:

Exemplo:

SMA	D	SURF/BIN/REG	LIGANTE
-----	---	--------------	---------

Em que,

- **SMA** – Stone Mastic Asphalt
- **D** – Dimensão superior do peneiro (em mm) do agregado utilizado na mistura
- **Surf/bin/reg** – Aplicação da mistura
 - surf – relativo à camada de superfície/desgaste; vem do termo inglês “surface course”;
 - bin – relativo à camada de ligação; vem do termo inglês “binder course”;
 - reg – relativo à camada de regularização; vem do termo em inglês “regulating course”.
- **Ligante** – Designação do ligante utilizado
 - **Betume de pavimentação tradicional** – identificado pela penetração (.../...) (p.e.: Betume 50/70);
 - **Betume modificado** – identificado pelo agente modificador + Classe de penetração + Temperatura mínima de amolecimento (p.e.: Betume PMB 45/80-75).

4.1.1. REQUISITOS PARA OS MATERIAIS CONSTITUINTES

Genericamente, os materiais constituintes da mistura utilizados têm de ser adequados e todas as propriedades que se mostrem relevantes devem ser disponibilizadas aos utilizadores. A adequação dos materiais (ligante, agregados e fibras) é atribuída a partir da conformidade com um ou mais dos itens seguintes: Normas Europeias; Avaliação Técnica Europeia; e/ou especificações para materiais que se baseiam num histórico satisfatório do uso dos mesmos em pavimentos.

4.1.1.1. Ligante

Está previsto poder-se utilizar como ligantes os betumes para pavimentação, os betumes modificados com polímeros, ou ainda qualquer combinação de um destes com asfalto natural, respeitando as respetivas normas de cada um deles.

Dependendo das condições de uso, da gama de penetração do betume, do tipo e da gama de penetração do betume modificado com polímeros e da quantidade e categoria do asfalto natural podem ser definidas em documentos de especificação da aplicação do produto. Por exemplo, no caso do betume de pavimentação, a penetração a 25°C deve estar compreendida entre 30/45 e 330/430.

A norma prevê também situações de modificação do ligante com aditivos que baixam temperatura de produção dos SMA, (frequentemente utilizados quando se quer aplicar SMA em período noturno), obrigando a fornecer provas que mostrem a influência do aditivo no desempenho da mistura para que os mesmos possam ser empregues. Estas provas devem estar baseadas em pesquisas ou evidências de desempenho satisfatório.

Existe a possibilidade de incorporação de misturas betuminosas recuperadas nas novas misturas para aplicação em camadas de desgaste, regularização e ligação.

Em camada de desgaste, quando se utiliza mais de 10 % (em massa da mistura) de misturas recuperadas e em camadas de regularização e/ou ligação quando se utiliza mais de 20% (em massa da mistura) também de misturas recuperadas, cujo ligante usado tenha sido unicamente o betume de pavimentação; e quando o ligante adicionado na mistura (final) é um betume de pavimentação de classe de penetração conhecida; então a penetração e/ou ponto de amolecimento do betume da mistura (final), devem satisfazer os requisitos para a gama especificada. O cálculo destas duas grandezas deve ser feito com base no anexo A e atender aos requisitos normativos da classe de betume selecionada.

Segundo o anexo A, o cálculo da penetração do conjunto dos ligantes contidos na mistura deve ser efetuado da forma seguinte:

$$(a + b) \log pen, mix = a * \log pen1 + b * \log pen2 \quad (4.1.)$$

onde,

- pen, mix – é a penetração calculada do ligante da mistura que contém misturas recicladas;
- $pen1$ – é a penetração do ligante recuperado a partir da mistura reciclada;
- $pen2$ – é a penetração do ligante adicionado;
- “a” e “b” – são as proporções de ligante recuperado a partir da mistura reciclada (a) e do ligante adicionado (b); logo, $a + b = 1$.

Ainda de acordo com o anexo A, o ponto de amolecimento do conjunto dos ligante que a mistura contém, calcula-se da forma seguinte:

$$TR\&B_{mix} = a * TR\&B1 + b * TR\&B2 \quad (4.2.)$$

onde,

- $TR\&B_{mix}$ – é o ponto de amolecimento calculado do ligante da mistura que contém misturas recicladas;
- $TR\&B1$ – é o ponto de amolecimento do ligante recuperado a partir da mistura reciclada;
- $TR\&B2$ – é o ponto de amolecimento do ligante adicionado;
- “a” e “b” – idem.

Em algumas situações, o betume das misturas recuperadas pode estar tão endurecido que se deve escolher um betume muito macio para a mistura (final), de modo a preencher os requisitos normativos.

No documento em análise é feita menção a um caso particular: quando se usa material recuperado de misturas que continham betumes modificados e/ou aditivos, ou a própria mistura (final) contenha betume modificado e/ou aditivos, então o material recuperado a incorporar nas novas misturas é limitado a 10 % (da massa da mistura) em camadas de superfície, ou a 20 % (da massa da mistura) em camadas de base, regularização ou ligação.

4.1.1.2. Agregado

Os agregados usados em misturas betuminosas, independentemente de serem finos, grossos ou de granulometria extensa, devem respeitar a EN 13043 (CEN, 2013a), de acordo com a utilização prevista.

Aos agregados pode-se adicionar fíler, misturas betuminosas recuperadas (tal como outrora mencionado) e aditivos.

O fíler, tal como os agregados, rege-se pela EN 13043, de acordo com a utilização prevista, podendo usar-se fíler de pedra de calcário, de cal hidratada e de cimento.

As misturas recuperadas devem ter propriedades de acordo com a EN 13108-8 (CEN, 2016a), e a sua utilização, a quantidade usada e o grupo da mistura de onde se obtêm as misturas betuminosas recuperadas, devem estar em conformidade com as especificações de aplicação do produto. Uma delas é a máxima dimensão do peneiro do agregado das misturas recuperadas (D) ter por obrigação ser inferior à maior abertura D do peneiro da mistura (final).

Quanto aos aditivos, segundo o que a norma menciona, a sua natureza e propriedades devem ser declaradas e estarem conforme certas especificações definidas.

4.1.2. REQUISITOS PARA A MISTURA

4.1.2.1. Gerais, composição, granulometria, teor de ligante e aditivos

A mistura betuminosa é o resultado da acoplagem dos agregados, fíler e aditivos ao ligante, bem como os vazios que se criam entre estes materiais.

A sua formulação deve ser declarada em relatório de Ensaio Tipo, de acordo com a EN 13108-20, incluindo:

- Percentagem de passados alvo em peneiros específicos;
- Percentagem de ligante alvo e, quando relevante, a percentagem de ligante a partir de misturas recuperadas e/ou a partir de asfalto natural;
- Percentagem de aditivo(s);

A própria composição da mistura que se pretende obter deve estar em conformidade com os requisitos apropriados, em concordância com esta norma europeia.

Quanto à composição, a norma estabelece que a granulometria deve vir expressa em percentagens da massa total da mistura de agregados. Já as quantidades de ligante e de aditivos devem vir expressas em percentagens da massa total da mistura betuminosa.

Essas mesmas percentagens têm regras de arredondamento para serem expressas na composição. À exceção do peneiro de 0,063 mm, a quantidade do material que passa em cada peneiro deve vir expressa em percentagem aproximada a 1 % (ou seja, à unidade). Já a quantidade de ligante, de quaisquer aditivos e de agregados passados no peneiro de 0,063 mm, devem vir expressas em percentagem aproximada a 0,1 %, porque a verdade é que são adicionados em menor quantidade e devem refletir maior precisão. Os aditivos podem ser exceção à regra e virem com percentagem aproximada a 0,01 % onde tal se justificar.

Relativamente à granulometria, os requisitos gerais para a sua composição, em função da mistura pretendida, são fornecidos em duas tabelas da norma, tabelas essas que estão transcritas para os quadros 4.1 e 4.2, apresentados a seguir.

Nesses quadros estão definidos valores ou intervalos de valores das percentagens de passados nos peneiros 1,4D, D, 2 mm e 0,063 mm, peneiros estes que servem para “controlar” a granulometria dos agregados.

No entanto, não são os únicos peneiros a serem utilizados na análise granulométrica. Os peneiros a utilizar devem ser ou a junção dos da série base com a série 1 ou a série base mais a série 2, não sendo permitida a combinação dos peneiros da série 1 com os da série 2.

Caso se utilize a série base + série 1, a dimensão máxima do agregado D e as dos peneiros entre D e 2 mm têm de ser selecionados entre:

- 4,0 mm; 5,6 mm; 8 mm; 12,6 mm; 16 mm; 22,4 mm; e 31,5 mm;

Caso se utilize a série base + série 2, a dimensão máxima do agregado D e as dos peneiros entre D e 2 mm têm de ser selecionadas entre:

- 4 mm; 6,3 mm; 8 mm; 10 mm; 12,5 mm; 14 mm; 16 mm; 20 mm; e 31,5 mm;

Entre 2 mm e 0,063 mm, o peneiro selecionado deve ser um dos seguintes:

- 1 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; e 0,125 mm;

Quadro 4.1 – Requisitos gerais de classificação da composição _ Peneiros da série base + série 1

D	4	5 (5,6)	8	11 (11,2)	16	22 (22,4)
PENEIRO (mm)	PASSADOS (%)					
1,4D^a	100	100	100	100	100	100
D	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100
2	20 a 45	15 a 40	15 a 40	15 a 35	15 a 30	15 a 30
0,063	5 a 14	5 a 14	5 a 14	5 a 13	5 a 12	5 a 12
^a Deve ser adotado o peneiro superior mais próximo ao calculado, quando este não é um número exato no ISO 565-series / R20						

Quadro 4.2 – Requisitos gerais de classificação da composição _ Peneiros da série base + série 2

D	4	6 (6,3)	8	10	12 (12,5)	14	16	20
PENEIRO (mm)	PASSADOS (%)							
1,4D^a	100	100	100	100	100	100	100	100
D	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100
2	20 a 45	15 a 40	15 a 40	15 a 35	15 a 35	15 a 30	15 a 30	15 a 30
0,063	5 a 14	5 a 14	5 a 14	5 a 13	5 a 13	5 a 12	5 a 12	5 a 12
^a Deve ser adotado o peneiro superior mais próximo ao calculado, quando este não é um número exato no ISO 565-series / R20								

O teor de ligante é muito importante numa mistura SMA porque é significativamente elevado quando comparado com o que incorporam as demais misturas. Já foi abordada a questão do ligante poder ter várias origens, mas independentemente da sua proveniência, considera-se que o mesmo é a soma de todo o betume presente da mistura.

Na norma define-se uma percentagem mínima de 4,6 % de ligante, porém normalmente essa percentagem é largamente superada, nunca podendo subir além dos 7,6 %, isto para misturas onde se assume a densidade do agregado igual a 2,65 Mg/m³.

Quando a densidade do agregado é diferente do valor apresentado, então o teor mínimo de ligante deve ser corrigido, multiplicando-o pelo fator $\alpha = 2,65/\rho$, sendo ρ a média ponderada da densidade das partículas dos agregados, também em Mg/m³.

Por vezes, é a experiência que se adquire “*in situ*” que permite ajustar corretamente a percentagem de ligante, como quando se usam certos agregados específicos com características granulométricas particulares.

Tanto o teor de ligante como este tipo de ajuste com base na experiência deve ser definido em documentos ligados à aplicação do produto, como já tem vindo a ser necessário também para outras questões.

4.1.2.2. Propriedades

Posto isto, há um conjunto de dezasseis propriedades que a norma faz referência. Para essas, remete também para a norma específica que contém o ensaio que permite avaliar essa mesma propriedade.

São ainda definidos valores limites das características, em alguns casos somente mínimos, em outros máximos e em outros ambos. Desde que não estejam fora dos limites da norma europeia, cada país é livre de adotar os seus próprios limites e anexá-los à EN 13108-5, num documento que os defina.

Portugal ainda não tem muita experiência no uso destas misturas betuminosas, e também não tem nenhum documento português que defina valores para cada parâmetro seguidamente apresentado, sendo ainda necessário trabalhar nesse sentido, para se conseguir elaborar um Anexo Nacional, semelhante ao que existe para a norma 13108-1.

Na avaliação de cada parâmetro, quando se constroem provetes de ensaio, todos eles devem ser construídos segundo a norma 13108-20, para que a norma em análise possa ser aplicada.

Por análise das propriedades, nota-se a existência das duas metodologias de formulação alternativas, que vêm combinadas na presente norma.

4.1.2.2.1. Porosidade

Embora possa não parecer, os vazios de uma mistura betuminosa são uma parte importante da mesma. Abaixo de uma percentagem de vazios, a mistura deixa de ter estabilidade e as deformações propagam-se exponencialmente.

A percentagem de vazios de um SMA deve ser determinada em consonância com a EN 12697-8 (CEN, 2003a), e o seu valor mínimo pode estar entre 1,5 e 14,0 %, o que corresponde às categorias $V_{\min 1,5}$ e $V_{\min 14,0}$ normalizadas. Por sua vez, a percentagem máxima de vazios na mistura pode estar entre 2,0 e 16,0 %, com as categorias $V_{\max 2,0}$ e $V_{\max 16,0}$, respetivamente.

4.1.2.2.2. Vazios preenchidos com betume

Quando o ligante é adicionado, uma parte vai revestir o agregado para permitir a coesão entre partículas e outra parte acabar por preencher alguns dos vazios existentes.

As percentagens mínimas e máximas de vazios preenchidos com betume devem ser selecionadas para categorias que a norma define em quadros.

No mínimo, 56 a 86 % dos vazios têm de estar preenchidos com betume. De acordo com a percentagem de vazios selecionada definem-se categorias que vão desde $VFB_{\min 56}$ a $VFB_{\min 86}$.

Embora existam valores mínimos para os vazios preenchidos com betume, também se estabelecem valores máximos à mesma propriedade. Quer isto dizer que têm de existir poros na mistura, devido às razões já descritas.

O máximo de VFB pode ser selecionado entre 62 e 92 %. Caso VFB seja um destes limites assume, respetivamente, as categorias $VFB_{\max 62}$ e $VFB_{\max 92}$.

Trata-se de uma propriedade a determinar segundo a EN 12697-8, tal como a anterior.

4.1.2.2.3. Vazios na mistura de agregados

A percentagem mínima de vazios na mistura de agregados deve estar compreendida entre 16 e 23 %, o que é correspondente às categorias $VMA_{\min 16}$ e $VMA_{\min 23}$, respetivamente.

Esta propriedade deve ser determinada de acordo com a EN 12697-8, tal como as duas propriedades descritas anteriormente.

4.1.2.2.4. Escorrimento do ligante

Tal como foi outrora apontado, um SMA caracteriza-se por possuir uma elevada percentagem de betume, o que resulta numa maior tendência para o escorrimento.

Para avaliar o escorrimento deve ser realizado um dos dois ensaios estabelecidos pela EN 12697-18. Dado que o ensaio caracteriza uma propriedade muito importante neste tipo de misturas, é descrito com rigor no próximo capítulo.

Segundo a norma, os limites para a percentagem máxima de material escorrido podem ser estabelecidos entre 0,3 e 1,0 %, o que leva a estabelecer as categorias $BD_{\max 0,3}$ e $BD_{\max 1,0}$.

4.1.2.2.5. Sensibilidade à água

Uma mistura betuminosa pode ser mais ou menos sensível à ação da água. A EN 13108-5 remete para a EN 12697-12 (CEN, 2008), como a norma que define a avaliação desta propriedade e, segundo a mesma, a sensibilidade à água pode ser expressa como o resultado do ensaio “Indirect Tensile Strength” ou do ensaio “Compression Strength”.

O Indirect Tensile Strength é o ensaio mais comumente utilizado. Está normalizado pela EN 12697-23 (CEN, 2017b) e, sinteticamente, consiste em construir dois grupos de provetes em que uns experimentam condições mais severas da ação da água e outros menos. Posteriormente, todos os provetes têm de ser submetidos ao ensaio de tração indireta (comumente designado de ensaio de

compressão diametral), por aplicação de uma carga diametral, segundo o eixo vertical, a uma velocidade constante até à rotura. Quando se atinge esse ponto, regista-se a carga para cada provete.

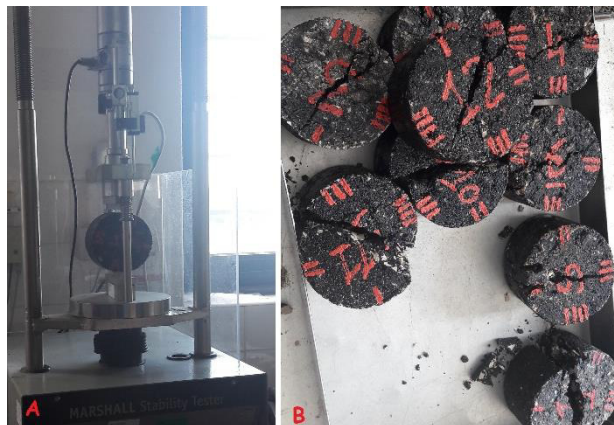


Figura 4. 1 – A) Equipamento do Indirect Tensile Test; B) Provete ensaiados; [Fonte: Própria]

No final, faz-se a média das resistências registadas por grupos de provetes e calcula-se a resistência conservada em tração indireta, como o rácio entre as resistências médias (ITSR).

Segundo a norma, a sensibilidade à água mínima deve ser seleccionada entre 60 e 90 % de ITSR, o que corresponde às categorias $ITSR_{min60}$ e $ITSR_{min90}$.

Caso se optasse pelo “Compression Strenght” não haveria alterações ao nível dos mínimos a seleccionar, resultando nas categorias i/C_{min60} e i/C_{min90} .

4.1.2.2.6. Resistência à abrasão provocada por pneus pitonados

A propriedade em causa foi de extrema importância na época da génese do SMA. Recorde-se que é uma mistura que surge precisamente para garantir a resistência a este tipo de solicitação.

É normal que o ensaio usado para avaliar esta propriedade siga o método A (ou método Prall) que consta na EN 12697-16 (CEN, 2016e). Este método de ensaio consiste em submeter à ação abrasiva de 40 esferas de aço (que simulam o efeito dos pneus pitonados), num período de 15 minutos, e a uma temperatura de 5°C, uma amostra cilíndrica com 30 mm de comprimento e 100 mm de diâmetro, e registar a perda de volume como o valor de abração.

Segundo a EN 13108-5, a perda volumétrica que traduz a resistência à abrasão provocada por pneus pitonados deve ser seleccionada entre 20 e 50 ml, ou seja, entre as categorias Abr_{Amax20} e Abr_{Amax50} .

4.1.2.2.7. Resistência à deformação permanente

A resistência à deformação permanente pode ser avaliada por dois métodos distintos: pelo ensaio de pista Wheel Tracking ou pelo ensaio de compressão triaxial.

O Wheel Tracking deve ser avaliado de acordo com a EN 12697-22 (CEN, 2003b) e tanto pode ser feito com placas serradas do pavimento como com placas moldadas. Consiste em fazer passar repetidamente

uma roda (10^3 vezes), a uma temperatura de ensaio constante, e medir a profundidade da rodeira resultante deste procedimento.

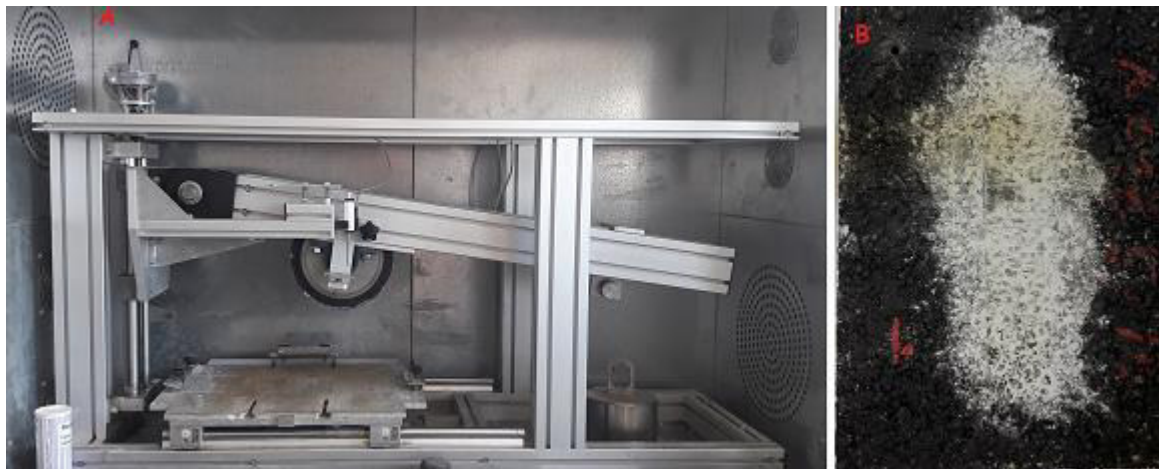


Figura 4. 2 – A) Equipamento do ensaio Whell-Tracking; B) Placa 40x30 cm ensaiada; [Fonte: Própria]

O equipamento utilizado no ensaio pode ser grande ou pequeno, conforme as cargas por eixo de projeto sejam ≥ 13 Mg ou < 13 Mg, respetivamente. A propriedade pode avaliar-se com recurso a uma das quatro grandezas distintas.

Se o ensaio for feito com equipamento grande, a resistência à deformação permanente avalia-se pela máxima percentagem da profundidade da rodeira, e deve ser selecionada para valores entre 5,0 e 20,0 %, a que correspondem as categorias $P_{\max 5,0}$ e $P_{\max 20,0}$, respetivamente;

Se o ensaio for feito com equipamento pequeno, a resistência à deformação permanente pode ser avaliada de três formas diferentes:

- Pela máxima taxa de deformação em ensaio de pista, devendo ser selecionada para valores entre 0,03 e 1,00 mm/ 10^3 ciclos de carga, a que correspondem as categorias $WTS_{AIR\max 0,03}$ e $WTS_{AIR\max 1,00}$;
- Pela máxima profundidade da rodeira (em mm), e deve ser selecionada para valores entre 1,0 e 8,0 mm, a que correspondem as categorias $RD_{AIR\max 1,0}$ e $RD_{AIR\max 8,0}$;
- Pela máxima percentagem da profundidade da rodeira, e deve ser selecionada para valores entre 1,0 e 19,0 %, a que correspondem as categorias $PRD_{AIR\max 1,0}$ e $PRD_{AIR\max 19,0}$.

Não se devem combinar requisitos normativos associados às duas últimas formas de avaliar a resistência à deformação permanente pelo equipamento pequeno.

Quanto à resistência à deformação permanente, em termos de taxa de fluência pelo ensaio de compressão triaxial, deve ser determinada com recurso à EN 12697-25 (CEN, 2016f) , com carotes retirados do pavimento ou com provetes moldados em laboratório.

O valor máximo da propriedade avaliada desta forma deve ser selecionado entre 0,2 e 16,0 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{n}$, isto é, entre as categorias $f_{c\max 0,2}$ e $f_{c\max 16,0}$.

4.1.2.2.8. Rigidez

A rigidez ou módulo de rigidez é uma grandeza muito importante para a caracterização mecânica das misturas betuminosas. Embora consista na relação entre a tensão e a deformação, torna-se um conceito um pouco diferente do módulo de elasticidade de um material, visto que as misturas betuminosas têm um comportamento viscoelástico. Enquanto com tempos de aplicação de carga menores (maior frequência) e a menores temperaturas, a rigidez tem um comportamento próximo da de um material elástico, registando-se oposto, não existe linearidade entre a tensão aplicada e a deformação registada (existe um desfasamento entre o tensor das tensões e das deformações), e o módulo de rigidez tem uma componente elástica e outra viscosa.

Segundo a EN 13108-5, deve seguir-se a EN 12697-26 (CEN, 2012c) para determinar E_m , escolhendo um dos métodos que esta define (p.e., Indirect Tensile Test).

Podem ser seleccionadas categorias para os limites mínimos e máximos da rigidez. Quanto aos limites mínimos, devem estar entre 1500 e 21000 MPa, cujas categorias são $S_{\min 1500}$ e $S_{\min 21000}$, respetivamente. Quanto aos limites máximos, devem estar entre 7000 e 30000 MPa, de onde surgem as categorias $S_{\max 7000}$ e $S_{\max 30000}$, respetivamente.

4.1.2.2.9. Resistência à fadiga

A resistência à fadiga traduz a capacidade da mistura betuminosa poder suportar flexões repetidas sem que se formem rachaduras no pavimento (Nejad, Aflaki e Mohammadi, 2010).

A maioria das misturas SMA produzidas são de aplicação em camadas de desgaste e nestas, só se necessita ter em consideração a resistência à fadiga quando a deformabilidade do pavimento é tão grande que mesmo esta camada funcione à tração por flexão. Quando se produzem misturas deste tipo para camadas de base, a resistência à fadiga é uma propriedade fulcral, pois existem trações por flexão na base das camadas betuminosas, ainda que a deformabilidade do pavimento seja baixa.

A resistência à fadiga nas misturas SMA (principalmente em camadas de base) são a garantia da durabilidade pretendida para as mesmas.

Esta propriedade deve ser determinada de acordo com a EN 12697-24 (CEN, 2012b). Segundo a EN 13108-5 podem ser seleccionados valores mínimos para esta característica entre 50 e 310 μ , o que dá origem às categorias $\epsilon_{6-\min 50}$ e $\epsilon_{6-\min 310}$.

4.1.2.2.10. Propriedades a baixas temperaturas

É importante conhecer o comportamento da mistura a baixas temperaturas em zonas onde tais condições se registem durante a aplicação.

O ensaio a efetuar é o “Thermal Stress Restrained Specimen Test” (sem aplicabilidade a Portugal), e as categorias devem ser seleccionadas entre $TSRST_{\max -15}$ e $TSRST_{\max -30}$.

4.1.2.2.11. “Fracture Toughness”

A propriedade “fracture toughness” de uma mistura, pode ser avaliada em provetes construídos em laboratório ou em carotes retirados do pavimento.

A norma estudada circunscreve a avaliação da propagação de fendas no ensaio de flexão semicircular, normalizado pela EN 12697-44 (CEN, 2010), para quantificar esta propriedade.

O valor mínimo da característica deve ser selecionado entre 10 e 55 N/mm^{1,5}, o que dá origem às categorias $K_{Icmin10}$ e $K_{Icmin55}$, apresentadas em tabela da norma.

Devido ao nome desta propriedade não vir traduzido em normas portuguesas, permanece com a terminologia inglesa para evitar erros de tradução literal.

4.1.2.2.12. Atrito após polimento

À medida que o tempo passa, o pavimento vai-se desgastando e, por conseguinte, o atrito na superfície de contacto pneu/pavimento é cada vez menor.

O valor mínimo do atrito após polimento deve ser avaliado em conformidade com a EN 12697-49 (CEN, 2014b) e deve ser definido entre 0,30 e 0,50, ou seja, entre as categorias FAP_{min30} a FAP_{min50} .

4.1.2.2.13. Revestimento e homogeneidade

Quando o material é descarregado a partir do misturador deve ter um aspeto homogéneo e o agregado deve estar completamente revestido pelo ligante. Exige-se ainda que não exista qualquer evidência de aglomeração de agregados finos na mistura.

4.1.2.2.14. Reação ao fogo

Quando a mistura está sujeita a disposições regulamentares sobre esta propriedade, o produtor tem de declarar uma euroclasse de reação ao fogo e o betão betuminoso deve ser testado e classificado segundo a norma europeia 13501-1 (CEN, 2007).

4.1.2.2.15. Resistência aos combustíveis para aplicação em aeródromos

A resistência aos combustíveis para aplicação em aeródromos deve ser avaliada segundo a norma europeia 12697-43 (CEN, 2014a), através de um ensaio que consiste em colocar a mistura imersa em combustível e determinar perda de massa, em percentagem, provocada por essa imersão.

A perda de massa máxima verificada deve ser definida para valores compreendidos entre 6,0 e 15,0 %, aos quais correspondem as categorias $Ci_{max6,0}$ e $Ci_{max15,0}$.

4.1.2.2.16. Resistência aos fluídos descongelantes para aplicação em aeródromos

Outra propriedade a verificar em aeródromos é a resistência aos fluídos descongelantes. Esta deve ser avaliada em conformidade com a EN 12697-41 (CEN, 2013b).

Deve determinar-se a resistência conservada, que segundo a EN 13108-5 deve ter um valor mínimo selecionado dentro do intervalo de 55,0 e 100 %. As categorias estão espaçadas de 15 em 15 %, desde $\beta_{\min 55,0}$ a $\beta_{\min 100}$.

NOTA: Podem não se selecionar qualquer uma destas propriedades e caso assim se entenda, a categoria para essa propriedade passará a ter a seguinte nomenclatura: $XX_{\min/\max NR}$ (exemplo: $FAP_{\min NR}$), em que o NR significa “Não Requerido”.

4.1.2.3. Temperatura da mistura

A temperatura da mistura é um parâmetro que tem influência em propriedades da mistura como, por exemplo, a sua trabalhabilidade e módulo de rigidez.

Assim, a norma 13108-5 estabelece temperaturas limite máximas e mínimas para as misturas SMA.

Os requisitos de temperatura máxima aplicam-se em qualquer local do interior da central de produção e devem estar declarados. Quando se utiliza um betume de pavimentação, a temperatura máxima da mistura em função da classe de penetração do betume consta no quadro seguinte:

Quadro 4.3 – Temperatura máxima da mistura em função da classe de penetração do betume (CEN, 2016d)

BETUME DE PAVIMENTAÇÃO	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)
30/45	195
35/50, 40/60	190
50/70, 70/100	180
100/150	170
160/220	165
250/330	160
330/430	155

Quando são utilizados aditivos ou betumes modificados, melhor dizendo, quando não é utilizado somente betume de pavimentação, então os limites de temperatura máxima do quadro anterior não se aplicam, e os valores aplicáveis de temperatura máxima devem ser documentados e declarados.

A temperatura mínima da mistura aplica-se ao momento da entrega e deve ser declarada pelo produtor. Pode ser declarada em documentos relacionados com a aplicação do produto, em função das condições do local e de aplicação.

A medição da temperatura da mistura deve ser efetuada em conformidade com a norma europeia 12697-13 (CEN, 2017c).

4.1.2.4. Substâncias perigosas

Quando e onde for requerido, os produtos que a presente norma menciona devem cumprir com regulamentos relevantes sobre substâncias perigosas que lhes digam respeito, em vigor no local onde se pretendem usar.

Na ausência de ensaios internacionais ou europeus, os produtores devem verificar se há desprendimento de substâncias perigosas do pavimento, declarando-o caso exista.

4.1.2.5. Requisitos conflitantes: Sobre especificação

Por vezes as misturas betuminosas do tipo Stone Mastic Asphalt podem estar cobertas por conjuntos de requisitos incompatíveis. Por isso, devem selecionar-se os requisitos de modo a que esta situação não ocorra, ou seja, evitando a sobre especificação da mistura.

Posto isto, não se devem combinar os seguintes requisitos:

- Requisitos de vazios preenchidos com betume e vazios na mistura de agregado com requisitos para a resistência à deformação permanente;
- Requisitos para a resistência à deformação permanente através da profundidade da rodeira ou da taxa de deformação no ensaio Wheel Tracking com requisitos para a resistência à deformação permanente no ensaio de compressão triaxial;
- Requisitos para a fadiga, e/ou rigidez, e/ou resistência à deformação permanente no ensaio de compressão triaxial com requisitos para ligante com percentagem acima de 4,6 %, e/ou com requisitos de classificação adicionais, e/ou com requisitos de rigidez do fíler e de angulosidade dos agregados finos;
- Requisitos para a resistência ao polimento de agregados grossos de acordo com a EN 13043 com requisitos do atrito após polimento da mistura.

4.2. FORMULAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS SMA

A formulação de uma mistura betuminosa pode ser feita através de métodos baseados numa definição por especificação, métodos analíticos, métodos racionais, métodos empíricos e métodos volumétricos.

Fazem parte dos métodos empíricos: o “Duriez”; o Hubbard-Field; o Hveem; e o Marshall (o mais utilizado de todos). O método volumétrico mais vulgarmente utilizado é a formulação SUPERPAVE (Branco, Pereira e Santos, 2006).

No SUPERPAVE, a percentagem ótima de betume é definida com base nas propriedades volumétricas de provetes obtidos por compactação giratória. Este é um método inovador, criado em 1990 nos Estados Unidos da América, substituindo a formulação tradicional baseada no ensaio Marshall, e desde então é utilizado como a metodologia de formulação dos EUA.

Embora cada vez mais se queira implementar o SUPERPAVE na formulação das misturas da maioria dos países, a verdade é que o país de referência para o Stone Mastic Asphalt (Alemanha) ainda faz a formulação pelo ensaio Marshall. Aliás, segundo Gardete, Santos e Capitão (2011), os dois métodos permitem obter propriedades volumétricas semelhantes e dentro do espetável, conclusão que chegaram depois de compararem os dois métodos na formulação de uma mistura SMA.

Além de todas as motivações anteriores, em Portugal, a grande maioria dos laboratórios não dispõem nem dos equipamentos, nem de técnicos com formação na metodologia SUPERPAVE, razão pela qual se recomenda continuar a usar no país, a definição da percentagem ótima de betume à custa da porosidade, baridade e força de rotura em provetes Marshall.

4.2.1. PROPRIEDADES DE SMA EM PORTUGAL

Na formulação de uma mistura betuminosa deve ter-se em atenção o cumprimento de um conjunto de propriedades definidas para a mesma.

Anteriormente, na parte inicial deste capítulo, a EN 13108-5 foi pormenorizadamente analisada e apresentados valores extremos (máximos, mínimos ou ambos) das diferentes propriedades a seleccionar por cada país, para a mistura SMA. Esses valores têm gamas bastante alargadas, que podem ser apertadas pelo país que as selecciona, ou seja, podem definir-se limites diferentes desde que respeitem estes.

A possibilidade de cada país poder adaptar as propriedades é perfeitamente justificável à luz das suas próprias características. Cada local reúne um conjunto de aspetos diferenciados, como, por exemplo, a temperatura, pluviosidade ou as velocidades máximas de circulação permitidas, e fazer exigências iguais onde as condições registadas sejam completamente distintas não teria qualquer significado.

Em Portugal não existe um documento para a EN 13108-5 (das misturas SMA), como está o Anexo Nacional para a NP EN 13108-1 (das misturas tradicionais), com a tal adaptação do valor das propriedades ao país, uma vez que a experiência com SMA ainda é pequena. Talvez mais tarde surja esse documento, mas por enquanto, nas obras com aplicação de tal mistura, as propriedades vêm definidas em “Notas Técnicas Especiais”, anexas aos CE.

A Infraestruturas de Portugal já elaborou uma panóplia dessas notas para as obras já concluídas e das quais é D.O. (expostas em 3.7.). Do mesmo modo, para a mistura SMA11 aplicada na obra acompanhada no âmbito desta dissertação (EN4, entre Montijo e Pegões), foi criada uma Nota Técnica onde se definiram as características do agregado, ligante, aditivos e da própria mistura.

Esse documento é sumariamente apresentado em seguida, com dois objetivos claros: dar uma noção das propriedades seleccionadas para esta mistura SMA e respetivos valores, como título ilustrativo; saber concretamente as propriedades da mistura produzida numa obra, detalhadamente apresentada em capítulo posterior.

A título de curiosidade, a IP considera o betão betuminoso rugoso como a mistura aparentemente mais parecida e utilizada pelo país e, por isso, as propriedades do SMA11 foram estabelecidas com base na mesma. Por isso, é normal que as propriedades sofram alterações à medida que são estudadas.

Deste ponto em diante, a dissertação é toda voltada para a mistura SMA11 de aplicação em camada de desgaste.

4.2.1.1. Fuso granulométrico da mistura de agregados do SMA11

Apesar do fuso granulométrico da mistura de agregados do SMA11 apresentado no quadro 4.4 não ser oficial ou vinculativo, será o respeitado na obra da EN4.

Pelo cuidado com que foi construído, não sofreu quaisquer alterações desde que foi estabelecido. As proporções definidas na Nota Técnica anexa ao CE de pavimentações da IP respeitam as definidas nos peneiros de controlo para a série base + série 2 e que constam no quadro 4.2, transcrito da norma em 4.1.2.1., tal como se pode verificar no quadro seguinte.

Quadro 4.4 – Proporções (em %) do agregado em cada peneiro, definidas pela IP

ABERTURA DAS MALHAS DOS PENEIROS (SÉRIE BASE + SÉRIE 2) [MM]	FUSO GRANULOMÉTRICO NOS PENEIROS DE CONTROLO DA EN 13108-5 [%]	FUSO GRANULOMÉTRICO DO CE DA INFRAESTRUTURAS DE PORTUGAL [%]
16 (1,4D)	100	100
14	-	100
12,5 (D)	90 a 100	95 a 100
10	-	80 a 100
8	-	60 a 80
6,3	-	43 a 60
4	-	22 a 33
2	15 a 35	20 a 30
0,5	-	12 a 20
0,063	5 a 13	6 a 10

Relativamente ao quadro 4.4 e à nomenclatura do SMA em questão, não quero deixar de tecer um comentário, pois é, do meu ponto de vista, uma incoerência.

Foram apresentados em 4.1.2.1. dois quadros (um para a série base combinada com a série 1, e o outro para a série base combinada com a série 2), onde se estabeleceram limites de passados em alguns peneiros de controlo.

Quando se utiliza a combinação dos peneiros da série base com os peneiros da série 2 (caso de Portugal), não existe nenhum peneiro com malha de 11 mm, pelo que não faz sentido dizer que a máxima dimensão do peneiro é 11.

Assim sendo, na realidade, a dimensão máxima do agregado é 12,5 mm e o SMA devia ser chamado de SMA12,5 em detrimento de SMA11. O “11” vem da designação alemã, país de origem da mistura, mas lá utiliza-se a série base + série 1.

Resumidamente, se a norma admite utilizar a combinação de peneiros que Portugal adotou, não há razão para a mistura ter uma nomenclatura incongruente com as dimensões do agregado.

NOTA: Devido ao exposto, SMA11, SMA12 e SMA12,5 correspondem a misturas com a mesma dimensão máxima agregado.

Também o facto da granulometria do SMA dever ser descontínua fica um pouco aquém das expectativas. A verdade é que as proporções de agregado em cada peneiro definidas pela IP cumprem a EN 13108-5, mas definem uma curva com continuidade, o que contraria as definições da mistura.

4.2.1.2. Propriedades dos agregados

O SMA11 tem de obedecer aos parâmetros do quadro seguinte, no que respeita às propriedades dos agregados que compõe a mistura. São estes os parâmetros controlados para perceber se o agregado pode constituir a mistura em causa.

Quadro 4.5 – Propriedades dos agregados que compõem a mistura SMA11, definidas pela IP

PROPRIEDADE	REFERÊNCIA NORMATIVA	LIMITES
Granulometria dos agregados grossos	EN 933-1 EN 933-2	G _{C85/20} ; G _{25/15} ; ou G _{20/15} ;
Granulometria dos agregados finos		G _{FF85} ; G _{TC10} ;
Conteúdo de finos dos agregados grossos		f _{0,5}
Forma do agregado grosso – Índice de Achatamento	EN 933-3	FI ₁₅
Índice de alongamento	BS 812.2	20
Percentagem de partículas esmagadas ou partidas	EN 933-5	C _{100/0}
Equivalente de areia (SE) da fração 0/2 mm	EN 933-8	SE ₅₅
Equivalente de areia (SE) da mistura de agregados		
Valor do azul de metileno da fração 0/2 mm	EN 933-9	MB ₂
Valor do azul de metileno da fração 0/0,125 mm		MB _{F10}
Resistência à fragmentação: Coeficiente de Los Angeles	EN 1097-2	LA ₂₀ LA ₂₅ (granitos)
Resistência à fragmentação: Coeficiente de Los Angeles para a mistura de agregados		
Resistência ao desgaste por atrito: Coeficiente de Micro-Deval	EN 1097-1	M _{DE15}
Resistência ao desgaste por atrito: Coeficiente de Micro-Deval para a mistura de agregados		
Massa volumica das partículas	EN 1097-6	Valor a declarar
Absorção de água		≤ 1 %
Sonnenbrand dos basaltos	EN 1097-2 (Secção 5) EN 1367-3	Perda de massa após ebulição ≤ 1 e SB _{LA} ≤ 8
Resistência ao choque térmico	EN 1367-5	Valor a declarar
Afinidade agregado/betume – Método da garrafa rotativa	EN 12697-11 (Parte A)	Valor a declarar
Resistência ao gelo e ao degelo [WA – valor da absorção de água como ensaio primário; MS – valor do sulfato de magnésio como ensaio específico]	EN 1097-6 EN 1367-2	WA > 2 => MS ₂₅
Resistência ao polimento	EN 1097-8	PSV ≥ 54

Todas as propriedades podem ser avaliadas com auxílio dos respectivos ensaios, preconizados por cada referência normativa do quadro e em algumas deve ter-se em atenção determinadas nuances.

Em relação ao valor do azul de metileno nos agregados finos, segundo a EN 933-9 (CEN, 2009b) nem sempre precisa de ser controlado, uma vez que quando o teor de finos é inferior a 3 %, deve considerar-se que os finos não são nocivos e não efetuar o ensaio.

Quanto ao ensaio de Los Angeles, para avaliação da resistência à fragmentação, na eventualidade de se optar por frações granulométricas mais finas que 10/14, é possível aceitar LA₃₀ em granitos.

O ensaio de avaliação da absorção de água deve ser feito para as frações granulométricas 0,063/4, 4/31,5 e >31,5 mm, e em cada uma destas deve cumprir o limite estabelecido. Não é viável fazer o ensaio para frações que não estas, pois é uma imposição normativa.

4.2.1.3. Propriedades da mistura betuminosa

O SMA11 tem de obedecer aos parâmetros do quadro seguinte, no que respeita às propriedades da própria mistura. São estes os parâmetros controlados no fabrico da mistura para perceber se está conforme os requisitos.

Quadro 4.6 – Propriedades da mistura betuminosa SMA11, definidas pela IP

PROPRIEDADE		REFERÊNCIA NORMATIVA	LIMITES
Características Marshall	Estabilidade	EN 12697-34	12,5 a 17 kN
	Deformação		2 a 4 mm
	Quociente Marshall		Qmin3
IRC em ensaios de compressão Marshall		MIL - STD	≥ 80 %
% mínima de ligante		EN 12697-1 EN 12697-39	≥ 5,8 %
Porosidade		EN 12697-8	3 a 6 %
VMA			≥ 14 %
Relação ponderal de filer/betume		-	1,3 a 1,5 %
Resistência à deformação permanente (Wheel Tracking)	Taxa de deformação WTSair	EN 12697-22 (Procedimento B)	0,15 mm/10³
	Profundidade da rodeira máxima PRDair		Valor a declarar
Ensaio de pista		NLT 173	≤ 12 µm/min
Módulo de rigidez		EN 12697-26 (Anexo B)	Valor a declarar
Resistência à fadiga		EN 12697-26 (Anexo D)	Valor a declarar
Sensibilidade à água pelo ITSR		EN 12697-12	ITSR ₉₀ (90 %)
Escorrimento de betume		EN 12697-18	0.30 %

Já foi alertado que as propriedades das componentes e da própria mistura betuminosa são suscetíveis a alterações futuras e uma delas pode ser a percentagem mínima de betume. Atendendo ao facto de uma mistura betuminosa tradicional poder ter, com relativa facilidade, uma percentagem ótima de betume de 5,0/5,5 %, então num SMA, cuja definição já aludia à alta percentagem de betume comparativamente às misturas tradicionais, é pouco ter uma proporção de betume de 5,8 %. É isso que vem traduzido nas práticas alemãs que, para o SMA11, exigem uma percentagem mínima de betume superior a 6,6 %.

Só que ir à legislação e exigir uma percentagem mínima de betume superior à atual não chega! Existe uma série de situações a serem pensadas... por exemplo, a porosidade mínima (3 a 6 %) é significativamente diferente da referência alemã (2,5 a 3 %) e pode ter de ser modificada, contudo devem ser elaborados testes; o betume usado pelos alemães não é o mesmo, podendo ser outra razão para a proporção de betume ser superior lá. Em Portugal tem-se usado o betume modificado com polímeros e na Alemanha o betume puro; devido à adição do modificador “polímeros” ao betume e de se usarem fibras para evitar o escorrimento de ligante, pode acontecer uma incompatibilidade de aditivos que faça com que a percentagem de betume não seja tão elevada.

São somente suposições que carecem de validação, não sendo âmbito desta dissertação. Contudo, existe a consciência que tal deve ser feito.

4.2.2. DETERMINAÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA DA MISTURA DE AGREGADOS

Para determinar a curva granulométrica da mistura de agregados é necessário escolher primeiro os agregados que vão fazer parte dessa mistura. No caso do EF do SMA11 para a empreitada da EN4, os granitos selecionados pertenciam à pedreira da Mota-Engil em Montemor-o-Novo e o fíler era proveniente da empresa “Parapedra”. Para cada um desses agregados teve de se fazer uma análise granulométrica e traçar a respetiva curva (análise granulométrica e curvas no anexo A2).

De seguida é imprescindível ter em atenção o fuso granulométrico para a mistura de agregados, neste caso, o estabelecido pela Infraestruturas de Portugal, de modo a respeitá-lo. Na prática aquilo que se faz é traçar os limites que o fuso estabelece num gráfico (linhas a preto do gráfico do EF), e no mesmo gráfico construir a curva da mistura de agregados, com o objetivo de perceber visualmente se o fuso é cumprido e se a curva está o mais centrada possível com o mesmo.

Na curva de agregados seguinte nota-se que há uma parte muito no limite do fuso, o que não devia acontecer dado tratar-se da curva granulométrica da mistura de agregados final. Ainda assim, a grande maioria está centrada.

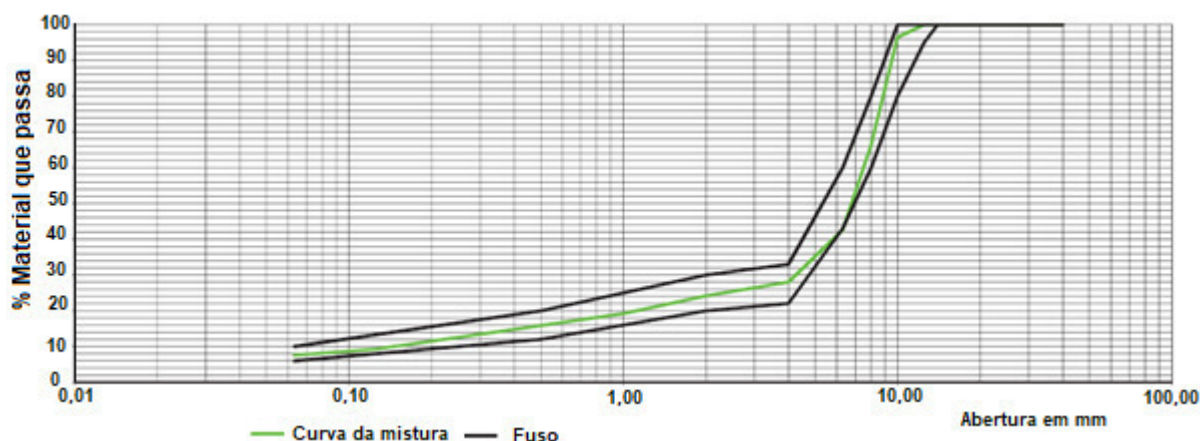


Figura 4. 3 – Curva granulométrica da mistura de agregados e respetivo fuso granulométrico [Fonte: EXCEL]

Para definir esta curva teve de se ir escolhendo proporções de cada um dos inertes, de maneira a atingir os objetivos supra, e não foi, claro está, na primeira tentativa que se chegou à curva apresentada. Todo este processo é iterativo! Contudo, para o agilizar, utilizou-se um programa de cálculo automático (mais precisamente, o EXCEL), que faz os cálculos e apresenta o gráfico rapidamente.

A forma como se converge para uma curva correta depende muito do técnico de laboratório. É óbvio que se o responsável pela formulação tiver bastante experiência lança proporções de cada agregado próximas de uma solução conveniente, e ainda que não consiga fazê-lo na primeira tentativa, fica imediatamente a compreender quais as alterações a efetuar para alcançar o objetivo. Por ser uma sensibilidade que se ganha com a prática, é evidente que um técnico com pouca experiência, embora consiga chegar à curva, demora, em condições normais, mais tempo.

As proporções que permitiram chegar ao gráfico da figura anterior (“percentagens das frações de agregados no estudo de formulação laboratorial”) estão resumidas no quadro síntese 4.7.

A curva granulométrica da mistura de agregados final (representada com cor verde na figura supra), que corresponde, tal como foi mencionado, às proporções de agregados determinadas no EF, tem a sua distribuição de passados em cada peneiro transcrita no quadro 4.8.

Quadro 4.7 – Proporções de agregados determinadas no EF

ORIGEM DO AGREGADO	TIPO DE AGREGADO	DESIGNAÇÃO	%
Pedreira Herdade de Benafessim, Montemor-o-Novo, Mota-Engil, Engenharia e Construção, SA	Granito	Pó 0/6	24,0
Pedreira Herdade de Benafessim, Montemor-o-Novo, Mota-Engil, Engenharia e Construção, SA	Granito	Brita 6/10	70,0
Parapedra, Sociedade Transformadora de Pedras, Lda.	Calcário	Fíler comercial	6,0

Quadro 4.8 – Curva granulométrica do estudo de SMA11 para a EN4

<i>Tipo de agregado</i>	<i>Pó 0/6</i>		<i>Brita 6/10</i>		<i>Fíler Comercial</i>		Curva granulométrica do EF [%]	Fuso da IP [%]
PENEIROS ISO [MM]	%	24 %	%	70 %	%	6%		
16	100	24	100	70	100	6	100	100
14	100	24	100	70	100	6	100	100
12,5	100	24	100	70	100	6	100	95 a 100
10	100	24	95	67	100	6	97	80 a 100
8	100	24	52	36	100	6	66	60 a 80
6,3	100	24	18	13	100	6	43	43 a 60
4	89	21	1	1	100	6	28	22 a 33
2	73	18	1	1	100	6	24	20 a 30
1	55	13	0	0	100	6	19	-
0,5	41	10	0	0	100	6	16	12 a 20
0,125	16	4	0	0	91	5	9	-
0,063	9,4	2	0	0	85	5	7,6	6 a 10

Após a formulação estar concluída, passando para a produção em central, as proporções do quadro 4.7 não são exatamente as proporções de agregados que entram na mistura betuminosa, pois na central é

fundamental adaptá-las de acordo com aos crivos da própria central. Essa fase denomina-se de “Transposição do estudo laboratorial para a central de produção”, e é abordada com maior pormenor no capítulo subsequente, na secção 5.2.2..

4.2.3. DETERMINAÇÃO DA PERCENTAGEM ÓTIMA DE BETUME

4.2.3.1. Preparação de provetes

Após a determinação das proporções de agregados em 4.2.2., fabricam-se misturas betuminosas segundo a EN 12697-35 (CEN, 2016g). Para preparar a mistura, primeiro secam-se os agregados em estufa, até massa constante, e posteriormente envolvem-se com o ligante, a uma temperatura que é função do tipo de betume utilizado (PMB 45/80-65 da Repsol, na mistura SMA11 Surf em análise).

Preparam-se cinco misturas betuminosas com diferentes percentagens de betume, em amassaduras individuais, sendo as mesmas escalonadas de 0,5 %, e adiciona-se em todas elas a quantidade de fibras que se presume serem precisas para contrariar o escorrimento do ligante na mistura. No estudo analisado foram adicionadas 0,4 % de fibras de celulose revestidas a betume.

Seguidamente, determina-se a baridade máxima teórica da mistura de acordo com a EN 12697-5 (CEN, 2009a) para poder calcular a porosidade e outras propriedades volumétricas da mistura compactada. Depois moldam-se no mínimo três provetes para cada percentagem de betume (cilíndricos, com 101,6 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura), embora seja frequente os laboratórios fazerem quatro (como neste EF). O provete de sobra pode ser fulcral numa situação onde os valores de uma propriedade num dos provetes se desenquadra dos restantes, podendo excluí-lo. Caso só se tivessem moldado três, esta técnica não era viável, isto é, tinha de se fazer mais uma vez a mistura para moldar o provete em falta.

Cada provete deve ter uma massa de 1230 gramas. Por isso, definem-se (também em massa) as quantidades de agregado e ligante para fazer um provete de cada mistura. Este procedimento consta no anexo A2, no quadro A2.6.

Após colocação do material no interior do molde, faz-se a compactação através do método de impactos sucessivos, de acordo com a EN 12697-30 (CEN, 2012d), com recurso a um martelo normalizado, podendo efetuar 35, 50 ou 75 pancadas.



Figura 4. 4 – Compactadores Marshall: A) do Laboratório Central Mota Engil; B) do Laboratório do estaleiro da obra no Passil [Fonte: Própria]

O número de pancadas utilizado na mistura SMA tem de ser definido, dadas as 3 possibilidades existentes. Após contactar alguns responsáveis da Mota-Engil e da Infraestruturas de Portugal, foi possível saber que o mais comum é considerar que a formulação de um Stone Mastic Asphalt deve obedecer a algumas indicações dos betões betuminosos rugosos, sendo usualmente usadas as 50 pancadas por face prescritas para os mesmos (menos 25 pancadas em relação às misturas tradicionais aplicadas no país).

Após compactação e arrefecimento ao ar durante 4 horas, os provetes devem ser retirados dos moldes. Daí a 32 horas são realizados todos os ensaios.

Desta feita, já se pode determinar a baridade de cada um deles, seguindo a EN 12697-6 (CEN, 2012a).

Acabando de preparar os provetes, a etapa posterior é a submissão ao ensaio na prensa Marshall, seguindo a EN 12697-34 (CEN, 2012e), sucintamente explicado de seguida.

4.2.3.2. Ensaio Marshall

O ensaio Marshall, parte fulcral do Estudo de Marshall, deve ser executado de acordo com a EN 12697-34, com o objetivo de determinar a percentagem ótima de betume. As etapas a seguir no Marshall não têm grandes especificidades em relação às efetuadas na formulação de outros tipos de misturas betuminosas, pois a grande diferença, aliás já referida, está no número de pancadas com que se compactam os provetes. Desta feita, o procedimento não carece de uma explicação muito aprofundada.

Ainda assim, genericamente, os passos a seguir são:

- 1º. Todo o equipamento deve ser limpo e lubrificado;
- 2º. Tanto o estabilómetro como os provetes devem ser aquecidos antes do início do ensaio;
- 3º. Aplicar a carga a uma taxa de deformação constante até à rotura dos provetes;
- 4º. Registrar a carga máxima que os fez romper (análise do gráfico Estabilidade Marshall (S) vs. Deformação Marshall (F), atualmente fornecido pelo equipamento);
- 5º. Determinar a baridade, porosidade, VMA e VFB;
- 6º. Fazer média dos valores obtidos, por percentagem de betume;
- 7º. Traçar gráficos das propriedades (4º. e 5º. ponto), em função da percentagem de betume;
- 8º. Determinar a percentagem ótima de betume, uma característica que advém da média das percentagens de betume onde:
 - O valor da baridade na mistura betuminosa compactada é máximo;
 - O valor da estabilidade Marshall é máximo;
 - O valor da porosidade é médio.

$$\%ótima_betume = \frac{\%betume(baridade\ máxima) + \%betume(estabilidade\ máxima) + \%betume(porosidade\ média)}{3} \quad (4.3.)$$

Aplicando a metodologia descrita à formulação da mistura betuminosa SMA11, obtiveram-se os resultados que constam no quadro A2.6 e nos gráficos A2.5 do Anexo A2.

A percentagem ótima de betume de betume foi determinada de acordo com a fórmula apresentada, e resultou em 5,9 %.



Figura 4. 5 – Prensa Marshall do Laboratório da obra [Fonte: Própria]

4.2.4. FIBRAS

4.2.4.1. Fibras comercializadas atualmente, usadas no SMA

No capítulo 3, particularmente em 3.9.2., foram descritos vários estudos que se têm vindo a desenvolver no âmbito das fibras. A verdade é que os materiais existem e não admira que no futuro sejam utilizados para fins comerciais e fornecidos a grandes obras, pois têm potencial para tal.

Neste momento, o cenário não é esse, uma vez que as únicas fibras comercializadas em grande escala são as de celulose, que tanto podem ser revestidas a cera como a betume.

No mercado aparecem dois grandes grupos de fibras celulósicas... as fibras de celulose simplesmente granuladas (FG) e as fibras de celulose granuladas e impregnadas de betume ou cera (FIG). No fundo a diferença reside no método de produção, na qualidade e no preço do material.

As FG, contêm somente 0,1 a 2,0 % de revestimento! Na prática, os filamentos de celulose são transformados em grânulos e, de seguida, é colocada uma película de betume ou cera. O investimento neste tipo de fibras fica mais económico, mas a qualidade é reduzida. Alguns países fazem a moagem destas fibras, misturando-as no tambor da central juntamente com os agregados frios, de modo a atuarem como um fíler e baixarem o escorrimento, porém a homogeneidade da repartição do mastique betuminoso pela superfície dos agregados fica comprometida.

Ao utilizar as fibras descritas pode acontecer que em obra se tenha de baixar a quantidade de betume devido a exsudações após compactação. Normalmente cai para valores próximos de 5,2 % de betume, que na realidade desvirtua aquilo que é um SMA, passando-se a ter uma espécie de mistura rugosa com fibras.

As FIG são mais caras, dada a quantidade de betume ou cera que incorporam. Resultam de pequenos filamentos de celulose (semelhantes a algodão), que são envolvidos em betume ou cera, depois prensados para formarem grânulos, lançando uma película do respetivo material utilizado no revestimento dos filamentos sobre os grânulos. A percentagem de betume para a fibra ter boa qualidade é cerca de 10 %, enquanto de cera é necessário o dobro da quantidade, dado sofrerem maior absorção por parte dos filamentos.

Podem ser diretamente adicionadas no misturador, onde por fusão se distribuem e acoplam aos agregados, formando uma película de mastique homogênea ao redor deles.

À partida, tanto o revestimento a betume como a cera conferem propriedades idênticas ao nível da drenagem do ligante. Ainda assim, no capítulo 6 serão apresentados resultados do ensaio de escorrimento com ambas as fibras.

Os custos de uma fibra de celulose revestida a cera ou a betume podem variar muito. Dependendo das fibras celulósicas, da qualidade e quantidade das ceras e do betume, o preço altera-se. Assim, faz com que existam fibras impregnadas e recobertas com betume mais baratas que com cera e vice-versa, embora, genericamente, para boa qualidade de ambas, as que têm ceras sejam mais caras.

No fabrico do SMA11 para a obra do Montijo optou-se pela utilização de fibras de celulose revestidas a betume VIATOP Premium, tal como já tinha sido apontado, por uma imposição do CE da IP (baseada na experiência dos últimos anos com as mesmas).



Figura 4. 6 – Misturas betuminosas descontínuas: A) sem fibras; B) e C) com fibras [Fonte: Martinho et al. (2013)]

4.2.4.2. Verificação da quantidade de fibras pelo Ensaio de Escorrimento

Anteriormente, foi já referido que a quantidade de fibras presumíveis de serem precisas para travar o escorrimento de betume, no transporte, aplicação e em serviço, são adicionadas à mistura, na preparação dos provetes Marshall. Mas pode não ser suficiente, ou até se pode otimizar para poupar nas fibras.

As ilações sobre a proporção de fibras a utilizar na formulação de uma mistura betuminosa do tipo SMA, tiram-se com base no ensaio de escorrimento. Este ensaio deve ser executado após a determinação da percentagem ótima de betume.

Para esta averiguação tem de se seguir as normas europeias afetas ao assunto. Segundo a EN 13108-5, as misturas betuminosas do tipo SMA devem cumprir a EN 13108-20 no que diz respeito ao método a empregar na apreciação do escorrimento. Por sua vez, esta norma remete para a EN 12697-18 na avaliação da drenagem do ligante.

Esta norma apresenta os dois métodos descritos a seguir para efetuar o pretendido, que embora distintos têm princípios semelhantes e são relativamente fáceis de executar: o “basket method” e o “beaker method” (chamado comumente de método de Schellenberg, devido à versão anterior da norma, publicada em 2004). A norma não especifica clara e objetivamente qual o método a utilizar na avaliação do escorrimento de um SMA, referindo que o “basket method” não deve ser aplicado em misturas abertas.

O “basket method” tem como princípio fundamental medir a quantidade de material perdido por drenagem do ligante. Devem produzir-se três lotes de material para ensaio, em que um sirva para controlo e os dois restantes sirvam para colocar no interior de um cesto cúbico normalizado, todo ele perfurado. O conjunto cesto mais mistura é colocado sobre um tabuleiro forrado a folha de alumínio e

levado à estufa durante 3 horas, a uma determinada temperatura de ensaio. O betume aproveita as perfurações do cesto para se “escapar” da amostra, permitindo medir a quantidade retida no tabuleiro após o ensaio.

O resultado do “basket method” corresponde à quantidade de material drenado, e deve ser determinado da forma seguinte:

$$BD = \frac{W2 - W1}{A + B + X} \times 100 \quad (4.4.)$$

onde,

- BD – corresponde ao material drenado, em percentagem (%);
- W1 – corresponde à massa do conjunto tabuleiro e folha de alumínio, em gramas (g);
- W2 – corresponde à massa final do conjunto tabuleiro, folha de alumínio e material drenado, em gramas (g);
- A – corresponde à massa inicial de agregados na mistura, em gramas (g);
- B – corresponde à massa inicial de ligante na mistura, em gramas (g);
- X – corresponde à massa inicial de fibras na mistura, em gramas (g).

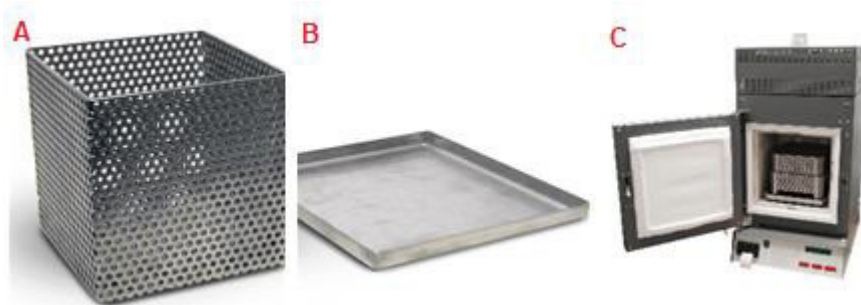


Figura 4. 7 – A) “Cesto perfurado” [Fonte: Group (2018)] ; B) Tabuleiro [Fonte: Group (2018)]; C) Estufa [Fonte: Gilson Company (2018)]

O “beaker method” exige igualmente a medição da quantidade de material perdido por drenagem do ligante. Devem também preparar-se três lotes de mistura betuminosa, dos quais um é mais uma vez usado no controlo e os dois restantes são usados no ensaio propriamente dito, sendo todas as misturas vertidas independentemente para os gobelés. O conjunto gobelé mais mistura é colocado em estufa durante 1 hora, com temperatura representativa da temperatura máxima prevista para a central de produção. Após esta etapa, os gobelés devem ser virados ao contrário para permitir expulsar o material betuminoso que está no interior (recolhendo-o num tabuleiro).

O resultado do “beaker method” corresponde à quantidade de ligante escorrido do fundo do gobelé após o ensaio, e quando aplicável, material retido no peneiro de 1 mm (malha quadrada), grandezas determinadas da forma seguinte:

$$BD = \frac{W5 - W3 - W6}{W4 - W3} \times 100 \quad (4.5.)$$

e,

$$R = \frac{W6}{W4 - W3}$$

(4.6.)

onde,

- BD – corresponde ao material drenado, em percentagem (%);
- R – corresponde ao material retido no peneiro 1 mm, em gramas (g);
- W3 – corresponde à massa do gobelé vazio, em gramas (g);
- W4 – corresponde à massa do conjunto gobelé e amostra da mistura, em gramas (g);
- W5 – corresponde à massa do conjunto gobelé e material retido após o virar, em gramas (g);
- W6 – corresponde à massa do resíduo seco retido no peneiro, em gramas (g).

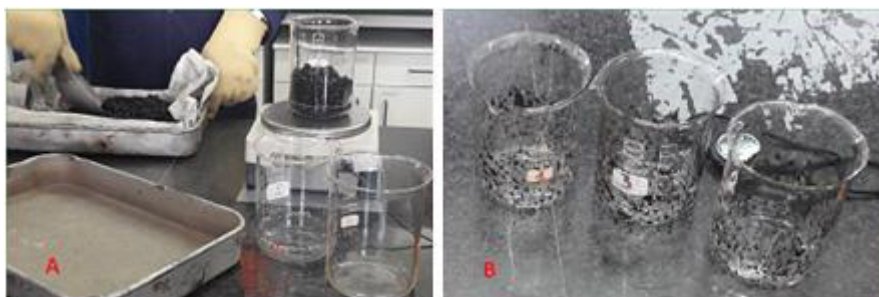


Figura 4. 8 – A) Enchimento dos gobelés com mistura betuminosa; B) Gobelés após escoamento [Fonte: Própria]

Em ambos os ensaios, a temperatura deve estar 25°C acima da temperatura de amassadura da mistura, embora possam ser feitos com apenas 15°C acima da mesma, no caso de se usarem betumes modificados ou na qual se incorporem certos aditivos. Podem ainda utilizar-se temperaturas diferentes destas, porém, se tal acontecer, o relatório de ensaio deve ser acompanhado de nota para o efeito.

Ainda que não haja um esclarecimento normativo sobre qual dos dois ensaios utilizar quando se trabalha com SMA, Miranda et al. (2013) decidiram usar ambos os métodos no propósito de definir o melhor para aplicar a estas misturas. Concluíram que, do ponto de vista do tempo de ensaio, é mais interessante utilizar o segundo método por ser mais rápido (demora menos 2 horas comparativamente ao “basket method”) e é economicamente mais barato pois exige menor quantidade de agregado por cada ensaio efetuado. E porque foi o “beaker method” o que apresentou maior sensibilidade ao escoamento (pois, no caso do cesto, as perfurações podem ficar colmatadas pelo material e não drenar a totalidade do mesmo) é o método que sugerem ser melhor para avaliação da propriedade em questão.

Também Gardete, Santos e Capitão (2011), para além de outros autores, corroboraram a utilização do “método do copo/gobelé” como o preferencial em misturas betuminosas Stone Mastic Asphalt. Contudo, não inviabiliza a utilização do outro método.

Suponto que, após o ensaio de escoamento pelo método escolhido, se afere que a percentagem de fibras estipulada na formulação não garante que o limite de escoamento seja salvaguardado, então deve repetir-se o estudo de formulação adicionando uma nova percentagem de fibras, superior aquela que se tinha colocado. Após realizar o ensaio Marshall e se obter uma nova percentagem ótima de betume, sob essa deve ser realizado novamente o ensaio de escoamento.

Em suma, trata-se de um processo iterativo, que se deve repetir tantas vezes quantas as necessárias (por norma poucas, visto que o intervalo de percentagens de fibras a incorporar é bastante pequeno).

A partir do momento em que, pelo ensaio, se confirma que o limite de escoamento não é violado, deve partir-se para a definição da fórmula de trabalho da mistura betuminosa. Foi isso que aconteceu com o SMA11 em análise e será exposto, onde se partiu para a fórmula após verificar que, pelo “beaker method”, o escoamento de ligante para a mistura com a percentagem ótima de betume (5,9 %) era de 0,04 %, muito aquém do máximo pré-estabelecido (0,30 %).

4.2.5. FÓRMULA DE TRABALHO PARA A MISTURA BETUMINOSA

O passo final da formulação da mistura betuminosa é estabelecer uma fórmula de trabalho proveniente da composição laboratorial. Na realidade não é mais que conjugar as proporções de agregados, ligante e aditivos, de modo a que a sua soma seja igual a 100 %.

Assim, sabendo que a mistura irá conter 5,9 % de betume PMB 45/80-65 e 0,4 % de fibras celulósicas revestidas a betume, fica-se também a saber que os restantes 93,7 % correspondem ao agregado. As percentagens determinadas na secção 4.2.2. (de cada agregado em relação ao total na mistura de agregados, 100 %) tem agora de se harmonizar com os 93,7 % (percentagem que a mistura de agregados representa na mistura betuminosa), ou seja, faz-se correspondência através da “Regra dos 3 Simples”.

Exemplo: Pó 0/6 (24% da mistura de agregados)

24 % ——— 100 %

X = 22,5 % (da mistura betuminosa)

X (%) ——— 93,7 %

Repetindo o processo para o resto dos agregados, a fórmula de trabalho para o SMA11 Surf PMB 45/80-65 do EF resulta em:

Quadro 4.9 – Fórmula de trabalho para a mistura betuminosa SMA11 Surf PMB 45/80-65

DESIGNAÇÃO	NATUREZA	PROVENIÊNCIA	%
Pó 0/6	Granito	Pedreira Herdade de Benafessim, Montemor-o-Novo. Mota-Engil, Engenharia e Construção, S.A.	22,5
Brita 6/10	Granito	Pedreira Herdade de Benafessim, Montemor-o-Novo. Mota-Engil, Engenharia e Construção, S.A.	65,6
Fíler Comercial	Calcário	Parapedra, Sociedade Transformadora de Pedras, Lda.	5,6
Fibras Celulósicas	-	VIATOP Premium – J.Rettenmaier & Sohne Gmbh & Co	0,4
Betume PMB 45/80-65	-	Repsol	5,9

5.

ACOMPANHAMENTO DE OBRA: FABRICO E APLICAÇÃO DE SMA

CASO DE ESTUDO: “EN4 - INTERSEÇÃO COM A EN118 PROX. DE MONTIJO (KM 18+750) E INTERSEÇÃO COM A EN10 PEGÕES (KM 44+257). REABILITAÇÃO.”

5.1. DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO LOCAL E DA OBRA

A Estrada Nacional 4 faz a ligação entre o Montijo e a parte terminal da autoestrada nº 6, na fronteira entre Portugal e Espanha, perto de Badajoz, embora tenha sido inicialmente projetada desde Lisboa, com uma ponte sobre o rio Tejo. Ora, essa ponte nunca chegou a ser construída e a EN4 inicia-se no Montijo, ao quilómetro doze.

É aproximadamente paralela à AE6, com orientação oeste/este e é parte integrante da Rede Complementar da Rede Rodoviária Nacional, concessionada pela Infraestruturas de Portugal (IP).

Por estar tão próxima de uma autoestrada portajada, torna-se uma alternativa clara para os utilizadores que precisam de fazer o trajeto discriminado e que queiram torná-lo mais económico. Trata-se de uma opção tão desejável que, em toda a estrada e durante praticamente todo o dia, se presencia intenso tráfego de veículos ligeiros e pesados, nacionais ou vindos de Espanha (maioritariamente).



Figura 5. 1 – Tráfego pesado na EN4, entre Montijo e Pegões [Fonte: Própria]

A obra de reabilitação não se destina a toda a extensão da rodovia. Inicia-se após a rotunda que interseta a EN4 com a EN118, ao PK 18+750 e termina na rotunda de interseção com a EN10, em Pegões, ao PK 44+257, o que perfaz proximamente 25,5 km de extensão.



Figura 5. 2 – Troço de da EN4, entre Montijo e Pegões: 1) Estaleiro da obra e central do Passil; 2) Rotunda de interseção da EN4 com a EN118; 3) Rotunda de interseção da EN4 com a EN10 [Fonte: Google Maps]

É uma estrada de duas vias em pavimento flexível, com um perfil transversal de largura superior a 7 m, com bermas em ambos os sentidos de largura variável (algumas pavimentadas e outras não) e valetas a par dos taludes de escavação, revestidas a betão. Em quase toda a sua extensão predomina a zona rural, à exceção das proximidades aos aglomerados populacionais de Faias, Pegões Velhos e Pegões.

A infraestrutura rodoviária vai de encontro ao panorama geral das estradas do centro e sul de Portugal, possuindo alinhamentos retos de extensão considerável, e uma orografia de declive ligeiro, com cotas altimétricas entre 4 e os 93 m no troço intervencionado, o que não traduz problemas ao nível do perfil longitudinal. Já no que respeita ao traçado em planta, também não existem grandes constrangimentos, exceto em alguns locais como, por exemplo, onde há curvas de raio reduzido.

Existem oito obras de arte entre as referidas rotundas (um viaduto e sete pontões) e várias paragens de transporte público. Dentro destas, existiam algumas que obrigavam os veículos a parar na própria estrada, tendo-se traduzido no aparecimento de várias rodeiras. Por isso, com o objetivo de evitar que, no futuro, se voltem a registar patologias em torno desta questão e também para acabar com o conflito entre o tráfego e os autocarros parados, aboliram-se as gares de transporte público à face da estrada, construindo-as fora da via. A imagem é um exemplo das várias gares construídas no troço.



Figura 5. 3 – Novas gares de transporte público da EN4 [Fonte: Própria]

Mais intervenções além da descrita tinham de ser feitas. Para perceber as necessidades procedeu-se a uma inspeção visual e a um conjunto de ensaios (de campo e em laboratório), e pelos resultados avaliaram-se os tipos de degradações que o pavimento apresentava.

Numa primeira análise, através da inspeção visual, verificou-se que o nível de fadiga a que chegou já era bastante considerável, e vinha retratado, genericamente, no fendilhamento de várias ordens (desde

fissuras transversais e longitudinais até pele de crocodilo), nas rodeiras e nas deformações provenientes da ação das raízes das árvores (ondulações junto às bermas).

Embora a inspeção visual já tivesse permitido perceber que o pavimento estava muitíssimo degradado superficialmente, foram realizados mais testes “*in loco*” e laboratoriais, que vieram a comprovar que não só existia degradação da camada de desgaste, mas também (em vários locais) de todas as restantes.

Testou-se, em primeiro, a irregularidade longitudinal. Para tal foi determinado o valor do IRI na camada de desgaste (razão entre o somatório dos deslocamentos ocorridos na suspensão de um veículo-teste, medidos com um perfilómetro laser, e a distância percorrida pelo mesmo), por sentido da estrada e de 100 em 100 m, fazendo a média dos resultados. A média do IRI no sentido crescente (Montijo/Pegões) resultou em 3,73 m/km e no sentido oposto em 3,41 m/km, ou seja, traduziu uma generosa soma de deslocamentos por quilómetro percorrido. Consultando as categorias previstas no CE da IP obteve-se, em média, a pior categoria da propriedade, “Mau”.

Para avaliar a capacidade de carga efetuaram-se, também de 100 em 100 m, ensaios de carga com defletómetro por impacto (FWD), distinguindo-se e agrupando-se zonas com comportamento estrutural homogêneo de zonas com comportamento estrutural heterogêneo.

Fizeram-se algumas sondagens à rotação (extraíndo carotes) e treze poços junto à berma, que permitiram observar que as camadas granulares e betuminosas não tinham homogeneidade de espessura e material ao longo do troço analisado. Daqui se deduziu que a estrutura do pavimento foi alterada ao longo dos anos por intervenções de manutenção, o que bate certo com o registo no sistema de gestão do pavimento.

As amostras recolhidas nos poços foram submetidas a ensaios laboratoriais, entre os quais, análise granulométrica, limites de consistência de Atterberg, equivalente de areia, ensaio de compactação proctor modificado e ensaio de penetração CBR.

Com o intuito de caracterizar as misturas e seus componentes, separou-se as camadas betuminosas das amostras recolhidas nas sondagens à rotação e determinaram-se as suas baridades: aparente; e máxima pelo método do picnómetro. Concluídos estes ensaios fez-se a extração do betume (para determinar a proporção deste na mistura). Sobre o betume extraído realizou-se o ensaio de penetração a 25°C e o ensaio da temperatura de amolecimento pelo método anel e bola. Sobre a mistura de agregados foi feita uma análise granulométrica.

Pela análise dos resultados dos ensaios, facilmente se constatou a fraca qualidade do pavimento existente, quer ao nível das camadas granulares quer das camadas com misturas betuminosas. Apesar das intervenções anteriores, ficou comprovada a necessidade de uma nova intervenção que regenerasse e concede-se eficiência ao pavimento, ao nível funcional e estrutural.

Identificadas as anomalias e respetivo grau de severidade, dimensionou-se o pavimento, partindo-o em vários troços, em função da carência de intervenções mais ou menos profundas. No dimensionamento das espessuras do pavimento e na escolha de materiais, os projetistas tiveram em consideração não só as anomalias, mas também as solicitações do tráfego (tipo de veículo e velocidade de circulação), o período de dimensionamento, as condições climáticas, as características mecânicas dos materiais de cada camada, as características dos solos locais e a capacidade de suporte do solo de fundação.

Em função de todas as variáveis anteriores foram criadas sete estruturas de pavimento distintas, embora só se tenham aplicado as seis seguintes:

- Estrutura do tipo I – Aplicada desde o PK 18+750 ao PK 27+800;

Neste troço, com cerca de 9 km de extensão, foi adotada uma solução que consiste em:

- Fresagem do pavimento existente em 0,07 m da sua espessura;
- Aplicação de camada de ligação com 0,05 m de espessura, em MBD AC20 bin 35/50;
- Aplicação de camada de desgaste com 0,04 m de espessura, em BBr AC14 surf PMB 45/80-65.

A reabilitação com este tipo de estrutura não foi demasiado intrusiva, fruto destes não serem os troços com degradações de maior gravidade. Ainda assim, a cota final do pavimento subiu 0,02 m relativamente à inicial.

Nas obras de arte localizadas no meio destes dois trechos (pontões entre o PK 18+900 e o 18+910, entre o PK 19+755 e o 19+765, entre o PK 19+940 e o 19+960 e entre o PK 20+325 e o PK 20+345), interrompeu-se a estrutura do tipo I e substituiu-se pela estrutura do tipo VII. Como a diferença de cotas entre estas duas estruturas era de 0,02 m, para as compatibilizar teve de se efetuar um disfarce, que começa a 20 m de cada extremidade dos pontões.

- Estrutura do tipo II – Não foi aplicada;
- Estrutura do tipo III – Aplicada desde o PK 27+800 ao 41+925 e desde o PK 43+000 ao PK 43+775;

No conjunto destes dois troços, numa extensão total de ± 15 km, a solução consiste em:

- Reciclagem com cimento “*in situ*” em 0,30 m da espessura do pavimento;
- Aplicação de camada de ligação com 0,04 m de espessura, em MBR-BBA (betume-borracha);
- Aplicação de camada de desgaste com 0,04 m de espessura, em SMA11 Surf PMB 45/80-65.

Inicialmente, o troço em SMA não se previa ser tão comprido. Era suposto utilizar a estrutura do tipo II em alguns trechos intermédios (com a camada de desgaste em BBr AC14 surf PMB 45/80-65 e restantes camadas iguais ao tipo III): entre o PK 27+800 e o 29+500, entre o PK 32+000 e o 33+000, entre o PK 38+000 e o 39+000, entre o PK 41+000 e o 41+925 e entre o PK 42+500 e o PK 43+000; só se utilizaria SMA11 em zonas onde o estudo de impacte ambiental determinou serem sensíveis ao ruído, uma vez que, segundo a Infraestruturas de Portugal, estas misturas são capazes de o reduzir 1 a 2 dB.

No entanto, a Mota-Engil sugeriu a alteração dos troços em estrutura do tipo II para estrutura do tipo III (pela facilidade de construção e homogeneidade da superfície), e a IP aprovou. Apesar do investimento inicial ser mais dispendioso, é espectável que os benefícios sejam compensatórios.

Do PK 41+925 ao PK 42+500, trecho com 575 m, inserido entre aplicações da estrutura III, não se seguiu esta. A justificação prende-se com o facto de ser um acesso à AE13, onde as patologias eram menos severas que a envolvente, dada a reabilitação para construção do acesso ter sido bem executada.

A estrutura em análise é muito mais intrusiva, quando comparada com a do tipo I, pois compreende a resolução dos registos de degradações mais acentuadas de toda a obra. A reciclagem consiste no levantamento do pavimento existente em 0,30 m e posterior reposição do material levantado com a adição de cimento, ou seja, a cota final, até esta fase, mantém-se, embora as duas camadas betuminosas, colocadas *à posteriori* a façam subir em 0,08 m.

De modo a atenuar as diferenças de cotas entre a estrutura e as obras de arte existentes nos troços onde foi executada (pontões entre o PK 32+095 e o 32+105, entre o PK 39+295 e o 39+305, entre o PK 41+082 e o 41+092 e o viaduto sobre a AE13 entre o PK 41+830 e o PK 41+925) foram executadas, a partir de cada extremidade das obras, zonas de transição com 80 m de extensão, isto para garantir sempre um disfarce ténue, de 1 cm a cada 10 m.

- Estrutura do tipo IV – Aplicada desde o PK 41+925 ao PK 42+500;

O troço em epígrafe, com 575 m de extensão, como já foi dito, tinha, antes da reabilitação, uma estrutura menos degradada que as adjacentes. Posto isto, foram executados os trabalhos:

- Fresagem do pavimento existente em 0,08 m da sua espessura;
- Aplicação de camada de base com 0,07 m de espessura, em AC20 base 10/20 (alto módulo);
- Aplicação de camada de desgaste com 0,04 m de espessura, em BBr AC14 surf PMB 45/80-65.

A ideia neste local era eliminar as fissuras na camada de desgaste, daí a fresagem a 8 cm e, além disso, criar maior resistência às deformações permanentes, dada a suscetibilidade de acontecerem rodeiras nesta zona em específico (paragens constantes à saída da AE13). Assim, utilizou um betume significativamente mais duro (de menor penetração) na camada de base.

A espessura aumentou 0,03 m, o que motivou os disfarces necessários nas zonas de transição.

- Estrutura do tipo V – Aplicada desde o PK 43+775 ao PK 44+233;

Neste troço, com 458 m de extensão, havia alteração da estrutura do pavimento devido às manutenções, resultando em:

- Fresagem do pavimento existente em 0,09 m da sua espessura;
- Aplicação de camada de base com 0,09 m de espessura, em AC20 Base 10/20 (alto módulo);
- Aplicação de camada de desgaste com 0,04 m de espessura, em SMA11 Surf PMB 45/80-65.

A camada de base repõe a espessura original do pavimento, antes da fresagem, e a camada em SMA faz a cota final do pavimento subir em 4 cm no troço. O betume duro utilizado na camada em AC20 resulta também da necessidade de prevenir as deformações permanentes, numa zona de constantes paragens, desta vez dada a proximidade com a rotunda da EN10.

- Estruturas dos tipos VI e VII – Aplicada no pavimento sobre as obras de arte.

Nas obras de arte não era possível alterar a cota final do pavimento, daí os disfarces efetuados nas extremidades das mesmas, de modo a compatibilizar as estruturas VI e VII com as restantes. Por isso, estas estruturas consistem em:

- Fresagem do pavimento existente em 0,04 m da sua espessura;
- Aplicação de camada de desgaste com 0,04 m de espessura, em SMA11 (estrutura do tipo VI) ou em BBr AC14 surf PMB 45/80-65 (estrutura do tipo VII).

De todas as obras de arte mencionadas, apenas o pontão entre o PK 39+295 e o PK 39+305, apresenta a estrutura do tipo VI, com base na sensibilidade ao ruído da zona envolvente.

Na interface das camadas teve de se colocar um elemento de união, caso contrário podiam funcionar desligadas, o que não é benéfico para a infraestrutura. Entre as camadas betuminosas, para unir os ligantes das duas (ambos betume), espalhou-se uma rega de colagem, com emulsão betuminosa “termoaderente” modificada com polímeros (ideal para evitar a aderência da emulsão aos rodados dos camiões), aplicada à taxa de 0,75 Kg/m². Já entre uma camada fresada e uma betuminosa, aspergiu-se uma rega de cura, à mesma taxa de aplicação, com emulsão betuminosa clássica.

A emulsão com polímeros foi utilizada porque o ligante betuminoso das misturas unidas pela rega de colagem era um betume também modificado com polímeros e nestes casos, ou se usava uma emulsão deste tipo ou uma emulsão especial antiaderente.

Antes de aplicar as camadas betuminosas, isto é, após a fresagem ou a reciclagem do pavimento, teve de se efetuar alguns trabalhos. As espessuras de fresagem foram preconizadas nas estruturas apresentadas atrás, com base nos testes realizados, a quando do levantamento das patologias. Contudo, como os testes estavam relacionados com amostras recolhidas em determinados pontos de cada trecho, não invalida que tenham aparecido locais onde, mesmo fresando o que estava prescrito, continuassem a apresentar patologias nas camadas inferiores. Nestes locais, voltou-se a passar a fresa tantas vezes quantas as necessárias para eliminar as patologias, ou seja, fez-se o “saneamento do pavimento no local da anomalia”, tal como mostra a figura.



Figura 5. 4 – Saneamento do pavimento no local da anomalia [Fonte: Própria]

De forma a evitar que as raízes das árvores (maioritariamente de pinheiros mansos) crescessem para debaixo da estrutura do novo pavimento e repetissem a ondulação (identificada na inspeção visual), abriu-se uma vala junto à berma, retirou-se as raízes contidas nesse espaço, colocou-se verticalmente uma tela anti raízes e voltou-se a tapar a vala compactando o solo, tal como estava previsto em CE.

Ainda que a ideia fosse resolver o problema em definitivo, não é possível dar essa garantia, uma vez que o seu sucesso depende de muitos fatores, entre os quais estão: a boa qualidade da generalidade da tela; ausência de defeitos pontuais; correta aplicação; e a vida útil da tela.

Em obra tentou-se controlar o mais possível estes fatores, embora permanecesse uma limitação crucial do uso da tela que não se conseguia contornar. A profundidade da vala escavada não pode ser muito grande devido aos custos que representa (neste caso tem 1,10 m) e até porque as telas vendem-se com altura de fábrica (1,00 m, concretamente para esta obra). Assim, as raízes abaixo da referida profundidade continuam a proliferar e, a pouco e pouco, podem acabar por destruir a tela anti raízes.

Não é suposto interpretar que a aplicação das telas não tem qualquer interesse! Apenas alertar que não têm eficácia vitalícia e por isso a IP devia apresentar junto da justificação das telas, as especificações técnicas para as mesmas, de modo a terem o sucesso pretendido quando pensaram em usá-las.

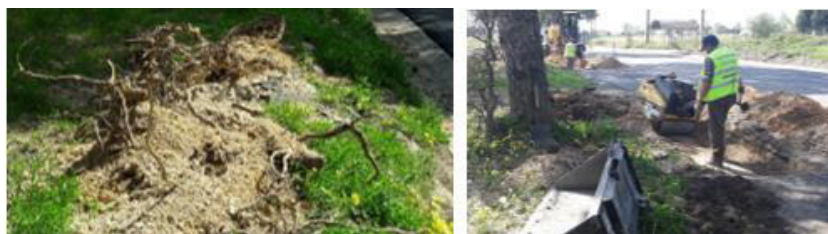


Figura 5. 5 – Extração de raízes e colocação da tela anti raízes [Fonte: Própria]

Ainda que o principal motivo da obra fosse, efetivamente, a melhoria do pavimento e lhe seja atribuído especial ênfase neste documento, a empreitada compreendeu também: trabalhos gerais, como a

montagem/desmontagem do estaleiro (onde foi instalado um parque de máquinas, uma central de produção de misturas betuminosas, um laboratório e as demais instalações de apoio social (dormitórios, casas de banho, etc.)); a implementação de desvios provisórios de tráfego, com correta sinalização das zonas de trabalho, como garantia de segurança; e trabalhos mais específicos relacionados com a própria obra, por exemplo: drenagens; construção de uma passagem para animais; e correta sinalização de segurança da obra após concluída.

Os trabalhos de drenagem foram realizados após concluir os de pavimentação, colocando órgãos de drenagem superficial (longitudinais e transversais), elevando as cotas atuais das tampas de caixas de visita e sumidouros para as cotas finais do pavimento, e efetuando limpeza e reparação de valetas.

5.2. FABRICO DA MISTURA

5.2.1. CENTRAL DE PRODUÇÃO

O fabrico das misturas betuminosas deve ser feito através de uma central de produção, que permite a dosagem dos materiais e a amassadura dos mesmos. É um equipamento extremamente útil, como tantos outros que inovaram e otimizaram o setor das construções, pois é humanamente impensável ser tão rápido e eficaz como estas potentes máquinas.

Todas as operações são observadas e controladas a partir da cabine de controlo, um elemento que todas as centrais têm. No entanto, de central para central o grau de automatismo e controlo eletrónico não é igual e depende sobretudo da idade da central e sua dimensão. Frequentemente, centrais mais pequenas têm operações de controlo mais simples que as centrais de maiores dimensões. Estas podem ter um controlo informatizado de muitas variáveis como: consumos, inclinação e pressão do tambor, taxas de alimentação, entre outras... e quanto mais sofisticada, mais variáveis é capaz de controlar.



Figura 5. 6 – A) Exterior da cabine da central de Benafessim; B) Interior da cabine da central de Benafessim; C) Exterior da central do Passil; [Fonte: Própria]

As centrais de produção de misturas betuminosas têm todas o mesmo princípio: juntar os diversos compostos e fazer uma amassadura que torne a mistura o mais homogênea possível. Já a maneira como o conseguem é diferente e as centrais dividem-se em dois grandes grupos: centrais contínuas e centrais descontínuas.

As centrais contínuas, também frequentemente conhecidas por centrais de tambor secador misturador, são as mais simples das duas, constituídas essencialmente por três partes cruciais.

O agregado é colocado num doseador de agregados/inertes. Esta componente (primeira das três mencionadas) deve primar pela precisão, pois não existe sistema de pesagem de inertes após secagem

(ao contrário do que acontece numa central descontínua) e a quantidade de agregado libertada para o tapete (segunda componente) deve ter em consideração um fator corretivo correspondente ao seu teor de humidade. Caso não se tivesse isto em linha de conta, existiria um défice de agregado na mistura, ou seja, introduzia-se o agregado húmido em quantidade coerente com as proporções finais na mistura, mas na realidade como este é posteriormente seco, teria proporção inferior à pretendida. Devido a esta particularidade das centrais contínuas, o controlo é feito “por volumes”.

É o tapete que transporta a mistura desde o doseador até ao tambor e a sua velocidade deve ser constante, com o objetivo de ter um abastecimento de inerte contínuo e a pesagem ser mais precisa.

A partir do momento em que o agregado entra no tambor (última componente mencionada), experimenta duas etapas distintas: numa primeira fase, os agregados entram junto do queimador e secam à medida que se afastam do mesmo, até sensivelmente ao centro do tambor (zona de secagem); no centro existe uma zona de transição; a partir do centro até ao fim do tambor inicia-se uma nova fase, onde o betume e o fíler são adicionados e se procede à amassadura (zona de mistura).

As centrais contínuas podem divergir um pouco do modelo tradicional, em que o tambor é do tipo “drum-mixer”. Normalmente, um afastamento de modelo significa uma mudança de tambor.

Existem centrais contínuas de fluxos contra corrente (tambores do tipo “contra-flow”). Nestas centrais, o queimador encontra-se no centro do tambor e por essa razão os agregados dirigem-se de encontro ao mesmo (logo a secagem é mais eficiente). A partir do momento em que o agregado passa o queimador, entra igualmente numa zona de mistura e a amassadura procede-se de igual forma.

Existem também centrais de duplo tambor ou de tambor secador/misturador selecionados. Este sistema incorpora um “duplo invólucro”, onde o tambor interior é rotativo e faz a secagem do agregado através de um sistema “contra-flow”. Posteriormente, todo o material é enviado para o tambor exterior (através de aberturas que o interior contém), e a mistura com o betume é feita entre os dois tambores referidos.

Qualquer central contínua, independentemente do tambor que contenha, é capaz de ter na periferia um silo de material reciclado e incorporá-lo na mistura a preparar. Contudo, o local onde este é descarregado para ser misturado é distinto e depende do tambor escolhido.

A utilização das centrais descritas carrega vantagens. Se por um lado permitem uma mobilidade muito maior, por outro conseguem apresentar, no geral, menores custos. São também as que permitem a incorporação de maiores quantidades de material reciclado, um material que cada vez tem maior uso, dado o interesse económico que representa.

Ainda que se reconheçam todas estas vantagens às centrais contínuas, as mesmas não devem ser utilizadas na produção de SMA. A dosagem deve ser o mais precisa possível, razão pela qual apenas faz sentido utilizar centrais descontínuas.

Estas são bem mais complexas que as anteriores, basta olhar ao número de componentes que incorporam. O doseador de agregados é comum às duas e, embora nestas não fosse necessária tão elevada precisão, quanto maior esta for, maiores serão os rendimentos de produção obtidos.

Os agregados são levados por um tapete isento de sistema de pesagem até ao secador (que não é misturador), onde entram em movimento rotacional pela parte superior e deslizam na direção do queimador (por efeito da inclinação do tambor), onde vão aquecendo e secando eficazmente.

Os inertes seguem para o elevador de alcatruzes, de maneira a atingirem a cota dos crivos de material quente (que os separam em frações granulométricos com determinados tamanhos) e das tremonhas de material quente (que corrigem ligeiros erros ocorridos no doseador dos agregados a frio).

A partir daqui são pesados em sistemas mecânicos, eletrónicos ou mistos e passam para o misturador. Neste, adicionam-se o betume e o fíler (recuperado ou comercial, pesado em balança exclusiva), para além dos sacos de fibras no caso específico das misturas SMA.

Uma central descontínua pode, à semelhança da contínua, ter sistemas para incorporação de material reciclado. Na obra, como a fórmula não incluía adição de RAP, não houve necessidade de usar tal equipamento.

No meio de tantas diferenças, existem partes das centrais comuns aos dois grandes tipos. São exemplos disso os filtros, tanques de betume, silos para fíler e para mistura pronta.

Os filtros podem ser de três tipos: recuperadores de finos por ciclones, filtros por via húmida ou filtros de mangas (secos), sendo os últimos aqueles que vão tendo maior uso, porque espelham a sua elevada eficácia na recolha de poeiras (fíler recuperado), que podem ser integradas, contínua ou gradualmente, na composição das misturas betuminosas a produzir ou serem enviadas para um silo reservado ao efeito.

Os tanques de betume têm três tipos de processos de aquecimento. Este pode ser feito através de: chama direta, em que como o próprio nome indica a chama entra em contacto com o betume, traduzindo um aquecimento mais rápido, mas com maior prejuízo no envelhecimento do betume; caldeira oleotérmica, onde existe um circuito de óleo que aquece e transfere calor para o betume, evitando os problemas da chama direta; mais recentemente, surgiram os tanques aquecidos eletricamente, com vantagens a nível económico e de facilidade de operação.

É aconselhado colocar pelo menos dois silos para fíler comercial, mais um para fíler recuperado.

A central pode ou não ter capacidade de armazenamento para produto acabado, ou seja, silos de mistura pronta. Na obra não tinha e os camiões eram carregados diretamente dos misturadores.

Quer sejam contínuas ou descontínuas, as centrais podem também ser classificadas em função da mobilidade (J. O'Brien (CRH plc et al., 1998). Existem centrais móveis, cuja vantagem consiste na facilidade com que se pode mudar a sua localização e, por isso, são normalmente colocadas perto das obras para onde fornecem a mistura. Também existem centrais de carácter fixo, que não têm tanta facilidade para se mudarem de local, justificando-se colocá-las perto das pedreiras, para darem apoio a várias obras da região onde estão.

A grande maioria das centrais são fixas. Contudo, em certas obras há carência de centrais que facilmente se desmontam e transportam. Habitualmente este tipo de equipamento está dividido em módulos, que encaixam com relativa facilidade.

Depois de conhecidas as caracterizações das centrais e de se saber que só as descontínuas deviam ser utilizadas, resta apresentar os equipamentos usados na obra. Curiosamente, utilizaram-se duas centrais ao longo das várias etapas efetuadas e em função das necessidades, sendo uma fixa e a outra móvel.

A Mota-Engil tem uma central de betuminosos fixa na Herdade de Benafessim, em Montemor-o-Novo, junto à pedreira de onde são provenientes os agregados fornecidos à obra. Contudo, esta central representava tempos de percurso significativos, uma vez que estava à distância média de 60 km e, por esse motivo, optou-se por montar uma central móvel mais próxima (conhecida como central do Passil, a cerca de 350 m da rotunda de interseção da EN4 com a EN118), e transportar atempadamente os agregados desde Montemor, para formação de stocks.



Figura 5. 7 – A) Stock de agregado 0/6; B) Stock de agregado 6/10; [Fonte: Própria]

Ainda que com estas desvantagens, a central de Montemor acabou por ser utilizada em situação de avaria na central ao lado da obra e quando a capacidade instalada na mesma limitava a produção. Um exemplo dessa limitação foi precisamente na produção de SMA, que pelo facto da camada de desgaste ter sido colocada em contínuo, houve maior produção e teve de se recorrer à central da Mota-Engil.

A central do Passil é uma INTRAME UM 160, descontínua, onde o valor 160 do modelo indica que a central tem uma produção nominal de cerca de 160 ton/h de misturas betuminosas e o UM, indica o seu carácter ultra móvel. Esta característica consegue-se através do transporte de várias unidades móveis sobre rodas, que conferem uma incrível facilidade de montagem e permitem colocá-la próxima do local da obra (evitando gastos maiores com transporte de material). Quando a central chega ao estaleiro pode ser diretamente apoiada no terreno, caso o mesmo tenha resistência adequada para a receber, não sendo necessária a construção de fundações de betão para suportarem as cargas. No entanto, nesta obra em concreto essas fundações tiveram de ser construídas.

A UM 160 integra um misturador capaz de suportar 2000 kg e um tambor secador com 8,370 m de comprimento e 2,134 m de diâmetro.



Figura 5. 8 – Central de produção do Passil [Fonte: Própria]

A central de Montemor, está associada a uma pedreira, tendo um carácter fixo. Trata-se de uma INTRAME RM 200, central descontínua com uma produção nominal de aproximadamente 200 ton/h, munida de um tambor cilíndrico com 2,275 m de diâmetro e 9,010 m de comprimento.



Figura 5. 9 – Central de produção de Benafessim [Fonte: Própria]

Já foi mais que uma vez abordada a questão da adição de fibras que reduzem o escoamento. Mas na descrição da central não há registo de qualquer local para armazenamento ou sistema que permita introduzi-las na mistura. Pode suscitar a dúvida sobre a forma como se incorporam nas misturas tais aditivos! Na verdade, existem dois processos possíveis para tal procedimento: a dosagem automática ou a dosagem manual.

As centrais mais modernas e sofisticadas já estão preparadas para o fabrico de SMA, e por isso o mais banal é terem um sistema de dosagem automático. A marca INTRAME desenvolveu um sistema informatizado, com controlo da quantidade de fibras adicionadas centralizado na cabine de comandos. O sistema é constituído por uma tremonha e um sistema de alimentação e quando se dá ordem, o senfim de descarga abre e liberta no misturador a quantidade de aditivo pretendida.

Todavia, existem centrais que não estão munidas do sistema de dosagem automática e por isso a dosagem terá de ser adaptada às condições existentes, ou seja, é manual. É o caso de ambas as centrais utilizadas na obra da EN4.

Foram introduzidos sacos de fibras em material termo fundível, diretamente na central pelo operador, na quantidade necessária a cada amassadura, isto é, com o peso apropriado para a capacidade do misturador.



Figura 5. 10 – A) Sacos de fibras termo fundíveis; B) Central do Passil com sacos de fibras; C) Comporta para introdução das fibras no misturador; [Fonte: Própria]

5.2.2. TRANSPOSIÇÃO DO ESTUDO LABORATORIAL PARA A CENTRAL DE PRODUÇÃO

O estudo laboratorial estabeleceu uma fórmula da mistura, com percentagens de cada constituinte a utilizar e com as propriedades espectáveis dessa mesma mistura.

Todavia, quando se passou para a produção, os crivos não eram exatamente aqueles que se consideraram em laboratório e tiveram de ser feitos determinados ajustes para haver convergência entre a formulação e o produzido na central.

Esses ajustes têm origem num conjunto de ensaios que visam definir a composição da produção, dos quais, por se tratar de uma central descontínua, se devem indicar as granulometrias das frações crivadas provenientes de recolha nas tremonhas de material quente.

A metodologia de transposição para cada uma das centrais foi a seguinte:

- Colocaram-se os agregados nos doseadores de agregados;
- Fez-se a separação dos agregados, de acordo com as dimensões dos crivos da central, que são diferentes das frações granulométricas da composição laboratorial; (p.e., os crivos da central de Montemor são: 0/6, 6/12 e 12/16);
- Recolheu-se uma amostra de cada uma das frações separadas;
- Fez-se uma análise granulométrica das frações e traçou-se as respetivas curvas;
- A partir daqui fez-se a definição da percentagem de agregados a utilizar de cada fração, de modo a cumprir o fuso granulométrico estabelecido pelo CE da IP, tal como se faz na formulação da mistura em laboratório; as percentagens de cada fração são diferentes das do estudo, pois a separação das dimensões do agregado é díspar;
- A percentagem de fibras e a percentagem de betume não se alteram em relação à formulação, pelo que são de 0,4 e de 5,9 %, respetivamente;

Quadro 5.1 – Proporções dos componentes da mistura após transposição para a central de Montemor

COMPONENTE	DIMENSÃO	%
Betume	-	5,9
Fibras	-	0,4
Fíler comercial	-	8,8
Agregados	12/16	13,7
	6/12	47,8
	0/6	23,4

- Com as percentagens de agregados definidas foi possível cumprir o fuso do CE, conforme mostra o gráfico seguinte;

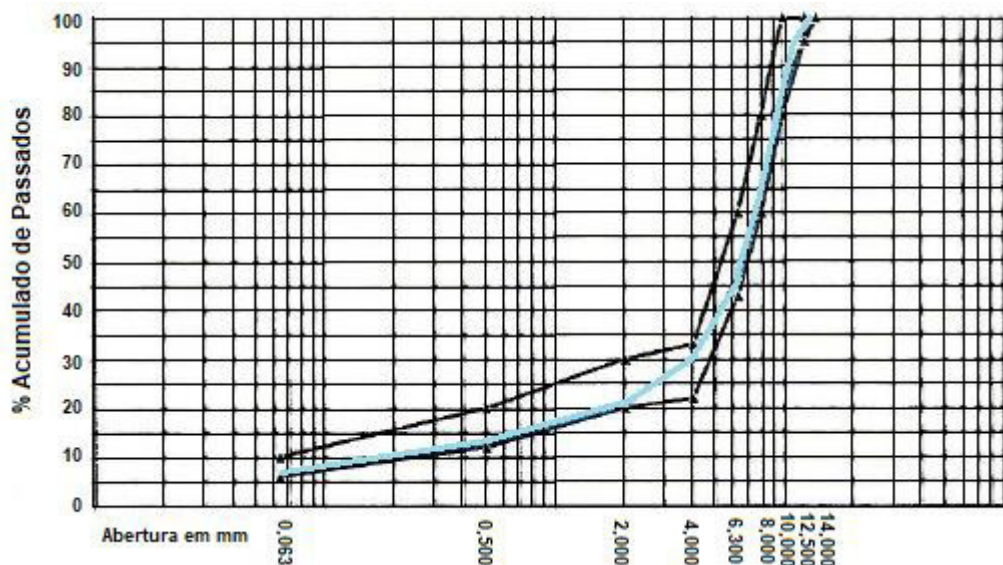


Figura 5. 11 – Curva granulométrica da mistura de agregados e respetivo fuso granulométrico após Transposição para a central de produção [Fonte: Excel]

- Produziu-se a mistura e procedeu-se a ensaios de conformidade para avaliar se cumpre as características predefinidas em CE (faz-se, p.e., extração de betume, análise granulometria, determinação da porosidade, etc.).

5.3. APLICAÇÃO DA MISTURA

5.3.1. TRECHO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

A construção do trecho experimental consiste numa fase indispensável para ajustar o processo construtivo e a fórmula de trabalho.

A sua execução pode ou não ser feita no local da obra, tendo um pouco em consideração a hierarquia viária e também aquilo que está predefinido pelo Dono de Obra. Se o trecho estiver relacionado com uma autoestrada, normalmente é feito em local à parte, fora da obra, embora com obrigatoriedade de garantir uma estrutura de pavimento com comportamento análogo ao real. Já se for uma obra numa estrada com nível hierárquico inferior é comum que o trecho seja construído na própria obra, onde não há risco de haver disparidades de comportamento na estrutura do pavimento.

Ora, por se tratar de uma estrada nacional, foi permitido construir o trecho experimental de SMA no local da obra. Aplicou-se o material betuminoso numa camada com a espessura preconizada em projeto (0,04 m), num comprimento de 200 metros (superior ao mínimo, de 100 m) e na largura de uma via, isto é, em 3,50 m (superior aos 2,50 m mínimos), recorrendo aos mesmos equipamentos de espalhamento e compactação que foram utilizados posteriormente na construção do pavimento.

Durante as várias etapas da construção do trecho houve necessidade de efetuar controlo de qualidade, para que o resultado fosse o melhor possível. Neste controlo fez-se:

- A verificação do cumprimento dos requisitos da mistura;
- A verificação das condições de transporte e espalhamento, registando a temperatura de cada fase e a trabalhabilidade que a mistura confere;

- O estabelecimento do esquema de compactação (número de passagens dos cilindros) e dos limites de temperatura de compactação;
- A averiguação da eficácia da compactação (inferindo sobre a adequabilidade dos equipamentos) e da porosidade após a aplicação da mistura betuminosa;
- A averiguação da regularidade do acabamento.

Após a construção do trecho tiveram de ser feitos ensaios às fórmulas e amostras necessárias, de modo a comprovar a conformidade de alguns parâmetros chave. Dentro destes estão essencialmente a percentagem de betume, a granulometria, as características mecânicas, o grau de compactação, embora outros requisitos pudessem ser impostos. Os resultados constam no anexo A3.

No primeiro trecho construído, todas as propriedades avaliadas nos ensaios efetuados estavam conforme os requisitos pré-estabelecidos. Caso contrário, dever-se-ia agir de imediato para corrigir os parâmetros que se achasse necessário. No limite, a própria fórmula de trabalho podia ser alterada! Assim que essas alterações fossem feitas, construir-se-ia um novo trecho, com repetição dos ensaios. Em suma, trata-se de um método iterativo que deve ser repetido tantas vezes quantas as que forem necessárias e só termina depois da aprovação da Fiscalização. Daí em diante é possível começar a aplicação das misturas betuminosas na obra.

Há um período mínimo a cumprir entre a construção do trecho experimental e a aplicação das misturas na obra que é definido pelo Dono de Obra (neste caso a IP), por norma, nunca inferior a 15 dias. Na EN4, definiram esse mínimo de 15 dias, mas entre as duas etapas passaram-se cerca de 22 dias, cumprindo confortavelmente o desfasamento.

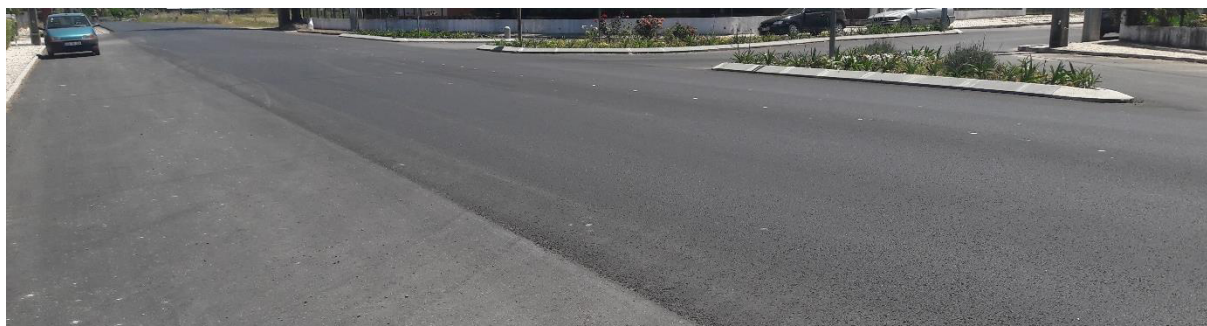


Figura 5. 12 – Trecho experimental em SMA11 [Fonte: Própria]

5.3.2. TRANSPORTE, APLICAÇÃO E COMPACTAÇÃO DA MISTURA

A partir do momento em que o trecho experimental foi aprovado começou-se a produzir a quantidade de SMA necessária para os gastos da empreitada.

Essa mistura foi transportada desde cada central de produção até ao local da aplicação através de camiões com reboques basculantes integrados (tipo Mercedes Arocs, Mercedes Actros ou MAN TGS), limitados a transportar até 25 toneladas por cada carga.

No transporte de Stone Mastic Asphalt não tem de existir qualquer cuidado especial relativamente a uma mistura tradicional e, assim sendo, a única questão tida em consideração foi garantir que todos os camiões tinham a carga devidamente coberta por uma “tela”, de modo a não haver quedas de material para a estrada, evitar a excessiva variação da temperatura da mistura e, por conseguinte, o “encrostamento superficial”.



Figura 5. 13 – Camiões com reboques basculantes integrados com tela de cobertura: A) Fechada; B) Aberta;
[Fonte: Própria]

Antes dos camiões chegarem à espalhadora, já tinha de estar aplicada a rega de colagem que permite adesão entre a camada betuminosa inferior e a de SMA. Depois dessa aplicação, os camiões punham-se em cima da “cola”, em frente à pavimentadora (no caso, da marca Volvo e modelo ABG7820), com a sua traseira adjacente à mesma, e efetuavam o procedimento normal, ou seja, descarregavam a mistura na tremonha de alimentação.

A pavimentadora, ia espalhando a mistura e ao mesmo tempo empurrando o camião até que o mesmo ficasse completamente vazio.

Neste processo era exigido o maior cuidado possível para evitar derrames de combustível, pois caso tivessem acontecido podiam interagir com o betume e alterar-lhe as propriedades.

Para entender o processo de espalhamento da mistura é preciso perceber como trabalha a pavimentadora! Esta contém tapetes rolantes que encaminham a mistura desde a tremonha de alimentação até ao parafuso sem-fim, onde é transversalmente distribuída e através do qual chega à mesa de espalhamento, onde sofre dois tipos de compactação: tamping, a primeira compactação por impactos sucessivos; vibração, a segunda forma de compactação, com um dispositivo constituído por excitadores excêntricos rotativos.

Para que a espessura da camada de desgaste aplicada mantivesse a cota de projeto em toda a extensão, teve de se controlar o material em frente à mesa, dado que um excesso de material fazia a mesa subir e um défice tinha efeito oposto, provocando irregularidades superficiais, essas que também podiam ter ocorrido caso a pavimentadora não tivesse um sistema “screed stop” (que evitava afundamento da mesa nas paragens) e um sistema “screed unload” (que fazia transferência de carga da mesa para o trator, de modo que a mesa não descesse).

À medida que a pavimentadora ia avançando, podia-se ver a formação de uma camada contínua e homogênea de SMA, fruto de todos os cuidados tidos *à priori*.



Figura 5. 14 – A) Camião a descarregar mistura SMA na pavimentadora; B) Mistura a sair na mesa de espalhamento e equipa de pavimentação; C) Pavimentadora ABG7820; [Fonte: Própria]

Ainda que, até ao momento, se tenham tido os maiores cuidados, usado os materiais e equipamentos mais adequados, as falhas registadas fossem minudências e só faltasse mesmo a última fase (compactação), tratava-se de uma etapa fulcral para garantir a qualidade final do pavimento. Bastava a compactação não garantir regularidade superficial e a qualidade do pavimento ficaria comprometida.

Antes de partir para a compactação da mistura espalhada e porque as paragens dos cilindros a meio do processo são prejudiciais à compactação da mistura, todos os cilindros utilizados sofreram ações de manutenção, de modo a não terem de o fazer durante os trabalhos. São título de exemplo destas ações: o enchimento dos depósitos de água e combustível, a lubrificação de peças, a verificação dos níveis do óleo e a limpeza dos rolos. Pela mesma razão, foram dadas instruções a todos os manobreadores de cilindros para efetuar o trabalho em contínuo, sem qualquer paragem sobre a mistura quente.

O facto de as misturas serem aplicadas a altas temperaturas tem ainda o inconveniente dos rolos aderirem às mesmas. Para resolver este problema, nos cilindros são incorporados aspersores de água, que a libertam uniformemente e em pouca quantidade sobre os seus rolos.



Figura 5. 15 – A) Cilindros HAMM HD90 desligados; B) e C) Cilindro HAMM HD90 ligado; D) Mancha de água libertada pelos aspersores; E) Aspersores ligados; [Fonte: Própria]

Em epígrafe, fala-se sempre em cilindros de rolos e nunca dos de pneus ou mistos. A verdade é que compactação de um SMA é talvez a fase mais importante da sua aplicação, precisamente por causa de não poder utilizar estes dois últimos cilindros.

Tanto os cilindros de pneus como os mistos têm o chamado “efeito de kneading” que tende a rearranjar as partículas numa estrutura diferente da descrita, ou seja, se tal fosse permitido, a estrutura apresentada no capítulo 3 deixaria de se observar, tirando significado ao SMA.

Os cilindros utilizados têm de ser (e foram) de compactação mediana, com cerca de 10 toneladas. A título ilustrativo, usaram-se cilindros tandem de rolos articulados “HAMM HD90”, embora outros do género pudessem ter sido usados, bastando cumprir os requisitos.

Os dois rolos dos cilindros são capazes de vibrar, função que não deve ser acionada na compactação da camada em geral. Apenas na compactação de juntas de trabalho longitudinais e transversais se ligava a vibração e no máximo em três passagens de cilindro.



Figura 5. 16 – Cilindros não utilizados na compactação de misturas SMA: A) misto; B) de pneus; Cilindros de rolos utilizados na compactação de SMA: C) Caterpillar CB-534D; D) HAMM HD90; [Fonte: Própria]

6.

ESTUDO DE PROPRIEDADES: ESCORRIMENTO E RUÍDO

Ao longo de todo o trabalho de pesquisa, muitas foram as propriedades mencionadas para avaliar numa mistura SMA. Não sendo possível avaliá-las todas no contexto desta dissertação, foram selecionadas duas delas.

Ao perceber que em algumas misturas SMA com fibras de celulose impregnadas e revestidas a betume, se juntavam ceras (principalmente em obras noturnas) e que existia o mesmo tipo de fibras que ao invés de betume utilizavam impregnações/revestimentos com ceras, tornou-se um objetivo averiguar se as últimas cumpriam tão bem a função principal (evitar drenagem de ligante) quanto as primeiras.

No ruído, verificando que autores distintos apresentavam resultados de ensaios ao ruído muito díspares, fazia sentido avaliar a propriedade para aferir se os resultados convergiam para algum dos analisados. No entanto, não sendo possível avaliar o ruído resultante do rolamento do pneu sobre o pavimento, optou-se por estudar uma situação muito específica e avaliar uma propriedade alternativa: ruído de percussão, quando o pavimento é assente numa laje de piso.

Se mais tempo houvesse mais haveria para avaliar! Mas sendo limitado, serão apresentadas sugestões para se desenvolverem futuramente.

6.1. COMPARAÇÃO DO EFEITO DAS FIBRAS DE CELULOSE REVESTIDAS A BETUME E A CERA NO ESCORRIMENTO DO LIGANTE

6.1.1. ENQUADRAMENTO

As misturas SMA, por terem uma quantidade de ligante superior, têm problemas de escorrimento. Como outrora tinha sido mencionado, as fibras são a forma mais comum de resolver estes dilemas e, ainda que já se tenham vindo a estudar diversos tipos de fibras alternativas às de celulose, são estas as comercializadas em larga escala (ou seja, são as que se utilizam comumente).

Também já foi referido que as fibras de celulose, quando granuladas e impregnadas, podem ter dois tipos de revestimento: o betume e a cera. A questão é, tendo uma fibra de celulose de boa qualidade revestida a betume (com 10 % de betume) e uma fibra de celulose de boa qualidade revestida a cera (com 20 % de cera) numa mistura SMA11, com 6 % de betume PMB 45/80-65 (o mesmo da obra acompanhada) e a mesma mistura de agregados em ambas, será indiferente utilizar uma ou outra fibra?

Para dar resposta à questão propus fazer um ensaio no Laboratório Central Mota-Engil, tendo sido aceite.

6.1.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

A primeira parte do ensaio consistiu no tratamento de ambas as fibras. Enquanto que em obra se introduzem as fibras necessárias no misturador da central de produção, onde a ação é suficientemente intrusiva para desagregar os grânulos, no laboratório estes não se desfazem e necessitam de ser desagregados para simular o que acontece na central. Face ao exposto, procedeu-se o ensaio de Los Angeles, de modo a triturar as fibras pela ação das esferas metálicas (embora fosse preferível não o fazer, pois o pó de fibra pode atuar como fíler e ter influência no escorrimento).

Como ilustram as figuras, as fibras foram armazenadas em tabuleiros até que se fizesse a pesagem das mesmas. Depois pesaram-se as quantidades necessárias de fibras e agregados, tendo sido colocados no misturador para se envolverem e secarem (aquecimento por chama).

Depois de tudo bem misturado, adicionou-se o betume pré aquecido à mistura agregados + fibras e continuou-se o processo até a mistura estar homogênea.

Efetuuou-se o procedimento 2 vezes, para produção das 2 misturas, cada uma com o seu tipo de fibras.



Figura 6. 1 – A) Equipamento do ensaio Los Angeles; B) Esferas metálicas; C) Fibras de celulose revestidas a betume trituradas; D) Fibras de celulose revestidas a cera trituradas; E) Pesagem dos materiais constituintes das misturas; F) Introdução dos materiais no misturador; G) Adição do betume; H) Aquecimento da mistura; [Fonte: Própria]

Após as misturas estarem prontas foram retiradas para um tabuleiro.

Os seis gobelés (três por mistura) foram aquecidos a 175°C durante 15 minutos e, de seguida, colocados na balança para registar a sua massa (W3, em gramas). Foram enchidos três gobelés com a mistura de fibras revestidas a cera e três gobelés com a mistura de fibras revestidas a betume e registou-se a massa dos conjuntos gobelé + mistura betuminosa (W4, em gramas).

De seguida, os gobelés foram à estufa a 175°C durante 1 hora. Após este período, controlou-se a temperatura da mistura (com termómetro laser da figura 6.2) e concluiu-se o ensaio, vazando rapidamente a mistura com fibras de celulose revestidas a cera de dois gobelés e vazando a do terceiro gobelé durante 10 segundos. Findo este processo, registou-se somente a massa de cada gobelé com o ligante retido após vazamento da mistura (W5, em gramas), procedendo aos cálculos (BD, em %).

Procedeu-se de igual forma para a mistura betuminosa com fibras de celulose revestidas a betume.

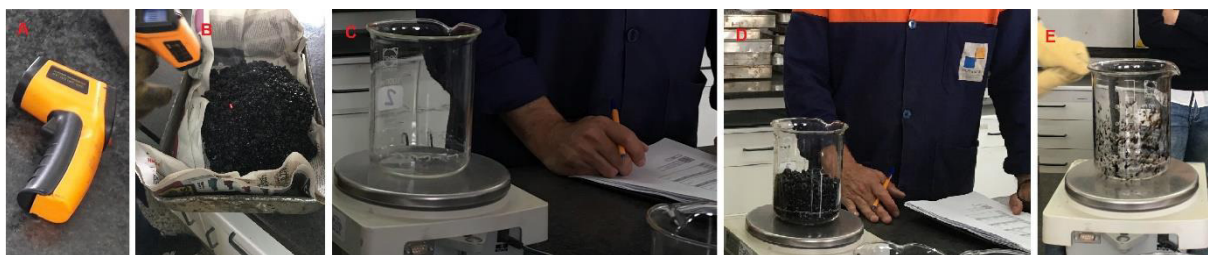


Figura 6. 2 – A) e B) Termómetro laser; C) Pesagem dos gobelés vazios; D) Pesagem dos gobelés + misturas SMA; E) Pesagem dos gobelés após escorrimento; [Fonte: Própria]

6.1.3. RESULTADOS E CONCLUSÕES

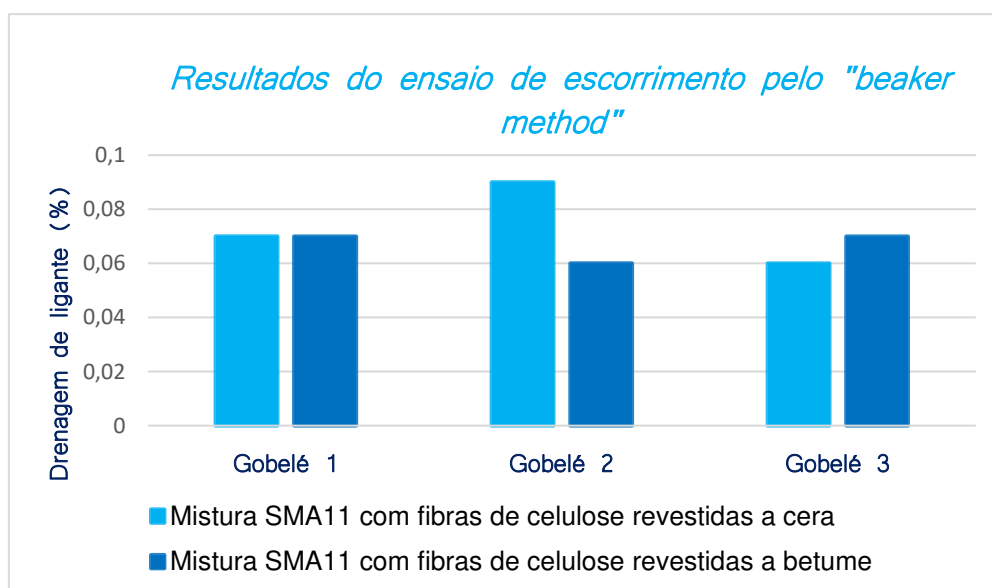
Cada uma das grandezas registadas durante os ensaios foram anotadas nos quadros 6.1 e 6.2, de modo a calcular BD, isto é, a percentagem de betume que escorreu.

Quadro 6.1 – Resultados do ensaio de escorrimento da mistura SMA11 com fibras de celulose revestidas a cera

6,0% BETUME	W3 (g)	W4 (g)	W5 (g)	BD (%)	T (°C)
Gobelé 1	242,62	1265,1	243,33	0,07	175
Gobelé 2	240,69	1246,2	241,56	0,09	
Gobelé 3	260,9	1266,9	261,5	0,06	

Quadro 6.2 – Resultados do ensaio de escorrimento da mistura SMA11 com fibras de celulose revestidas a betume

6,0% BETUME	W3 (g)	W4 (g)	W5 (g)	BD (%)	T (°C)
Gobelé 1	216,02	1222,8	216,76	0,07	175
Gobelé 2	266,92	1268	267,5	0,06	
Gobelé 3	262,9	1272,3	263,61	0,07	



Pela análise dos resultados é perceptível que para este fuso granulométrico e percentagem de betume, tanto as fibras de celulose revestidas de cera como as revestidas a cera são capazes de evitar a drenagem de ligante da mistura SMA em causa.

Na obra da EN4 podia ter-se equacionado qualquer um dos dois tipos de fibras, não fosse a IP exigir especificamente utilizar as fibras de celulose revestidas a betume. No entanto, ainda que houvesse possibilidade de incluir as fibras de celulose revestidas a cera, estas para serem de boa qualidade (20% de cera impregnada) podem representar custos maiores e não são interessantes pois não acrescentariam nada numa obra executada em período diurno e com temperaturas elevadas.

Já se a obra fosse em período noturno ou em zonas frias, a mistura experimental teria temperaturas menores e, por isso, usar fibras revestidas a ceras podia ser interessante para estabilizar a temperatura da mistura, embora se possam ter de acrescentar diretamente ceras (para além das contidas nas fibras) se se achar necessário.

Assim, se a exigência do uso das fibras for apenas o escorrimento, é irrelevante usar qualquer uma das fibras utilizadas. Se por ventura houver interesse em outras propriedades além desta, então devem ser feitos ensaios adequados às abordagens pretendidas.

Apesar daquilo que foi feito ser o comum e os valores obtidos mostrarem que o escorrimento fica muito aquém do valor limite de escorrimento (0,30 %), não se deve deixar em claro que o ponto de partida deste ensaio pode ter influência nos resultados, pelo que, num próximo estudo, se aconselha vivamente a fazer os ensaios com misturas recolhidas na central e após o transporte. Por um lado, evita ter de se triturar as fibras, que atuam como “filer” na mistura produzida (diminuindo o escorrimento em laboratório, mas não correspondendo exatamente com o que se passa nas misturas da central de produção) e por outro, por serem recolhidas após o transporte já foram submetidos à fase de maior suscetibilidade ao fenómeno.

6.2. CARACTERIZAÇÃO DO SMA11 AO RUÍDO DE PERCUSSÃO E COMPARAÇÃO COM O AC14 TRADICIONAL

6.2.1. ENQUADRAMENTO

As misturas do tipo SMA são conhecidas por diminuírem o ruído ao rolamento entre pneu e pavimento.

Para conseguir caracterizar a redução do ruído de uma mistura SMA11 face a uma mistura tradicional AC14 devia-se planear um ensaio com o sonómetro e avaliar o ruído na interface entre duas superfícies (cada uma com um destes materiais) durante um determinado período de tempo.

Ainda que este ensaio tivesse sido feito no âmbito desta dissertação (o que não aconteceu devido à falta de condições para o efeito), é muito suscetível a erros. Basta, por exemplo, um ruído a quilómetros de distância, a queda de um pequeno objeto perto do aparelho de medição ou o vento soprar a uma velocidade igual ou superior a 5 m/s, e as medições estão influenciadas, ou seja, perdem credibilidade.

Além das medições poderem conter tais erros, o fuso granulométrico escolhido, também influencia os níveis de ruído medidos: para diminuir a geração de ruído ao rolamento, o SMA das camadas de desgaste deve ter menor dimensão do agregado, ao contrário das camadas inferiores, que devem ter maior dimensão para aumentar a porosidade e poder “aproveitar as propriedades de absorção sonora dos pavimentos porosos” (Pereira, 2010). Se tal não se verificar, o ruído tende a ser superior...

São as razões apresentadas que justificam a discrepância de valores entre o que refere a IP (redução de 1 a 2 dB, face às misturas tradicionais) e o que refere Martinho, Nunez e Lanchas (2013) (redução de até 7 dB, face às misturas tradicionais).

O ideal era conseguir fazer este ensaio com condições controladas à escala real, isto é, ter um laboratório suficientemente grande, onde os veículos passassem e só se registasse o ruído que verdadeiramente surge no contacto pneu/pavimento. Como é óbvio não é viável fazer tal coisa, dado o espaço necessário!

Após ter exposto esta situação ao laboratório de acústica da FEUP, experimentou-se uma caracterização acústica diferente da habitual ao rolamento. A ideia passou por comparar o comportamento da mistura SMA11 e da mistura AC14 ao ruído de percussão. É verdade que os dois tipos de ruído não têm que ver um com o outro, mas a dúvida era: se se diz que a mistura SMA11 é tão redutora ao ruído do contacto pneu/pavimento, será que pode reduzir o ruído de percussão?

O ruído de percussão acontece por consequência da excitação mecânica de um elemento estrutural, porque a sua rigidez é propícia à propagação das ondas elásticas formadas durante o fenómeno. Estas podem propagar-se com facilidade em edifícios e serem audíveis bastante longe do local onde são produzidas (Pedroso, 2007).

A verdade é que esta propriedade não necessita de ser garantida numa estrada, mas imagine-se, por exemplo, uma cobertura de um centro comercial. Normalmente têm uma laje de betão armado com isolamento acústico apropriado, pois existem sempre lombas ou depressões que provocam o impacto dos rodados quando passam pelas mesmas.

Ora, essa laje é sempre bastante dispendiosa e, se o pavimento utilizado fosse um SMA11 e este permitisse uma forte redução ao ruído de percussão, talvez se pudesse reduzir os custos com a laje e respetivo isolamento acústico.

Para avaliar esta propriedade, primeiro serraram-se placas de pavimento “*in situ*”, em trechos experimentais, de SMA11 e AC14, ambas de dimensões 60x45 cm. Depois, já no laboratório de acústica da FEUP, no interior das câmaras reverberantes e com a máquina de percussão normalizada Brüel & Kjaer (modelo 3204), testaram-se ambas as amostras de pavimento.

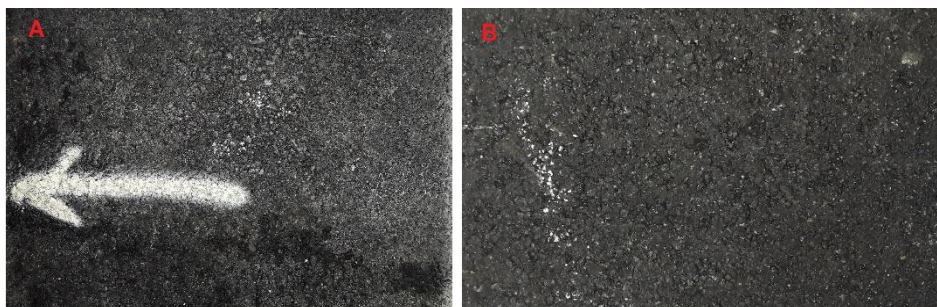


Figura 6. 3 – Placa serrada de: A) SMA11; B) AC14; [Fonte: Própria]

Este ensaio não está normalizado para a maneira como foi feito, uma vez que, entre outras exigências, deviam existir 4 microfones recetores e era preciso amostras com 10 m², o que não acontece. Ainda assim, permite ter uma noção dos valores para cada mistura estudada.

6.2.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

O ensaio consistiu em colocar a máquina de percussão normalizada Brüel & Kjaer na câmara reverberante do piso superior, provocar impactos sucessivos com os seus 5 martelos alinhados (uma espécie de “sapateado” normalizado, com 10 impactos por segundo) em cada um dos pavimentos em análise (SMA11 e AC14) e no pavimento de referência, isto é, na laje de espessura uniforme e em betão armado que separa as duas câmaras reverberantes.

Em cada um dos pavimentos fez-se a máquina ocupar quatro posições diferentes, rodadas de 45°, provocando o campo sonoro em cada posição.



Figura 6. 4 – Máquina de impactos normalizada Brüel & Kjaer na câmara reverberante emissora (piso superior) em diferentes posições: A) Posição 2; B) Posição 3; C) Posição 4; [Fonte: Própria]

Em simultâneo, no piso térreo, dentro da câmara reverberante recetora, colocaram-se três microfones nos vértices de um quadrado fazendo uma medição inicial. Depois trocaram-se as posições dos microfones desde os vértices até aos pontos médios desse quadrado e fez-se uma nova medição.



Figura 6. 5 – Microfones na câmara reverberante recetora (piso térreo) em diferentes posições: A) Posição 1; B) Posição 2; [Fonte: Própria]

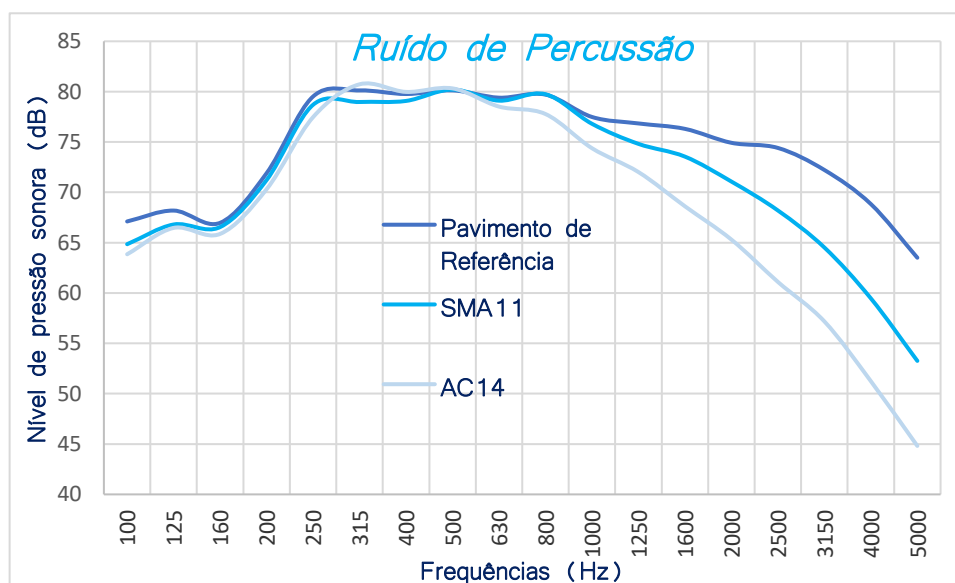
Para cada rotação de 45° da máquina de impactos, obtiveram-se dois conjuntos de registos em função das posições dos microfones. No total, para cada frequência registaram-se 24 medições do ruído na câmara inferior (4 posições da máquina x 2 posições dos microfones x 3 microfones = 24 registos). Este elevado número de registos do nível de pressão sonora (dB) permitiu fazer uma média mais equilibrada.

6.2.3. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os microfones mediram o ruído para frequências entre os 16 e os 12500 Hz. No entanto, apenas interessa analisar os dados relativos às frequências de 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000 e 5000 Hz. Para cada uma dessas frequências fez-se a média do nível de pressão sonora das 24 medições executadas, obtendo os valores do quadro seguinte.

Quadro 6.3 – Resultados do ensaio ao ruído de percussão

FREQUÊNCIA (Hz)	LAJE DE BETÃO (dB)	SMA11 (dB)	AC14 (dB)
100	67,11	64,85	63,85
125	68,19	66,81	66,47
160	66,97	66,55	65,87
200	71,90	71,21	70,31
250	79,52	78,70	77,47
315	80,12	78,97	80,73
500	79,77	79,08	79,97
630	80,12	80,21	80,32
800	79,40	79,10	78,52
1000	79,71	79,74	77,78
1250	77,49	76,81	74,38
1600	76,84	74,81	72,01
2000	76,31	73,55	68,61
2500	74,92	71,07	65,31
3150	74,41	68,20	61,10
4000	72,22	64,52	57,18
5000	68,83	59,47	51,24



Os resultados do ensaio vêm confirmar que não existe ligação entre o ruído ao rolamento (do contacto entre o pneu e o pavimento) e o ruído de percussão.

Na verdade, a mistura SMA11 e a AC14 tem um comportamento próximo para as frequências mais importantes (baixas e médias). Conquanto, nas frequências mais elevadas, o SMA11 tem um pior comportamento que o AC14, pois os registos confirmam maiores níveis de pressão sonora na câmara reverberante recetora.

Assim, não constitui qualquer vantagem, do ponto de vista acústico, usar SMA11 numa laje de cobertura (como por exemplo, na de um shopping) em detrimento de uma mistura tradicional, pois nem uma nem

outra reduzem a transmissão do ruído desde o pavimento até ao resto de um edifício (valores de níveis de pressão sonora idênticos aos da laje de betão, sem qualquer revestimento do piso).

Outras soluções devem ser testadas para que os pavimentos betuminosos melhorem esta propriedade. Neste momento, há quem investigue misturas betuminosas com borrachas, dado que as propriedades desse material ajudam a melhorar a redução da transmissão do ruído de percussão resultante de impactos.

7.

CONCLUSÕES

7.1. CONCLUSÕES GERAIS

Após análise cuidada de toda a investigação contida nesta dissertação, é inevitável concluir que, embora as misturas do tipo Stone Mastic Asphalt já contem com mais de meio século de existência, em Portugal, continuam envolvidas numa penumbra de indefinição.

Há propriedades elencadas pela maioria dos estudos realizados em países estrangeiros, entre elas a resistência à fadiga superior (embora acabe por não ser condicionante em camadas de desgaste), o aumento do módulo de rigidez, a diminuição da deformação permanente e, por conseguinte, a maior durabilidade dos pavimentos com camadas destas misturas. Porém, não tem existido o cuidado de confirmar essas propriedades nas misturas produzidas no país, acabando por confiar em estudos anteriores e apontar essas propriedades como garantidas.

Quem trabalha com estas misturas e quem comercializa os seus materiais constituintes vem muitas vezes reforçar a ideia de superioridade de tais misturas face às demais, apresentando as propriedades supramencionadas, mas não há um investimento significativo na avaliação daquilo que se diz. A desinformação é notável!

Portanto, a maior ilação a retirar é que, na mesma medida que tem crescido o interesse pela aplicação de SMA, deveria também aumentar o investimento no estudo das suas propriedades, mais que não fosse para provar que o maior investimento inicial neste produto se espelha em custos de manutenção menores, ou seja, que a longo prazo o investimento é compensatório!

Ao contrário das propriedades anteriores, que não são visíveis (têm de ser avaliadas com ensaio próprio), a percentagem de betume superior face às restantes misturas é uma característica frequentemente apontada, que faz parte de qualquer definição de SMA e que se constata facilmente após a determinação da percentagem ótima de betume com o estudo de Marshall. Devido a esta componente ter um peso económico muito significativo na mistura betuminosa, há uma tendência natural do empreiteiro querer reduzi-la. Pelo facto de a qualidade do produto ser superior com o aumento de betume, a tendência é o D.O. querer aumentá-lo. Cria-se um conflito entre as duas partes, que a meu ver pode ser solucionado se o D.O. começar a assumir/pagar a fatura do ligante, à parte do preço da obra.

A maior proporção de ligante provoca problemas de escorrimento. Tendo estudado várias formas de solucionar a questão, face ao que existe atualmente no mercado, constata-se que são as fibras de celulose impregnadas e revestidas que atualmente constituem a solução mais viável aos problemas em epígrafe. O material para revestimento pode ser betume ou ceras. Desde que sejam ambos de boa qualidade, ficou

provado que qualquer um minimiza o escoamento de ligante, pelo que utilizar a cera só é propícia em obras em que a mistura experimente temperaturas mais baixas.

Ainda quanto às fibras, não é certo que os produtos do mercado tenham todos boa qualidade. Existem impregnações e revestimentos com menores quantidades de betume ou cera que as necessárias à boa qualidade das fibras e, por essa razão, é sempre necessário avaliar o escoamento para a fibra escolhida.

Há autores a afirmar que, do ponto de vista do escoamento, se pode substituir as fibras por betume modificado, mas tal devia ser analisado com maior cuidado. A conclusão pode ser precipitada se a temperatura a que o estudo foi feito permitir viscosidades elevadas do betume na mistura. Caso a temperatura seja aumentada, o betume “perde” parte viscosa, não sendo certo que evite a drenagem de ligante desde o fabrico à aplicação.

Na mesma medida que há incerteza nas propriedades que as misturas SMA garantem, também há uma indefinição dos valores limites de cada uma delas, isto é, não existe um documento ao nível nacional que defina claramente parâmetros a cumprir na formulação das misturas, uniformizando a produto.

Todos estes motivos fazem com que hajam algumas dúvidas e receios na escolha destas misturas, embora hajam relatos que os pavimentos por elas constituídos têm funcionado muito bem.

Em oposição do que vem sido descrito, se por um lado ainda existem estas lacunas a serem revistas daqui em diante, que limitam a utilização de SMA, por outro lado a formulação e aplicação pouco trazem de novidade em relação às misturas tradicionais, o que é agradável, pois o processo já está assimilado.

A formulação conta apenas com a diferença no número de pancadas por face com que se compactam os provetes para o ensaio Marshall e a aplicação apenas carece de cuidados na compactação, pois devem ser usados cilindros de rolos com vibração desligada. Sumariamente, muito fácil adaptar!

Em suma, há quase 15 anos produziram-se as primeiras misturas SMA em Portugal, e durante todo este tempo vem aumentando gradualmente o seu uso nas mais diversas obras de pavimentação. Não deixa de ser curioso que a aplicabilidade aumente e o conhecimento pouco tenha evoluído. Num país em que o paradigma da reabilitação de estradas está instalado e em que parece fazer sentido utilizar SMA nesse fim, não há como não incentivar pessoas da área a pesquisar mais sobre o assunto, dando um pequeno contributo no estudo de cada parâmetro e adaptando a EN 13108-5 ao país.

Esta investigação foi um pequeno contributo nesse sentido. Além do ensaio de escoamento cujas conclusões já foram expostas, fez-se o ensaio ao ruído de impacto, da qual se esclarece que as misturas SMA (especificamente SMA11) não são capazes de o reduzir significativamente.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Ao longo da dissertação podem ler-se alguns comentários acerca da necessidade de num futuro próximo se desenvolverem estudos que visam conhecer melhor as misturas Stone Mastic Asphalt.

Há necessidade de estudar alguns parâmetros que facilmente se consegue fazer e outros, cujo nível de dificuldade exigirá maior dedicação. Mas como diz o célebre provérbio chinês: “Onde há uma vontade, há um caminho.” e acredito que no futuro darão resposta a muitos dos pontos expostos em seguida.

Desde logo começando pelos materiais constituintes da mistura. No que diz respeito ao ligante, devem ser feitos ensaios para avaliar se com o betume puro, normalmente utilizado na Alemanha, é ou não possível aumentar a quantidade de ligante na mistura (pode, por exemplo, existir alguma incompatibilidade das fibras com os polímeros do betume modificado que impeçam a % ótima de

betume de atingir valores mais elevados). Não faz sentido usar sempre o betume modificado, sem experimentar o mais simples de todos, isto é, o puro. Na mesma linha de pensamento, devem testar-se misturas com porosidades inferiores às atualmente praticadas e, verificar de tal percentagem aumenta.

Relativamente aos aditivos, especificamente nos utilizados para evitar o escorrimento de ligante da mistura, deve-se começar por aferir se os atualmente comercializados em grande escala (fibras de celulose impregnadas e revestidas com betume ou cera), podem ter outros benefícios na mistura, nomeadamente ao nível das propriedades mecânicas, que justifiquem utilizar-se em detrimento de outras soluções, outrora abordadas. Caso as fibras só existam para resolver o problema do escorrimento, faz sentido investigar materiais mais económicos, como os reciclados, bem como as vantagens da utilização de cada um. Na eventualidade de se chegar à conclusão que existem compostos melhores que as fibras, quem sabe industrializa-los e marcar uma nova era no SMA.

Quanto às propriedades em geral, já se apontou para a necessidade de reunir entidades competentes, nomeadamente representantes de empresas que têm ganho alguma experiência na aplicação do material, e, juntos, tentarem estabelecer um documento normativo (tipo o Anexo Nacional da NP EN 13108-1). Como vem sido descrito, esta necessidade surge da EN 13108-5 vir num contexto muito geral, definir intervalos de valores para todas as propriedades e ser necessário especificar as propriedades que interessam avaliar e declarar em Portugal, bem como os valores limite das mesmas. Como é evidente cada país tem características únicas, pelo que tem todo o sentido fazer este enquadramento.

A rigidez é uma propriedade particularmente interessante. Embora a maioria das entidades portuguesas, mesmo empresas dedicadas ao projeto de vias rodoviárias, apontam para a maior durabilidade de uma mistura SMA, mas não são capazes de quantificar o módulo de rigidez da mistura. Devem pensar em fazê-lo, de modo que, no dimensionamento do pavimento, possam poupar material aproveitando as características do mesmo.

A fadiga pode ser posta em causa tendo em consideração o modo como as tensões são distribuídas pelo esqueleto pétreo (por compressão), isto porque as leis de fadiga estão associadas às tensões de tração por flexão que o pavimento vai sofrendo ao longo da sua vida útil. Seria distintamente importante que se estudasse o comportamento, inferindo se realmente faz sentido dimensionar os pavimentos com SMA à fadiga, através do critério de fadiga dos critérios de ruína banalmente utilizados (da SHELL).

Em Portugal já se tem feito alguns ensaios sobre o ruído ao rolamento do pneu sobre o pavimento. Ainda assim, as conclusões não são muito concisas, dada a dispersão dos resultados. Penso que é necessário um estudo mais aprofundado sobre esta propriedade, e em cada tipo de SMA (SMA8, SMA11, ...) caracterizar-se a redução sonora comparativamente a outras misturas, pois, até como já foi mencionado nesta dissertação, o ACVTL e o PA têm como vantagem a redução de ruído, e convém perceber se o SMA pode competir com estas misturas quanto a esta propriedade.

Por último, não só nas SMA mas também nas misturas em geral, vem-se começando a evoluir para a formulação SUPERPAVE em detrimento da formulação Marshall. O futuro deve passar por equipar os laboratórios e formar os técnicos nacionais nesta nova metodologia, pois tudo aponta para uma mudança iminente. A verdade é que a nova versão da EN 13108-5, já analisada no capítulo 4, aponta para essa alteração, quando diz que foi adicionada uma abordagem fundamental, misturada com uma abordagem empírica anterior e que apesar de se estar a caminhar para a formulação SUPERPAVE, ainda é comum utilizar o estudo de Marshall, dada a experiência adquirida e a sensibilidade aos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIOLA, O. S. [et al.] (2014) - Utilisation of natural fibre as modifier in bituminous mixes: A review. Construction and Building Materials [Em linha]. 54: 305-312. ISSN 09500618.
- AFONSO, João; GOMES, Luís (2016) - Misturas betuminosas do tipo SMA – A experiência da Mota-Engil Engenharia e Construção.
- AHAMMED, M. A.; TIGHE, S. L.; KLEMENT, T. (2010) - Quiet and durable pavements: Findings from an Ontario study. Canadian Journal of Civil Engineering [Em linha]. 37:8. 1035-44. Disponível em WWW: <URL: <http://dx.doi.org/10.1139/L10-041>>. ISSN 0315-1468.
- AHMADINIA, Esmaeil [et al.] (2011) - Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt. Materials & Design [Em linha]. 32:10. 4844-4849. ISSN 02613069.
- AI, Al-Hadidy; YI-QIU, Tan; HAMEED, Ayman Talib (2011) - Starch as a modifier for asphalt paving materials. Construction and Building Materials [Em linha]. 25:1. 14-20. ISSN 09500618.
- AL-HADIDY, A. I.; TAN, Yi-qiu (2009) - Mechanistic analysis of ST and SBS-modified flexible pavements. Construction and Building Materials [Em linha]. 23:8. 2941-2950. ISSN 09500618.
- AMIRKHANIAN, Armen N.; XIAO, Feipeng; AMIRKHANIAN, Serji N. (2011) - Characterization of Unaged Asphalt Binder Modified with Carbon Nano Particles. International Journal of Pavement Research and Technology [Em linha]. 4:5. 281-286. ISSN 1997-1400.
- ARSHAD, Ahmad Kamil [et al.] (2016) - Performance of Stone Mastic Asphalt Mix Using Selected Fibres. Jurnal Teknologi [Em linha]. 78:7-2. ISSN 2180-3722
- 0127-9696.
- BAGHAEE MOGHADDAM, Taher; KARIM, Mohamed Rehan; SYAMMAUN, Tamalkhani (2012) - Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles. Construction and Building Materials [Em linha]. 34: 236-242. ISSN 09500618.
- BATISTA, Fátima (2010) - Formulação de misturas do tipo SMA com fibras.
- BATISTA, Fátima [et al.] (2012) - Aplicações de misturas betuminosas de elevado desempenho em redes viárias urbanas. In Jornadas LNEC. Engenharia para a sociedade. Inovação e investigação. Cidades e desenvolvimento. Lisboa: 2012. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. p. 24.
- BRANCO, Fernando; PEREIRA, Paulo; SANTOS, Luís Picado (2006) - Pavimentos Rodoviários.
- CARVALHO, António José Charneca (2012) - Estudo de utilização de fibras em misturas betuminosas. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 133 p. Dissertação de Mestrado Integrado.
- CEN (2003a) - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens. EN 12697-8. European Committee for Standardization.
- (2003b) - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking. EN 12697-22. European Committee for Standardization.
- (2007) - Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using test data from reaction to fire tests. EN 13501-1. European Committee for Standardization.
- (2008) - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens. EN 12697-12. European Committee for Standardization.
- (2009a) - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density. EN 12697-5. European Committee for Standardization.
- (2009b) - Tests for geometrical properties of aggregates - Part 9: Assessment of fines - Methylene blue test. EN 933-9. European Committee for Standardization.

- (2010) - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 44: Crack propagation by semi-circular bending test. EN 12697-44. European Committee for Standardization.
- (2012a) - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens. EN 12697-6. European Committee for Standardization.
- (2012b) - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue. EN 12697-24. European Committee for Standardization.
- (2012c) - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness. EN 12697-26. European Committee for Standardization.
- (2012d) - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation by impact compactor. EN 12697-30.
- (2012e) - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test. EN 12697-34. European Committee for Standardization.
- (2013a) - Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas. EN 13043. European Committee for Standardization.
- (2013b) - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 41: Resistance to de-icing fluids. EN 12697-41. European Committee for Standardization.
- (2014a) - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 43: Resistance to fuel. EN 12697-43. European Committee for Standardization.
- (2014b) - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 49: Determination of friction after polishing. EN 12697-49. European Committee for Standardization.
- (2016a) - Bituminous mixtures - Material specifications - Part 8: Reclaimed asphalt. EN 13108-8. European Committee for Standardization.
- (2016b) - Bituminous mixtures - Material specifications - Part 20: Type Testing. EN 13108-20. European Committee for Standardization.
- (2016c) - Bituminous mixtures - Material specifications - Part 21: Factory Production Control. EN 13108-21. European Committee for Standardization.
- (2016d) - Bituminous mixtures - Materials specifications - Part 5: Stone Mastic Asphalt. EN 13108-5. European Committee for Standardization.
- (2016e) - Bituminous mixtures - Test methods - Part 16: Abrasion by studded tyres. EN 12697-16. European Committee for Standardization.
- (2016f) - Bituminous mixtures - Test methods - Part 25: Cyclic compression test. EN 12697-25. European Committee for Standardization.
- (2016g) - Bituminous mixtures - Test methods - Part 35: Laboratory mixing. EN 12697-35. European Committee for Standardization.
- (2017a) - Bituminous mixtures - Test methods - Part 18: Binder drainage. EN 12697-18. European Committee for Standardization.
- (2017b) - Bituminous mixtures - Test methods - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens. EN 12697-23. European Committee for Standardization.
- (2017c) - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 13: Temperature measurement. EN 12697-13. European Committee for Standardization.
- CEPSA PORTUGUESA, Petróleos (2018) - Manual de Pavimentação. 3. Espanha:
- COUTINHO, Joana de Sousa (2004) - Apontamentos das aulas teóricas de Materiais de Construção 1. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- EAPA (2007) - Long-Life Asphalt Pavements - Technical version. [Em linha].
- EP (2008a) - Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários. Gabinete de Gestão da Rede. EP - Estradas de Portugal, S.A.
- (2008b) - Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários. Volume 1: Projecto de Reabilitação. Gabinete de Gestão da Rede. EP - Estradas de Portugal, S.A.
- (2008c) - Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários. Volume 2: Gestão da Conservação. Gabinete de Gestão da Rede. EP - Estradas de Portugal, S.A.

- FARUK, A. N. [et al.] (2014) - Application of Nano-Technology in Pavement Engineering: A Literature Review. Reston, VA, USA, 2014. American Society of Civil Engineers.
- FREIRE, Ana Cristina [et al.] (2004) - Agregados para misturas betuminosas, LNEC. In Palestra. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciência e Tecnologia: 2004.
- GARCÍA-TRAVÉ, G. [et al.] (2018) - Mechanical Performance of SMA Mixtures Manufactured with Reclaimed Geomembrane-Modified Binders. Journal of Materials in Civil Engineering [Em linha]. 30:2. 04017284. ISSN 0899-1561
- 1943-5533.
- GARDETE, Dinis; SANTOS, Luís Picado; CAPITÃO, Silvino (2011) - Formulação volumétrica e desempenho de misturas betuminosas Stone Mastic Asphalt. In In Congresso Ibero-LatinoAmericano del Asfalto. Rio de Janeiro: 2011. 16. [Consult. 20-25 de Novembro]. p. 1-9.
- GARRIDO, Alberto [et al.] (1998) - Misturas betuminosas - Contribuição para a normalização do fabrico e da aplicação. Portugal:
- GILSON COMPANY, Inc (2018) - .
- GROUP, Controls (2018) - . Disponível em WWW: <http://www.controls-group.com/backend/prodotti/img_upload/img_big/1203080910100_1_75_b0019_a_75_b0019_a.jpg>.
- HERRÁIZ, Teresa Real [et al.] (2016) - Posidonia oceanica used as a new natural fibre to enhance the performance of asphalt mixtures. Construction and Building Materials [Em linha]. 102: 601-612. ISSN 09500618.
- IPQ (2011) - Misturas betuminosas - Especificações dos materiais - Parte 1: Betão betuminoso. NP EN 13108-1. Instituto Português da Qualidade.
- J. O'BRIEN (CRH PLC, IRL) [et al.] (1998) - Environmental Guidelines on Best Available Techniques (BAT) for the Production of Asphalt Mixes. Breuckelen, Holanda: EAPA. ISBN 90-801214-9-5.
- JACINTO, Manuel António Sobral Campos (2003) - Caracterização Estrutural de Pavimentos. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 206 p. Dissertação de Mestrado.
- JAE (1995) - Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional.
- KÖK, Baha Vural; YILMAZ, Mehmet; ERKUS, Yunus (2017) - Effects of graphite on mechanical properties of stone mastic asphalt pavement. Journal of Civil Engineering and Management [Em linha]. 23:8. 1013-1020. ISSN 1392-3730
- 1822-3605.
- KORDI, Zeiaolhagh; SHAFABAKHSH, Gholamali (2017) - Evaluating mechanical properties of stone mastic asphalt modified with Nano Fe₂O₃. Construction and Building Materials [Em linha]. 134: 530-539. ISSN 09500618.
- KUMAR, Pawan [et al.] (2011) - Use of Jute Fibre in Stone Matrix Asphalt. Road Materials and Pavement Design [Em linha]. 5:2. 239-249. ISSN 1468-0629
- 2164-7402.
- KUO, Ming Feng; DU, Jia Chong; SHEN, Der Hsien (2010) - Crushed Waste Concrete in Stone Mastic Asphalt Mixtures. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering [Em linha]. 5:3. 164-168. ISSN 1822-427X
- 1822-4288.
- LIPHARDT, Adam; KRÓL, Jan; RADZISZEWSKI, Piotr (2016) - Influence of Polymer Modified Binder Content from RAP on Stone Mastic Asphalt Rutting Resistance. Procedia Engineering [Em linha]. 153: 407-413. ISSN 18777058.
- MANOSALVAS-PAREDES, Mario [et al.] (2016) - Rubber modified binders as an alternative to cellulose fiber – SBS polymers in Stone Matrix Asphalt. Construction and Building Materials [Em linha]. 121: 727-732. ISSN 09500618.

- MARTINHO, Fernando [et al.] (2013) - A Experiência Portuguesa em Misturas Betuminosas do tipo SMA com Fibras Celulósicas. In Atas do 7º Congresso Rodoviário Português Lisboa, Portugal: 2013.
- MARTINHO, Fernando; NUNEZ, Ruy; LANCHAS, Santiago (2013) - Misturas betuminosas de grande durabilidade e alto desempenho
- MIRANDA, Henrique [et al.] (2013) - Análise comparativa de métodos de ensaio para avaliação do escorrimento, em misturas betuminosas do tipo Stone Mastic Asphalt, segundo a norma europeia EN 12697-18. In Atas do 7º Congresso Rodoviário Português. Lisboa, Portugal: 2013.
- MOREA, F.; ZERBINO, R. (2018) - Improvement of asphalt mixture performance with glass macro-fibers. Construction and Building Materials [Em linha]. 164: 113-120. ISSN 09500618.
- NAGANATHAN, S. [et al.] (2014) - Nanotechnology in Civil Engineering - A Review. Advanced Materials Research [Em linha]. 935: 151-4. Disponível em WWW: <URL: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.935.151>>. ISSN 1022-6680.
- NAZARKO, Joanicjusz [et al.] (2015) - Foresight Study of Road Pavement Technologies. Procedia Engineering [Em linha]. 122: 129-136. ISSN 18777058.
- NEJAD, F. Moghadas; AFLAKI, E.; MOHAMMADI, M. A. (2010) - Fatigue behavior of SMA and HMA mixtures. Construction and Building Materials [Em linha]. 24:7. 1158-1165. ISSN 09500618.
- ODA, Sandra; LEOMAR FERNANDES, José; ILDEFONSO, Jesner Sereni (2011) - Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures. Construction and Building Materials [Em linha]. ISSN 09500618.
- PANK, H. (1995) - Finnish Asphalt Specifications 1995. Finnish Pavement Technology Advisory Council. Pank. ISBN 9789519719733.
- PAZINATTO, João António M. (2014) - Estudo comparativo de misturas asfálticas tipo SMA efetuadas com asfalto modificado por polímero e asfalto modificado por borracha. Campo Mourão, Brasil: Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 61 p. Tese para conclusão de Bacharelato.
- PEDROSO, Miguel Angelo Teixeira (2007) - Estudo comparativo entre as modernas composições de pisos flutuantes quanto ao desempenho no isolamento ao ruído de impacto. Brasil: Universidade Federal de Santa Maria. 141 p. Dissertação de Mestrado.
- PEREIRA, Alfredo Herculano Pinto (2010) - Caracterização acústica de pavimentos rodoviários e influência na emissão sonora. Porto: Universidade do Porto. 92 p. Dissertação de Mestrado Integrado.
- PUTMAN, Bradley J.; AMIRKHANIAN, Serji N. (2004) - Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures. Resources, Conservation and Recycling [Em linha]. 42:3. 265-274. ISSN 09213449.
- RADZISZEWSKI, P. [et al.] (2016) - Future trends in road pavement technologies development in the context of environmental protection. Baltic Journal of Road and Bridge Engineering [Em linha]. 11:2. 160-8. Disponível em WWW: <URL: <http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2016.19>>. ISSN 1822-427X.
- RIBEIRO, Jaime Manuel Queirós (2017a) - Apontamentos das aulas teóricas de Obras Rodoviárias. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- (2017b) - Apontamentos das aulas teóricas de Pavimentos. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- SANTOS, Luís Picado; CAPITÃO, Silvino Dias (2011) - Formulação Volumétrica e Desempenho de Misturas Betuminosas Stone Mastic Asphalt. In 2011.
- SEMINAR, CIVIL ENGG. (2011) - September 1, 2011. Disponível em WWW: <<http://civilenggseminar.blogspot.com/2011/09/stone-mastic-asphalt.html>>.
- SHAFIEI, A.; LATIFI NAMIN, M. (2014) - Experimental investigation on the effect of hydrated lime on mechanical properties of SMA. Construction and Building Materials [Em linha]. 70: 379-387. ISSN 09500618.

- SHEHATA, M. H.; PANHWER, M. N. (2005) - Use of tear-off roof shingles in stone mastic asphalt mixtures. 2005. Disponível em WWW: <URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33748960032&partnerID=40&md5=b0df34afd5839c8e66e6d1c43d2ed4b6>>.
- STEYN, Wynand JvdM (2009) - Potential Applications of Nanotechnology in Pavement Engineering. Journal of Transportation Engineering [Em linha]. 135:10. 764-772. ISSN 0733-947X.
- SUN, Lu; XIN, Xiantao; REN, Jiaolong (2017) - Asphalt modification using nano-materials and polymers composite considering high and low temperature performance. Construction and Building Materials [Em linha]. 133: 358-366. ISSN 09500618.
- TECHNOLOGY, Engeneering and (2013) - Stone Mastic Asphalt Details. December 10, 2013. Disponível em WWW: <<http://engineering-and-technology.blogspot.com/2013/12/stone-mastic-asphalt-details.html>>.
- VALE, Aline Colares do; CASAGRANDE, Michéle Dal Toé; SOARES, Jorge Barbosa (2014) - Behavior of Natural Fiber in Stone Matrix Asphalt Mixtures Using Two Design Methods. Journal of Materials in Civil Engineering [Em linha]. 26:3. 457-465. ISSN 0899-1561
- 1943-5533.
- VALE, Aline Colares do [et al.] (2006) - Estudo laboratorial da viabilidade do uso de fibras de coco em misturas asfálticas do tipo SMA. In 18º Encontro do Asfalto. Rio de Janeiro: 2006. Instituto Brasileiro do Petróleo e Gás - IBP. p. 1-8.
- WU, Shaopeng [et al.] (2007) - Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. Building and Environment [Em linha]. 42:7. 2580-2585. ISSN 03601323.
- XUE, Qiang [et al.] (2013) - Evaluation of pavement straw composite fiber on SMA pavement performances. Construction and Building Materials [Em linha]. 41: 834-843. ISSN 09500618.
- XUE, Yongjie [et al.] (2009) - Utilization of municipal solid waste incineration ash in stone mastic asphalt mixture: Pavement performance and environmental impact. Construction and Building Materials [Em linha]. 23:2. 989-996. ISSN 09500618.

ANEXOS

ANEXO A1 – QUADROS DE PATOLOGIAS NOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS SEGUNDO A EP (2008B)

ANEXO A2 – QUADROS E GRÁFICOS RELATIVOS AO ESTUDO DE MARSHALL

ANEXO A3 – QUADROS E GRÁFICO COM PROPRIEDADES AVALIADAS NO TRECHO EXPERIMENTAL

ANEXO A1

A1.1 – Quadro de patologias “Fendilhamento” e seus níveis de severidade

“FENDILHAMENTO”	NÍVEIS DE CLASSIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO	ILUSTRAÇÕES DAS ANOMALIAS
FENDAS LONGITUDINAIS	1	Fenda isolada e fechada com abertura < 2 mm	
	2	Fenda aberta com abertura entre 2 e 4 mm	
	3	Fenda grave ramificada, com perda de material e acompanhada de deformações e desagregações	
FENDAS TRANSVERSAIS	1	Fenda isolada com abertura < 2 mm	
	2	Fenda aberta ramificada com eventual perda de agregados (abertura entre 2 e 4 mm)	
	3	Fenda grave ramificada, com perda de material e acompanhada de deformações e desagregações	
PELE DE CROCODILO	1	Malha com fendas de pequena dimensão (abertura < 2 mm e malha < 20 cm) e sem ascensão de finos	
	2	Malha com fendas de todas as dimensões (abertura < 2 mm e malha < 20 cm, ou abertura entre 2 e 4 mm para qualquer tipo de malha, ou abertura > 4 mm e malha > 40 cm)	
	3	Malha com fendas de grande dimensão (abertura > 4 mm e malha > 40 cm), com perda de material, subida de finos e acompanhada de deformações, ninhos e peladas	

A1.2 – Quadro de patologias “Deformações” e seus níveis de severidade

“DEFORMAÇÕES”	NÍVEIS DE CLASSIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO	ILUSTRAÇÕES DAS ANOMALIAS
DEFORMAÇÕES LOCALIZADAS	1	Diferença de nível < 10 mm	
	2	Diferença de nível entre 10 e 30 mm	
	3	Diferença de nível > 30 mm	
RODEIRAS	1	Máxima profundidade < 10 mm	
	2	Máxima profundidade entre 10 e 30 mm	
	3	Máxima profundidade > 30 mm	

A1.3 – Quadro de patologias “Defeitos de Superfície” e seus níveis de severidade

“DEFEITOS DE SUPERFÍCIE”	NÍVEIS DE CLASSIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO	ILUSTRAÇÕES DAS ANOMALIAS
DESAGREGAÇÕES SUPERFICIAIS	1	Desagregação com largura < 30 cm	
	2	Desagregação com largura entre 30 e 100 cm	

	3	Desagregação com largura > 100 cm	
POLIMENTO DOS AGREGADOS	1	Polimento com largura < 30 cm	<i>Anomalia que não constitui gravidade preponderante, não sendo facilmente detetável</i>
	2	Polimento com largura entre 30 e 100 cm	
	3	Polimento com largura > 100 cm	
NINHOS (OU COVAS)	1	Ninhos isolados ou com profundidade da cavidade < 2 cm	
	2	Ninhos com profundidade da cavidade entre 2 e 4 cm, num comprimento entre 20 e 50 cm	
	3	Ninhos com profundidade da cavidade > 4 cm, num comprimento > 50 cm	
PELADAS	1	Pelada com largura < 30 cm	
	2	Pelada com largura entre 30 e 100 cm	
	3	Pelada com largura > 100 cm	

A1.4 – Quadro de patologias “Movimentos de Materiais” e seus níveis de severidade

“MOVIMENTOS DE MATERIAIS”	NÍVEIS DE CLASSIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO	ILUSTRAÇÕES DAS ANOMALIAS
EXSUDAÇÃO DE BETUME	1	Exsudação com largura < 30 cm	
	2	Exsudação com largura entre 30 e 100 cm	
	3	Exsudação com largura > 100 cm	
SUBIDA DE FINOS	1	Finos apenas presentes nos bordos das fendas existentes	
	2	Finos que abrangem a zona de passagem dos rodados dos veículos	
	3	Finos que abrangem mais de 75% da largura da via afetada	

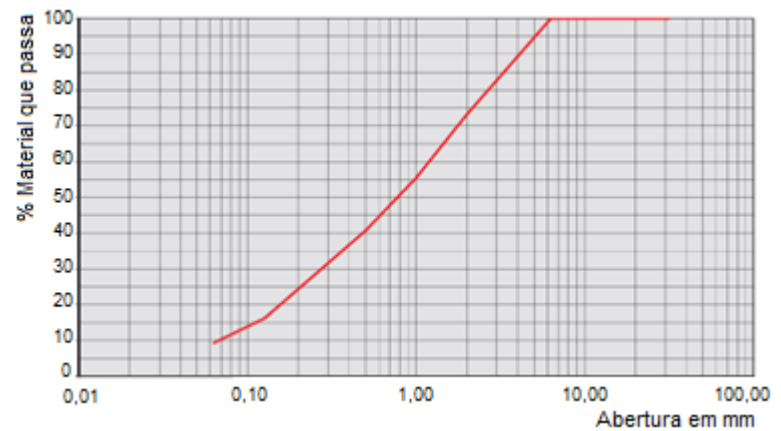
A1.5 – Quadro de patologias “Reparações” e seus níveis de severidade

“REPARAÇÕES”	NÍVEIS DE CLASSIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO	ILUSTRAÇÕES DAS ANOMALIAS
TAPAGEM DE COVAS	1	Tapagem de covas numa largura < 30 cm	
	2	Tapagem de covas numa entre 30 e 100 cm	
	3	Tapagem de covas numa largura > 100 cm	
REMENDOS	1	Reparações bem executadas, mas associadas a qualquer tipo de degradação de nível 1.	
	2	Reparações com baixa qualidade de execução ou má elaboração das juntas, e/ou associadas a qualquer tipo de degradação de nível 2.	
	3	Reparações mal-executadas, e/ou associadas a qualquer tipo de degradação de nível 3.	

ANEXO A2

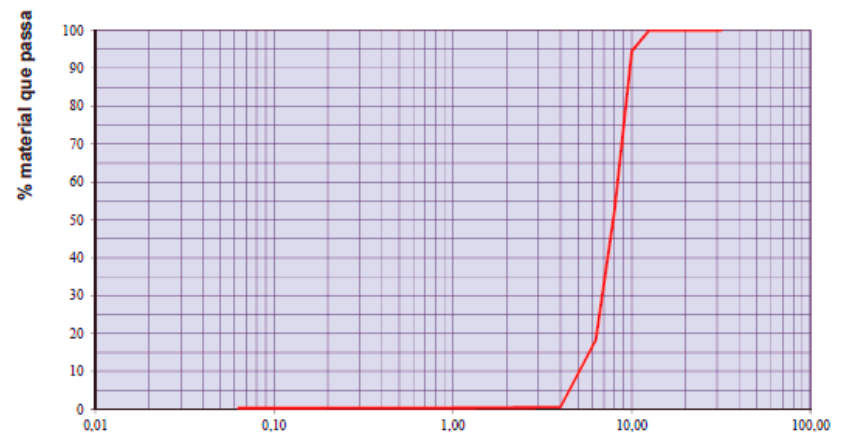
A2.1 – Análise e curva granulométrica do Pó 0/6

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	# PENEIROS [MM]	PASSADOS [%]
	6,3	100
	4	89
	2	73
	1	55
	0,5	41
	0,125	16
	0,063	9,4



A2.2 – Análise e curva granulométrica da Brita 6/10

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	# PENEIROS [MM]	PASSADOS [%]
	12,5	100
	10	95
	8	52
	6,3	18
	4	1
	2	1
	1	0
	0,5	0
	0,125	0
	0,063	0,3



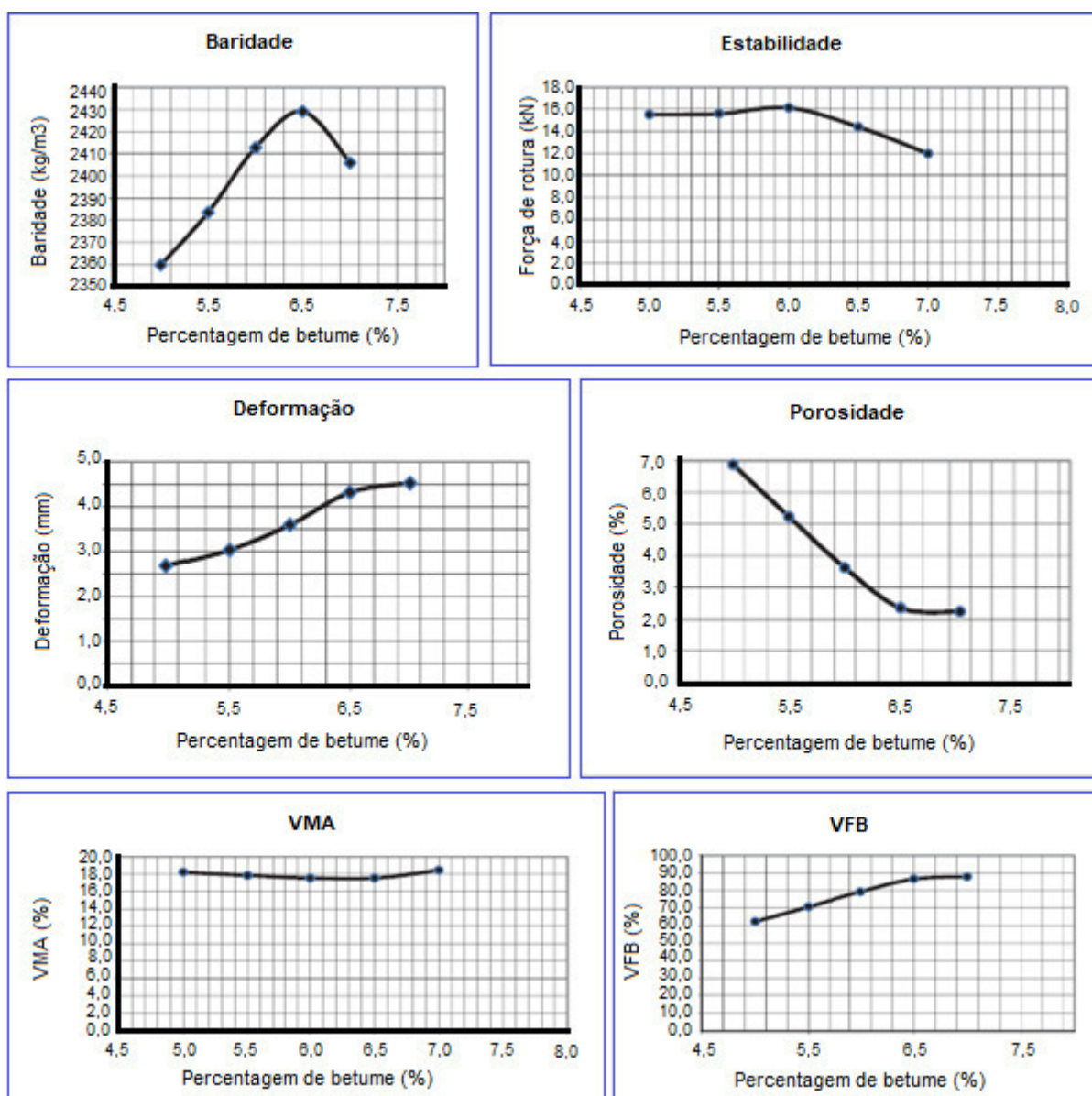
A2.3 – Análise granulométrica do Fíler

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	# PENEIROS [MM]	PASSADOS [%]
	0,5	100
	0,125	91
	0,063	85

A2.4 – Composição, em massa (g), das misturas betuminosas para cada percentagem de betume dos provetes a ensaiar na formulação Marshall

MATERIAIS	MISTURA DE AGREGADOS			BETUME	
	PÓ 0/6 [24%]	BRITA 6/10 [70%]	FÍLER COMERCIAL [6%]		
PB [%]	PESAGEM PARCIAL [G]	PESAGEM PARCIAL [G]	PESAGEM PARCIAL [G]	PESAGEM PARCIAL [G]	PESO POR PROVETE [G]
5,0	280	818	70	62	1230
5,5	279	814	70	68	1230
6,0	277	809	69	74	1230
6,5	276	805	69	80	1230
7,0	275	801	69	86	1230

A2.5 – Gráficos do Estudo de Marshall. Propriedades, função da % de betume



A2.6 – Quadro da Formulação Marshall [pw(0,1 kg/m³) = 997,1 e pb(1 kg/m³) = 1040]

BET UME	BARIDADE [EN 12697-6 (B)] c/ TENSAO = 25°C								BARIDADE MÁXIMA TEÓRICA EN 12697-5 (A)]								PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS [EN12697-8]				COMPRESSÃO MARSHALL [EN 12697-34] c/ TENSAO = 60°C				QUO CIEN TE
	m ₁	m ₂	m ₃	ρ _{ssd}	Média	m ₁	m ₂	m ₃	V _p	ρ _{ssd}	V _m	VMA	VFB	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Valor						
Pb	G	G	G	1 Mg/m³	1 Mg/m³	G	G	G	m³	1 Mg/m³	0,1 %	0,1 %	0,1 %	kN	kN	0,1 mm	0,1 mm	Valor	Valor						
5,0	1230,6	715,6	1235,7	2,359	2,360	2920,6	4920,4	8550,1	0,004	2,534	6,9%	18,2 %	62,3 %	15	16	16	2,8	2,7	2,7	5,8					
	1231,3	716,6	1236,6	2,361										16							2,7				
	1228,6	714,9	1234,3	2,359										16							2,7				
	1236,6	711,3	1233,5	2,361										16							2,6				
5,5	1227,7	719,6	1234,3	2,378	2,384	2920,6	5015,1	8601,3	0,004	2,515	5,2%	17,8 %	70,7 %	15	16	16	3,1	3,0	3,0	5,1					
	1225,5	716,7	1227,9	2,390										16							3,0				
	1223,0	717,3	1230,4	2,376										16							3,0				
	1227,6	719,7	1232,0	2,389										15							3,0				
6,0	1229,3	723,6	1232,1	2,410	2,413	2920,6	4884,3	8518,8	0,004	2,503	3,6%	17,5 %	79,4 %	16	16	16	3,6	3,7	3,6	4,5					
	1232,6	726,7	1235,3	2,416										16							3,7				
	1229,1	724,6	1231,1	2,420										16							3,6				
	1228,5	722,4	1231,7	2,405										17							3,5				
6,5	1235,1	729,6	1237,2	2,426	2,429	2920,6	4922,6	8536,7	0,004	2,487	2,3%	17,5 %	86,6 %	14	15	15	14	4,6	4,2	4,3	3,3				
	1237,2	730,7	1238,9	2,427										15								4,2			
	1229,0	726,9	1231,0	2,431										15								4,3			
	1234,4	730,1	1236,2	2,432										14								4,3			
7,0	1234,4	724,8	1234,4	2,415	2,406	2920,6	4903,7	8516,8	0,004	2,461	2,2%	18,4 %	87,9 %	12	12	13	12	4,5	4,6	2,6					
	1237,6	722,7	1238,4	2,393										12							4,6				
	1235,9	724,7	1236,4	2,408										13							4,5				
	1234,8	724,0	1235,4	2,407										12							4,6				

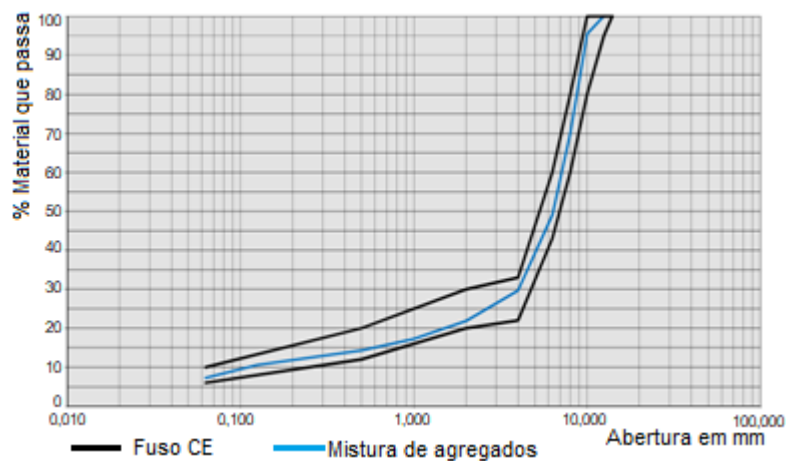
A2.7 – Quadro das características da mistura com a percentagem ótima de betume (5,9 %), determinada no EF

PROVETES	BARIDADE						BARIDADE MÁXIMA TEÓRICA EN 12697-5 (A)]						PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS [EN 12697-8]			COMPRESSÃO MARSHALL [EN 12697-34] c/ TÊNSÃO = 60°C				ITSR	
	EN 12697-6 [B]															ESTABILIDADE		DEFORMAÇÃO		QUOCIENT	ITSR
-	m1	m2	m3	p _{ssd}	Média		m1	m2	m3	Vp	p _{ssd}		Vm	VMA	VFB	Valor	Média	Valor	Média	Valor	
-	g	g	g	1 Mg/m ³	1 Mg/m ³		g	g	g	m3	1 Mg/m ³		0,1 %	0,1 %	0,1 %	kN	kN	0,1 mm	0,1 mm	kN/m ^m	%
40 minutos 60°C	1227,6	721,7	1228,3	2,416			2920,6	4884,3	8516,8	0,004	2,503	3,5 %	17,2 %	79,7 %		16	15	3,6	3,6	4,2	91
	1233,5	725,6	1234,3	2,418	2,416											15		3,7			
	1232,6	724,3	1233,3	2,414												14		3,5			
	1228,8	722,5	1229,9	2,415												16		3,5			
24 horas	1231,0	723,2	1231,4	2,415												13	14	4,0	4,1	3,3	
	1226,9	721,1	1227,6	2,416	2,416											14		4,1			
	1227,0	721,1	1227,8	2,415												14		4,3			
60°C	1229,7	723,0	1230,3	2,417												14		4,0			

ANEXO A3

A3.1 – Análise e curva granulométrica da mistura de agregados que compõe a mistura betuminosa aplicada no trecho experimental

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	# PENEIROS [MM]	PASSADOS [%]	Fuso CE	
	14	-	100	100
	12,5	100	95	100
	10	95	80	100
	8	70	60	80
	6,3	49	43	60
	4	30	22	33
	2	22	20	30
	1	17	-	-
	0,5	14	12	20
	0,125	11	-	-
	0,063	7,3	6	10



A3.2 – Quadro resumo das propriedades determinadas sob a mistura pronta

PROPRIEDADE	VALOR	UNIDADES
Porcentagem de betume	5,9	%
Baridade máxima teórica	2,498	Mg/m ³

A3.3 – Quadro resumo das propriedades determinadas sob provetes Marshall

PROPRIEDADE	VALOR	UNIDADES
Baridade	2,415	Mg/m ³
Porosidade	3,3	%
Grau de saturação do betume	80,8	%
Volume de vazios do agregado mineral	17,2	%
Estabilidade	13,1	kN
Deformação	3,1	mm
Quociente Marshall	4,3	kN/mm
IRC	97	%
Razão Filer/Betume	1,2	%

A3.4 – Quadro resumo do controlo laboratorial “*in situ*” sob a mistura compactada

PROPRIEDADE	VALOR	UNIDADES
Porosidade média do lote	4,7	%
Compactação relativa média do lote	99	%
Baridade máxima teórica	2,501	Mg/m ³
Baridade média do lote	2,385	Mg/m ³
Baridade dos provetes em laboratório	2,419	Mg/m ³

A3.5 – Quadro resumo do ensaio Wheel-Tracking em placas retiradas do pavimento

PROPRIEDADE	VALOR	UNIDADES
WTS _{AIR}	0,07	mm/10 ³ ciclos
PDR _{AIR}	4,8	%
RD _{AIR}	2,3	mm