

PATRÍCIA DE OLIVEIRA SALVADOR

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS  
BETUMINOSAS DO TIPO *STONE MASTIC ASPHALT*,  
INCORPORANDO FIBRAS CELULÓSICAS REVESTIDAS  
COM CERA POLIOLEFÍNICA**

Orientador: Prof. Doutor Elói João Faria Figueiredo

Coorientador: Prof. Luís Manuel Trindade Quaresma

**Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias**

**Faculdade de Engenharia**

**Lisboa**

**2020**



PATRÍCIA DE OLIVEIRA SALVADOR

# **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS BETUMINOSAS DO TIPO *STONE MASTIC ASPHALT*, INCORPORANDO FIBRAS CELULÓSICAS REVESTIDAS COM CERA POLIOLEFÍNICA**

Dissertação defendida em provas públicas para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, na especialização de Construção e Estruturas, no Curso em Engenharia Civil, conferido pela Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, no dia 23 de junho de 2020, perante o júri, nomeado pelo Despacho de Nomeação n.º 111/2020, de 18 de março de 2020, com a seguinte composição:

Presidente: Prof. Doutor Francisco Faria Ferreira, por delegação do Diretor de Curso;

Arguente: Prof.<sup>a</sup> Doutora Simona Fontul, Investigadora Auxiliar, LNEC;

Orientador: Prof. Doutor Elói João Faria Figueiredo, ULHT;

Coorientador: Prof. Luís Manuel Trindade Quaresma, ULHT.

**Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias**

**Faculdade de Engenharia**

**Lisboa**

**2020**



*À memória do meu avô Salvador,  
o “meu velho amigo”*



## AGRADECIMENTOS

A elaboração da presente dissertação contou com a importante ajuda e apoio de vários intervenientes e, não sendo possível enumerar todos os que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão da mesma, expresso os meus sinceros agradecimentos, em particular:

Ao Professor Doutor Elói Figueiredo, meu orientador científico, por toda a dedicação, compreensão e incentivo ao longo do meu percurso académico na Universidade Lusófona.

Ao Professor Luís Quaresma, meu coorientador científico, pela transmissão de conhecimentos e recomendações, pela dedicação, encorajamento e amizade, sem os quais não teria sido possível conduzir este trabalho a bom porto. Agradeço ainda pelos esforços desenvolvidos no sentido de mobilizar todos os recursos necessários para a realização dos trabalhos laboratoriais.

À empresa Infraestruturas de Portugal, em especial, à Engenheira Anabela Martins e à Engenheira Eugénia Correia, pela disponibilidade, troca de ideias e fornecimento dos dados necessários à realização deste trabalho.

À empresa JJR Construções pela disponibilidade e pelo fornecimento de dados e materiais essenciais ao desenvolvimento desta dissertação. Uma palavra especial à Engenheira Rosa Mendes pela incansável dedicação, ajuda e amizade que sempre demonstrou, tão importantes nos momentos mais difíceis.

À empresa Ravago Chemicals, na pessoa da Engenheira Daniela Augusto e do Engenheiro Luis Melé, pelo fornecimento das fibras celulósicas revestidas com cera poliolefínica e pela confiança no meu trabalho.

À empresa Consulpav, na pessoa do Doutor Jorge Barreira de Sousa, por me ter aberto a porta do seu laboratório onde realizei uma parte importante deste trabalho. Agradeço, ainda, ao Senhor Francisco Silva pelos ensinamentos e apoio na realização dos ensaios, pelo companheirismo e pela sua constante disponibilidade.

A todos os meus colegas e amigos que me acompanharam ao longo do meu percurso académico, com especial agradecimento ao André Patrão, por todo o apoio, conversas e desabaços, pela boa disposição contagiante e pela constante motivação.

Por último, deixo um profundo agradecimento à minha família, em particular aos meus pais, por terem sempre acreditado em mim, mesmo nos momentos em que eu não acreditei, em especial à minha mãe, pelo amor, paciência e incentivo. Ao Marcelo, pelo carinho, cuidado, apoio e especial paciência, tanto durante a concretização da presente dissertação, como ao longo de todos os anos de curso.

A todos vós, um grande bem-haja!



## RESUMO

Nos últimos anos tem-se verificado uma crescente aplicação de misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA), como uma alternativa às soluções convencionais. Esta aposta deve-se ao facto destas misturas proporcionarem ao pavimento uma maior durabilidade e um menor custo no ciclo de vida. As misturas do tipo SMA são constituídas por agregado de granulometria descontínua, composta por um esqueleto de agregado britado grosso e por um mastique betuminoso rico em betume. Devido ao seu relativamente elevado conteúdo de ligante, e por forma a evitar o seu escorrimento, são usualmente utilizados aditivos estabilizadores. Em Portugal, os aditivos estabilizadores são, em geral, granulados de fibras de celulose revestidas com betume, embora noutros países sejam utilizados outros tipos de aditivos estabilizadores.

Com o objetivo de responder ao interesse/necessidade da utilização de fibras celulósicas revestidas com cera poliolefínica, no presente trabalho avalia-se o comportamento e desempenho das misturas betuminosas do tipo SMA contendo este tipo de fibras comparativamente a misturas betuminosas do tipo SMA incorporando fibras de celulose revestidas com betume. Para tal, este estudo teve por base uma empreitada de beneficiação com a aplicação, em camada de desgaste, das misturas betuminosas do tipo SMA com incorporação dos dois tipos de fibras celulósicas, permitindo o acompanhamento das várias etapas da obra, bem como o estudo comparativo entre as misturas através de ensaios realizados no âmbito do controlo de qualidade do pavimento e em campanha laboratorial.

A realização do presente trabalho permitiu concluir que, independentemente, do tipo de revestimento das fibras celulósicas incorporadas nas misturas, os procedimentos construtivos são idênticos, bem como são semelhantes os resultados das diversas propriedades avaliadas. Assim, este trabalho contribuiu para a possibilidade de inclusão das fibras celulósicas revestidas com cera poliolefínica em Caderno de Encargos, como alternativa à utilização de fibras celulósicas revestidas com betume.

**Palavras-chave:** Mistura betuminosa; *Stone Mastic Asphalt* (SMA); fibras celulósicas revestidas com betume; fibras celulósicas revestidas com cera poliolefínica; formulação; desempenho; durabilidade.



## ABSTRACT

In the last years there has been an increasing application of *Stone Mastic Asphalt* (SMA) type bituminous mixtures as an alternative to conventional solutions. This is committed with the fact that these mixtures provide the pavement with greater durability and a lower life cycle cost. These mixtures are made of aggregates with discontinuous granulometry, composed by a coarse aggregate skeleton filled with a bituminous mastic rich in bitumen. Due to its relatively high binder content and in order to avoid its draining, stabilizers are usually used. In Portugal, stabilizers incorporated in SMA mixtures are, in general, cellulose fibers coated with bitumen, although other types of stabilizers are used in other countries.

In order to respond to the interest and need for the use of cellulose fibers coated with polyolefin waxes, this dissertation assesses the behavior and performance of SMA containing those fibers, in comparison with SMA incorporating cellulose fibers coated with bitumen. This study was based on a processing contract with the application, in a wearing course, of SMA incorporating the two types of cellulose fibers under consideration, allowing the monitoring of the various stages of the work, as well as the comparative study between the mixtures through tests performed in the framework of the pavement quality control and in a laboratory campaign.

This study made possible to ascertain that, regardless of the type of coating of the cellulosic fibers incorporated in the SMA blends, the construction procedures are identical as well as the results of the various properties assessed. Thus, this work has contributed to the possibility of including polyolefin wax-coated cellulose fibers in the specifications as an alternative to the use of bitumen-coated cellulose fibers.

**Keywords:** Bituminous mixture; *Stone Mastic Asphalt* (SMA); cellulose fibers coated with bitumen; cellulose fibers coated with polyolefin wax; mix design; performance; durability.



# ÍNDICE GERAL

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento do Tema.....	1
1.2. Objetivos .....	3
1.3. Metodologia do Estudo .....	4
1.4. Estrutura da Dissertação .....	4
<b>2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>7</b>
2.1. Considerações Iniciais .....	7
2.2. Materiais Constituintes das Misturas Betuminosas do Tipo SMA.....	8
2.2.1. Agregados .....	10
2.2.2. Ligante betuminoso.....	14
2.2.3. Aditivos estabilizadores .....	15
2.3. Principais Propriedades das Misturas Betuminosas do Tipo SMA.....	19
2.3.1. Escorrimento do ligante .....	19
2.3.2. Sensibilidade à água.....	21
2.3.3. Deformação permanente .....	24
2.3.4. Módulo de rigidez e resistência à fadiga.....	27
2.4. Formulação das Misturas Betuminosas do Tipo SMA.....	30
2.4.1. Métodos ditos “por receita” .....	31
2.4.2. Métodos empíricos – Método Marshall .....	32
2.4.3. Métodos volumétricos .....	33
2.4.4. Métodos baseados no desempenho .....	34
2.4.5. Utilização de métodos combinados.....	35
2.5. Principais Aspetos Construtivos das Misturas Betuminosas do Tipo SMA .....	35
2.6. Controlo de Qualidade.....	39
2.7. Considerações Finais .....	42

<b>3. ESTUDO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>43</b>
3.1. Enquadramento .....	43
3.2. Descrição Geral da Obra .....	44
3.3. Formulação das Misturas SMA .....	46
3.3.1. Agregados .....	46
3.3.2. Fíler .....	47
3.3.3. Ligante.....	48
3.3.4. Aditivo estabilizador .....	49
3.3.5. Curva granulométrica e estudo Marshall.....	50
3.3.6. Validação da composição da mistura SMA.....	50
3.4. Processo Construtivo .....	51
3.4.1. Transposição para a central .....	53
3.4.2. Trecho experimental.....	54
3.4.3. Aplicação em obra.....	54
3.4.4. Controlo de qualidade das misturas SMA .....	56
3.5. Avaliação do Desempenho das Misturas SMA .....	57
3.5.1. Escorrimento do ligante.....	58
3.5.2. Resistência à deformação permanente.....	59
3.5.3. Módulo de rigidez e resistência à fadiga .....	60
3.6. Caracterização Final do Pavimento .....	62
3.6.1. Macrotextura .....	62
3.6.2. Microtextura .....	63
3.6.3. Irregularidade longitudinal superficial (IRI) .....	63
3.6.4. Capacidade de carga do pavimento .....	64
3.7. Considerações Finais .....	65
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>67</b>
4.1. Enquadramento .....	67
4.2. Formulação das Misturas SMA .....	67

4.2.1.	Curva granulométrica e estudo Marshall .....	70
4.2.2.	Transposição para a central de fabrico .....	73
4.2.3.	Trecho experimental e composição da mistura SMA a aplicar em obra .....	75
4.3.	Controlo de Qualidade das Misturas SMA Aplicadas.....	77
4.3.1.	Macrotextura – Mancha de areia.....	78
4.3.2.	Microtextura – Pêndulo Britânico .....	78
4.4.	Avaliação do Desempenho das Misturas SMA .....	79
4.4.1.	Escorrimento do ligante – <i>Método de Schellenberg</i> .....	80
4.4.2.	Resistência à deformação permanente .....	81
4.4.3.	Módulo de rigidez e resistência à fadiga.....	82
4.5.	Caracterização Final do Pavimento .....	86
4.5.1.	Macrotextura – Texturómetro Laser .....	86
4.5.2.	Microtextura – SCRIM .....	88
4.5.3.	Irregularidade Longitudinal Superficial (IRI) – Perfilómetro Laser .....	89
4.5.4.	Capacidade de carga do pavimento – Defletómetro de Impacto .....	91
4.6.	Considerações Finais .....	94
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>95</b>
5.1.	Principais Conclusões.....	95
5.2.	Trabalhos Futuros.....	97
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>99</b>
	<b>REFERÊNCIAS NORMATIVAS.....</b>	<b>105</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>107</b>
A.1.	Sondagens à rotação.....	107
A.2.	Macrotextura – Mancha de Areia.....	109
A.3.	Microtextura – Pêndulo Britânico.....	110
A.4.	Resistência à deformação permanente .....	111
A.5.	Módulo de rigidez e resistência à fadiga.....	113

A.6. Macrotextura – Texturómetro Laser.....	116
A.7. Microtextura – SCRIM.....	117
A.8. Irregularidade Longitudinal Superficial (IRI) – Perfilómetro Laser .....	118
A.9. Capacidade de carga do pavimento – Defletómetro de Impacto .....	119



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Durabilidade média de misturas betuminosas aplicadas, em camada de desgaste, na União Europeia (adaptado de Martinho, Lanchas, Nunez, Batista, & Miranda, 2013, de EAPA 2007) .....	8
Figura 2.2 – Composição de uma mistura betuminosa do tipo SMA (adaptado de Miranda, 2016).....	9
Figura 2.3 – Composição ponderal de diferentes tipos de misturas betuminosas (adaptado de Miranda, 2016) .....	10
Figura 2.4 – Repartição de cargas entre as partículas de agregado grosso.....	11
Figura 2.5 – Esquemas representativos do fenómeno de escorrimento do betume (à esquerda) e da ação das fibras (à direita) (Martinho, Lanchas, Nunez, Batista, & Miranda, 2013).....	15
Figura 2.6 – Materiais utilizados no fabrico de granulados de fibras celulósicas revestidas com betume (adaptado de JRS, J. Rettenmaier & Söhne, 2019).....	17
Figura 2.7 – Realização do ensaio de <i>Schellenberg</i> (à direita) e material retido no copo para misturas SMA sem fibras, com fibras de celulose revestidas com cera poliolefínica e com fibras de celulose revestidas com betume, respetivamente (à esquerda) (Ravago, 2018).....	20
Figura 2.8 – Estudo comparativo do escorrimento do ligante em misturas betuminosas do tipo SMA incorporando diversos tipos de fibras de celulose (EPTISA, 2014) .....	21
Figura 2.9 – Provetes acondicionados em banho de água (à direita) e ensaio de tração indireta (à esquerda) (Ravago, 2018).....	23
Figura 2.10 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água (Mokhtari & Nejad, 2012).....	23
Figura 2.11 – Efeito da percentagem de fibras na deformação permanente a 25°C (Lavasan, Namin, & Fartash, 2015) .....	25
Figura 2.12 – Fases da evolução da deformação permanente em misturas betuminosas (adaptado de Freire, 2002) .....	26
Figura 2.13 – Resultados obtidos no ensaio de pista (LNEC, 2018).....	27
Figura 2.14 – Princípio básico do ensaio 4PB-PR (Afonso M., 2014 adaptado de EN 12697-24) .....	29
Figura 2.15 – Efeito da percentagem de fibras no módulo de rigidez (25°C) (Lavasan, Namin, & Fartash, 2015).....	30

Figura 2.16 – Exemplo de uma central de fabrico, do tipo contínuo, de misturas betuminosas a quente (Marini-Ermont, 2019) .....	36
Figura 2.17 – Sequência e tempos de mistura dos componentes de misturas SMA (adaptado de Błażejowski, 2011).....	37
Figura 2.18 – Doseador automático de granulado de fibras (Martinho, 2015).....	38
Figura 2.19 – Pavimentadora e cilindro de rolos metálicos lisos (HAMM, 2019) .....	38
Figura 3.1 – Estrutura do pavimento antes da beneficiação .....	44
Figura 3.2 – Fendilhamento em estado avançado com início de desagregação (à esquerda) e fendilhamento com ramificação, formando pele de crocodilo (à direita) (TPF, 2015) .....	45
Figura 3.3 – Agregados constituintes da mistura betuminosa SMA8*: pó calcário 0/4 mm (à esquerda), pó granítico 0/6 mm (ao centro) e brita 6/12 mm (à direita) .....	46
Figura 3.4 – Granulado de fibras celulósicas Innocell® FG3000 e Viatop® .....	49
Figura 3.5 – Em cima: central de fabrico, do tipo contínuo; em baixo: tremonhas para armazenamento de agregados (à esquerda) e sistema automático de dosagem de fibras (à direita) .....	51
Figura 3.6 – Pavimentadora VOGELE SUPER 1800-3i, em trecho experimental.....	52
Figura 3.7 – Cilindro de rasto liso do tipo HAMM HD 110, em trecho experimental (à esquerda) e em trecho piloto (à direita) .....	53
Figura 3.8 – Aspeto final da mistura SMA8*, aplicada no trecho experimental.....	54
Figura 3.9 – Aspeto final da mistura aplicada no trecho piloto realizado com SMA8* incorporando fibras celulósicas Innocell FG3000 .....	56
Figura 3.10 – Realização do ensaio de <i>Schellenberg</i> (à esquerda) e material retido no copo (à direita) .....	59
Figura 3.11 – <i>Roller Compactor</i> (à esquerda) e equipamento para ensaio de pista (à direita), pertencentes ao laboratório da empresa Consulpav .....	59
Figura 3.12 – Lajetas das misturas SMA8* A - I e SMA8* A - V antes (em cima) e após (em baixo) ensaio de deformação permanente .....	60
Figura 3.13 – Provetes prismáticos avaliados no ensaio de módulo de rigidez e de resistência à fadiga.....	60
Figura 3.14 – Ensaio de flexão em quatro pontos com viga .....	61
Figura 3.15 – Equipamento Texturómetro Laser (Consulstrada, 2019) .....	62
Figura 3.16 – Equipamento SCRIM (à esquerda) e unidade de medida SCRIM (à direita) (Consulstrada, 2019) .....	63

Figura 3.17 – Equipamento Perfilómetro Laser (Consulstrada, 2019).....	64
Figura 3.18 – Equipamento Defletómetro de Impacto (Consulstrada, 2019).....	64
Figura 4.1 – Ensaios realizados ao betume PMB 45/80-65. Em cima: ensaio de viscosidade (à esquerda) e ensaio de penetração (à direita); em baixo: ensaio de resiliência (à esquerda) e ensaio anel e bola (à direita) .....	69
Figura 4.2 – Curva granulométrica da mistura SMA8* obtida em fase de estudo laboratorial	70
Figura 4.3 – Curvas características da mistura SMA8* obtidas no ensaio Marshall .....	71
Figura 4.4 – Curvas granulométricas da mistura SMA8* obtidas em fase de estudo laboratorial e após transposição para a central de fabrico .....	74
Figura 4.5 – Curvas granulométricas da mistura SMA8* obtidas após transposição para a central de fabrico, após realização do trecho experimental e curva final e aprovada .....	76
Figura 4.6 – Resultados médios do comportamento à deformação permanente das misturas SMA8* A - V e SMA8* A - I .....	81
Figura 4.7 – Resultados médios do comportamento do módulo de rigidez das misturas SMA8* A - V e SMA8* A - I.....	84
Figura 4.8 – Resultados médios do comportamento do ângulo de fase das misturas SMA8* A - V e SMA8* A - I .....	84
Figura 4.9 – Resultados de resistência à fadiga das misturas SMA8* A - V e SMA8* A - I e respectivas leis de fadiga.....	86
Figura 4.10 – Valores de MPD calculados para troços de 100 m, sentido crescente (adaptado de Consulstrada, 2019).....	87
Figura 4.11 – Valores de CAT calculados para troços de 100 m, sentido crescente (adaptado de Consulstrada, 2019).....	89
Figura 4.12 – Valores de IRI calculados para troços de 100 m, sentido crescente (adaptado de Consulstrada, 2019).....	90
Figura 4.13 – Valores de IRI calculados para troços de 100 m, sentido crescente com indicação dos valores admissíveis de IRI definidos em C.E. ....	91
Figura 4.14 – Representação gráfica das deflexões normalizadas, para 65 kN. Sentido crescente (adaptado de Consulstrada, 2019) .....	92
Figura 4.15 – Zonas de comportamento estrutural homogéneo, definidas de acordo com o método das diferenças acumuladas (Consulstrada, 2019).....	93



# ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Limites do fuso granulométrico de misturas tipo SMA (adaptado de EN 13108-5).....	13
Quadro 2.2 – Intervalo entre valores máximos e mínimos de material passado nos peneiros selecionados.....	13
Quadro 2.3 – Aplicações de misturas betuminosas do tipo SMA com incorporação de fibras de celulose com cera poliolefínica na península ibérica (Ravago, 2018) .....	18
Quadro 3.1 – Propriedades/ requisitos dos agregados para misturas betuminosas a quente do tipo AC 10 surf (mBBr) (adaptado de EP, 2014) .....	47
Quadro 3.2 – Características do fíler utilizado na mistura betuminosa SMA8* (JJR, 2019)...	47
Quadro 3.3 – Granulometria do fíler utilizado na mistura betuminosa SMA8* (JJR, 2019)...	48
Quadro 3.4 – Propriedades do betume PMB 45/80-65 (Lusasfal, 2019) .....	48
Quadro 3.5 – Propriedades das fibras de celulose Viatop® e Innocell® FG3000 (Ravago , 2018; JJR, 2019) .....	49
Quadro 3.6 – Resumo das características dos equipamentos utilizados (JJR, 2019) .....	53
Quadro 3.7 – Normas de ensaio para avaliação das características mecânicas e valores exigidos para a mistura SMA8* .....	58
Quadro 4.1 – Valores obtidos para os agregados constituintes da mistura betuminosa SMA8* (JJR, 2019).....	68
Quadro 4.2 – Valores obtidos para o betume PMB 45/80-65 incorporado na mistura betuminosa SMA8* .....	69
Quadro 4.3 – Percentagens das frações granulométricas a incorporar na mistura (fase de estudo laboratorial) .....	70
Quadro 4.4 – Valores de baridade, porosidade, estabilidade e deformação obtidos no ensaio Marshall.....	71
Quadro 4.5 – Principais conclusões do estudo de composição da mistura betuminosa a quente do tipo SMA8* surf PMB 45/80-65 com 5,8% betume .....	72
Quadro 4.6 – Fórmula final da mistura SMA8*, após transposição para a central .....	73
Quadro 4.7 – Valores representativos das curvas granulométricas da mistura SMA8* obtidas em fase de estudo laboratorial e após transposição para a central de fabrico .....	74
Quadro 4.8 – Fórmula final da mistura SMA8*, após trecho experimental.....	75

Quadro 4.9 – Valores representativos das curvas granulométricas da mistura SMA8* obtidas após transposição para a central de fabrico, após trecho experimental e curva final aprovada para produção e aplicação em obra .....	76
Quadro 4.10 – Valores médios dos resultados de ensaios sobre provetes obtidos em sondagens à rotação .....	77
Quadro 4.11 – Valores médios de textura, MTD, obtidos pela técnica volumétrica da mancha de areia .....	78
Quadro 4.12 – Valores médios dos resultados de microtextura, PTV .....	79
Quadro 4.13 – Resultados do ensaio de escoamento do ligante, método de <i>Schellenberg</i> .....	80
Quadro 4.14 – Valores médios dos resultados de deformação permanente das misturas SMA8* A - V e SMA8* A - I.....	81
Quadro 4.15 – Valores médios de módulo de rigidez e ângulo de fase das misturas SMA8* A - V e SMA8* A - I.....	83
Quadro 4.16 – Resultados de resistência à fadiga da mistura SMA8* A - V .....	85
Quadro 4.17 – Resultados de resistência à fadiga da mistura SMA8* A - I.....	85
Quadro 4.18 – Valores médios de textura, MPD, obtidos com recurso ao equipamento Texturómetro Laser.....	87
Quadro 4.19 – Valores médios de coeficiente de atrito, CAT, obtidos com recurso ao equipamento SCRIM.....	88
Quadro 4.20 – Valores médios de irregularidade longitudinal, IRI, obtidos com recurso ao equipamento Perfilómetro Laser .....	89
Quadro 4.21 – Valores admissíveis de IRI, calculados por troços de 100 m.....	90
Quadro 4.22 – Modelo de comportamento estrutural para a camada de desgaste (Zona 2) (adaptado de Consulstrada, 2019).....	93

# LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

## Abreviaturas e Siglas

4PB-PR – Ensaio de flexão a peças prismáticas apoiadas em quatro pontos (*4-point bending test to prismatic species*)

AB – Argamassa Betuminosa

ABGE – Agregado Britado de Granulometria Extensa

AC – Betão Betuminoso (*Asphalt Concrete*)

ASTM – American Society for Testing Material

Base – Camada de base

BBr – Betão Betuminoso Rugoso

Bin – Camada de ligação

BMT – Baridade Máxima Teórica

CAT – Coeficiente de Atrito Transversal

CEN/TS – Especificação Técnica

CETO – Caderno de Encargos Tipo da Obra

D – Dimensão máxima nominal do agregado

EN – Norma Europeia

EP – Estradas de Portugal

FWD – Defletómetro de Impacto (*Falling Weight Deflectometer*)

IP – Infraestruturas de Portugal

IRI – *International Roughness Index*

IRC – Índice de Resistência Conservada

ITSd – Resistência à Tração Indireta do grupo secos (*Indirect Tensile Strength of dry group*)

ITSR – Resistência à Tração Indireta (*Indirect Tensile Strength Ratio*)

ITS<sub>w</sub> – Resistência à Tração Indireta do grupo molhados (*Indirect Tensile Strength of wet group*)

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MB – Macadame Betuminoso

mBBr – Microbetão Betuminoso Rugoso

MPD – Profundidade Média do Perfil (*Mean Profile Depht*)

MTD – Profundidade Média de Textura (*Mean Texture Depht*)

NP – Norma Portuguesa

PA – Mistura Betuminosa Drenante (*Porous Asphalt*)

PK – Ponto quilométrico

PMB – Betume Modificado com Polímeros

PRD<sub>AIR</sub> – Percentagem de profundidade de rodeira (*Mean Proportional Rut Depth in air*)

PTV – Coeficiente de atrito pontual (*Pendulum Test Value*)

RD<sub>AIR</sub> – Profundidade de rodeira (*Mean rut depth in air*)

Reg – Camada de regularização

RTFOT – *Rolling Thin Film Oven Test*

SCRIM – *Sideway Coefficient Routine Inspection Machine Number*

SMA – Stone Mastic Asphalt

SMA 8 – *Stone Mastic Asphalt* com dimensão nominal do agregado igual a 8 mm

SMA8\* – SMA 8 com alterações na fração grosseira da mistura

SUPERPAVE – Pavimentos Asfálticos de Desempenho Superior (*Superior Performance Asphalt Pavements*)

Surf – Camada de desgaste

VMA – Volume de vazios na mistura de agregados

VPB – Volume de vazios preenchidos por betume

WTS<sub>AIR</sub> – Taxa de deformação (*Wheel Tracking Slope*)



## Símbolos

$e$  – Espessura da camada de desgaste

$E$  – Módulo de rigidez / Módulo de deformabilidade

$E_{TE}$  – Módulo de deformabilidade estimado para a temperatura de ensaio

$E_{TP}$  – Módulo de deformabilidade estimado para a temperatura de projeto

TE – Temperatura de ensaio

TP – Temperatura de projeto

$F$  – Deformação

$n$  – Número de ciclos

$Q$  – Quociente Marshall

$S$  – Estabilidade

$V_V$  – Volume de vazios na mistura betuminosa

$\delta$  – Ângulo de fase

$\varepsilon$  – Amplitude da extensão de tração inicial

$\varepsilon_6$  – Extensão de tração necessária para que haja rotura do material ao fim de 1.000.000 de ciclos de carga

$\rho_{bssd}$  – Baridade



# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1. Enquadramento do Tema**

A rede rodoviária nacional, maioritariamente constituída por pavimentos flexíveis, apresenta, nas camadas mais superficiais, misturas betuminosas fabricadas a quente. Contudo, a crescente preocupação ambiental e ecológica tem vindo a influenciar o setor da construção, manifestando-se igualmente no domínio dos pavimentos rodoviários, através de alterações nos processos de fabrico das misturas betuminosas, diminuindo os impactes ambientais sem descurar o desempenho técnico.

As misturas betuminosas são materiais constituídos por materiais granulares, ligante e ar que preenche os vazios. As propriedades das misturas betuminosas são condicionadas, naturalmente, pela qualidade e quantidade dos seus componentes e devem satisfazer requisitos de natureza estrutural e funcional, definidos nos cadernos de encargos consoante as aplicações do material nos pavimentos, podendo indicar-se como principais requisitos a satisfazer, a trabalhabilidade (durante a construção), a impermeabilidade, a durabilidade, a resistência e a flexibilidade. Para misturas betuminosas aplicadas em camada de desgaste, devem ser exigidos, também, requisitos de natureza funcional, como por exemplo, aderência, ruído e regularidade. Igualmente, as condições de fabrico, transporte, aplicação e compactação em obra são fatores muito importantes, com influência na qualidade final da mistura betuminosa e no seu comportamento em serviço, quando solicitada pelo tráfego ao longo do tempo (Neves, 2005).

As principais misturas betuminosas aplicadas nas camadas dos pavimentos são fabricadas a quente, sendo que a sua produção, a temperaturas superiores a 140°C, obriga a que os agregados sejam previamente secos a temperaturas ainda mais elevadas, de modo a que a viscosidade do betume baixe, originando uma boa trabalhabilidade da mistura durante o fabrico e aplicação (Martinho, 2014). Tradicionalmente, as misturas betuminosas a quente utilizam uma mistura de agregados com uma granulometria contínua e bem graduada permitindo, após compactação em obra, obter uma mistura fechada, de reduzida porosidade, sendo os materiais

mais usuais desta família o betão betuminoso, utilizado em camada de desgaste, a mistura betuminosa densa, utilizada em camada de ligação e o macadame betuminoso, utilizado em camada de ligação ou de base.

Para além do recurso às misturas betuminosas tradicionais, tem-se verificado um crescente desenvolvimento de variadas misturas betuminosas, como é o caso das misturas designadas por SMA – *Stone Mastic Asphalt*. Estas misturas, geralmente fabricadas a quente, são aplicadas ao nível da camada de desgaste, tirando partido das suas características funcionais, mas também em camadas subjacentes, sempre que se pretenda conferir ao pavimento um desempenho mecânico superior. As misturas betuminosas do tipo SMA são constituídas por agregado de granulometria descontínua, com uma forte presença de agregado britado grosso, e por um mastique betuminoso rico em betume (Afonso & Gomes, 2016).

As misturas do tipo SMA apresentam vantagens que têm contribuído para a sua crescente utilização, tais como (Błażejowski, 2011):

- Vida útil elevada;
- Elevada resistência à deformação devido ao alto teor de agregado grosso e forte ligação entre partículas constituintes do esqueleto de agregado;
- Elevada resistência à fadiga, associada à elevada percentagem de betume;
- Boa resistência superficial à derrapagem e redução da projeção de água em dias chuvosos, devido à macrotextura originada pelas partículas de agregado de maior dimensão;
- Redução do ruído proveniente da interação pneu-pavimento.

No entanto, as misturas do tipo SMA também apresentam desvantagens (Błażejowski, 2011):

- Baixa resistência à derrapagem numa fase inicial em serviço, devida à fina película de betume que cobre o agregado, a menos que se proceda ao ensaibramento (*gritting*, em inglês), que consiste na aplicação de uma taxa de agregado (areia), sobre o pavimento aquando da segunda passagem do cilindro na compactação;
- Elevado custo inicial, comparativamente com as misturas tradicionais, essencialmente devido à elevada percentagem de ligante;
- Devido ao seu elevado valor económico, não são indicadas para obras com pouco tráfego ou tráfego maioritariamente constituído por veículos ligeiros.

Uma vez que as misturas betuminosas do tipo SMA incluem um mastique betuminoso rico em betume, introduziu-se uma preocupação que, até então, não se impunha: o escorrimento do ligante. Devido ao seu relativamente elevado conteúdo de ligante e por forma a evitar a sua drenagem, é necessária a incorporação de um aditivo estabilizador, geralmente fibras. As fibras podem ser de variadas naturezas, como por exemplo fibras celulósicas. Normalmente, o aditivo estabilizador utilizado em Portugal são fibras de celulose revestidas com betume.

Sendo que os cadernos de encargos rodoviários nacionais apenas preveem a utilização de fibras de celulose revestidas com betume, existe uma dificuldade na introdução de fibras de outra natureza, como as fibras de celulose revestidas com cera poliolefínica, objeto deste estudo. Anote-se que, apesar de apenas existirem experiências pontuais da utilização deste tipo de fibras em Portugal, estas possuem aplicação significativa a nível Europeu.

Neste âmbito, a presente dissertação pretende estudar o comportamento de misturas betuminosas do tipo SMA com incorporação de fibras celulósicas revestidas com cera poliolefínica, através de uma análise comparativa com a solução de utilização frequente a nível nacional.

## **1.2. Objetivos**

Em Portugal, apesar de existir alguma experiência de aplicação de misturas betuminosas do tipo SMA, apenas os aditivos estabilizadores do tipo granulado de fibras de celulose revestidas com betume estão contemplados em Caderno de Encargos. Esta dissertação visa contribuir para um melhor conhecimento da utilização de fibras de celulose em misturas betuminosas e pretende dar resposta aos seguintes pontos:

1. Analisar o desempenho das misturas betuminosas do tipo SMA, aplicadas até à atualidade, com especial enfoque em obras em Portugal;
2. Estudar e avaliar o comportamento de misturas betuminosas do tipo SMA incorporando fibras revestidas com cera poliolefínica e realizar a análise comparativa dos resultados obtidos com este material face aos resultados conhecidos para as misturas betuminosas do tipo SMA incorporando fibras celulósicas revestidas com betume;

3. Estabelecer as especificações técnicas para inclusão em caderno de encargos tipo, para aplicação do material com as características definidas.

### **1.3. Metodologia do Estudo**

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

1. Pesquisa bibliográfica, com o objetivo de sintetizar os conhecimentos sobre as misturas betuminosas do tipo SMA com incorporação de fibras celulósicas revestidas com betume, no que respeita às suas características de formulação e desempenho, para possibilitar a sua comparação com as misturas betuminosas do tipo SMA com incorporação de fibras celulósicas revestidas com cera poliolefínica, objeto deste trabalho;
2. Desenvolvimento da parte experimental do trabalho em quatro fases distintas:
  - Estudos de formulação da mistura SMA, incluindo a transposição para a central e a realização de trecho experimental;
  - Acompanhamento do processo construtivo de dois trechos piloto, um realizado com mistura SMA incorporando fibras de celulose revestidas com betume e outro incorporando fibras de celulose revestidas com cera poliolefínica;
  - Avaliação dos resultados de caracterização final do pavimento, incluindo macrotextura, microtextura, irregularidade superficial e capacidade de carga do pavimento;
  - Avaliação comparativa do desempenho da mistura com incorporação dos dois tipos de fibras de celulose, em ensaios laboratoriais.

### **1.4. Estrutura da Dissertação**

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, os quais se encontram divididos em subcapítulos. Alguns destes subcapítulos apresentam ainda divisões menores por forma a apresentar os temas e subtemas de uma forma explícita e concreta.

O Capítulo 1: “Introdução” faz a abordagem e enquadramento do tema fundamentando a importância deste estudo, referindo a necessidade do mesmo no panorama nacional. Neste capítulo são ainda apresentados os objetivos do estudo, bem como a metodologia a utilizar e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2: “Revisão do Estado da Arte” dedica-se à revisão da literatura existente sobre este tema e que serve de suporte ao desenvolvimento deste trabalho. Este capítulo encontra-se dividido em diferentes subcapítulos onde se tecem considerações iniciais relativas às misturas betuminosas do tipo SMA. Em seguida, são avaliados os materiais constituintes das misturas do tipo SMA, a estrutura pétreia, o ligante betuminoso e os aditivos estabilizadores, mais concretamente, as fibras de celulose, introduzindo as fibras de celulose revestidas com cera poliolefínica. Neste capítulo, de modo a proceder ao estudo experimental, são descritos alguns dos ensaios usualmente realizados, bem como é realizada uma análise aos métodos de formulação de misturas do tipo SMA e os principais aspetos construtivos a ter em conta para o adequado desempenho da mistura.

O Capítulo 3: “Estudo Experimental” expõe o caso de estudo e o trabalho experimental realizado, nomeadamente o processo de formulação da mistura SMA, o processo construtivo conduzido em obra e o controlo de qualidade realizado. São ainda descritos os ensaios realizados para avaliação das características mecânicas e características de superfície da mistura em estudo.

O Capítulo 4: “Resultados e Discussão” apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados, realizando uma análise comparativa entre os valores obtidos para as duas misturas SMA cuja única diferença reside no tipo de granulado de fibras celulósicas incorporado na sua formulação.

O Capítulo 5: “Conclusões e Trabalhos Futuros” refere as principais conclusões resultantes das diferentes fases deste estudo e estabelece possíveis trabalhos futuros a desenvolver no âmbito desta temática.

Por último, em “Anexos” apresentam-se, de uma forma mais extensiva, os resultados dos procedimentos experimentais realizados e referidos no Capítulo 4.





## 2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

### 2.1. Considerações Iniciais

As misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA), ou *Splittmastixasphalt* na língua alemã, foram desenvolvidas na Alemanha no final da década de 60, do século XX, com o intuito de diminuir a erosão superficial provocada pelos pneus de inverno, com pitons em aço na superfície de contacto com o pavimento, utilizados em países com inverno rigoroso e com queda de neve. Assim, a ideia inicial de composição da mistura SMA consistiu em criar um forte esqueleto de agregado de maior dimensão, cujos espaços entre as partículas de maior dimensão se encontram preenchidos por um mastique constituído por ligante, filer e areia (Błażejowski, 2011).

Atualmente as misturas SMA mantêm a composição inicial, apresentando uma composição de agregados de granulometria descontínua, com uma percentagem de betume relativamente elevada e com incorporação de aditivos estabilizadores para mitigar o fenómeno do escorrimento do betume. Esta composição proporciona uma camada betuminosa com alta prestação mecânica, com segurança e conforto para o utilizador e, simultaneamente, maior durabilidade. De facto, segundo um estudo realizado pela *European Asphalt Pavement Association* (EAPA, 2007), verificou-se que as misturas betuminosas do tipo SMA apresentam maior durabilidade quando comparadas com outras misturas betuminosas descontínuas, ou abertas, frequentemente utilizadas, em Portugal, em camada de desgaste. Neste estudo, foi avaliada a vida média das misturas betuminosas de maior utilização em camada de desgaste de estradas principais, autoestradas e estradas com tráfego pesado elevado, na União Europeia, conforme se ilustra na Figura 2.1.

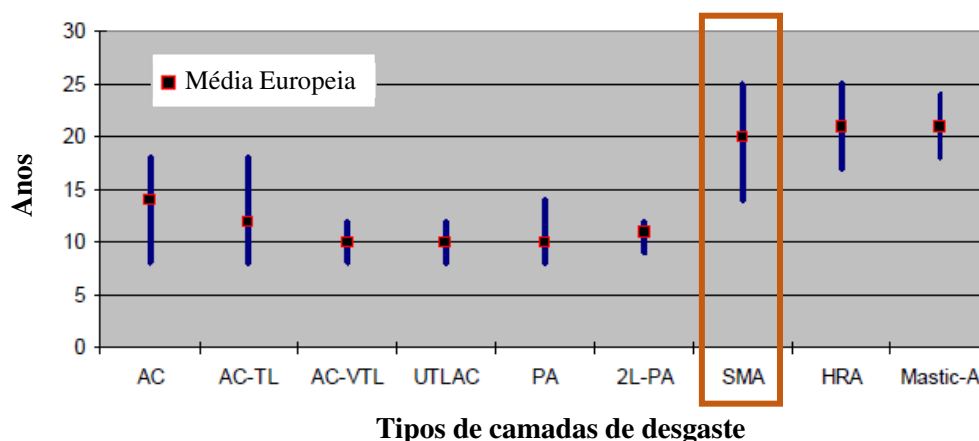


Figura 2.1 – Durabilidade média de misturas betuminosas aplicadas, em camada de desgaste, na União Europeia (adaptado de Martinho, Lanchas, Nunez, Batista, & Miranda, 2013, de EAPA 2007)

Importa referir que, apesar das misturas betuminosas do tipo SMA serem utilizadas na Europa desde 1968, a primeira aplicação prática em Portugal ocorreu apenas em 2004 e só a partir de 2009 têm sido usadas de forma mais regular (Martinho, Lanchas, Nunez, Batista, & Miranda, 2013).

Assim, com a crescente utilização de misturas betuminosas do tipo SMA com incorporação de fibras, torna-se imprescindível o conhecimento aprofundado da sua constituição e propriedades, com o objetivo de melhorar as suas características, desempenho e aplicação, de forma a obter um pavimento adequado às solicitações do tráfego e exigência dos utilizadores, maximizando a sua vida útil de serviço.

## 2.2. Materiais Constituintes das Misturas Betuminosas do Tipo SMA

As misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt* encontram-se definidas na norma europeia EN 13108-5 como uma “mistura betuminosa descontínua com ligante betuminoso, composta por um esqueleto de agregado britado grosso (“*stone*”) aglutinado por mastique”.



Figura 2.2 – Composição de uma mistura betuminosa do tipo SMA (adaptado de Miranda, 2016)

O esqueleto de agregado de maior dimensão é o maior componente presente nas misturas betuminosas do tipo SMA, seguido do mastique betuminoso, constituído por agregado fino, fíler, ligante betuminoso e aditivo estabilizador. O mastique representa, aproximadamente, cerca de 20 a 25% do peso total da mistura e 30 a 35% do seu volume total. Este funciona como aglutinador do esqueleto de agregados grosso, diminuindo o índice de vazios e assegurando uma adequada coesão da mistura (Błażejowski, 2011; Antunes D. , 2014).

Outra característica das misturas do tipo SMA prende-se com o valor reduzido de porosidade que apresentam, habitualmente entre 3 e 4%, resultante da utilização de elevada percentagem de fíler e de betume (cerca de 10% e 6%, respetivamente), comparativamente com os restantes tipos de misturas betuminosas (Miranda, 2016).

Na Figura 2.3 encontram-se representadas várias misturas betuminosas, sendo possível observar a diferença na composição ponderal dos materiais constituintes das misturas betuminosas do tipo SMA, com elevada percentagem de agregado grosso, fíler e betume, quando comparada com as restantes misturas.

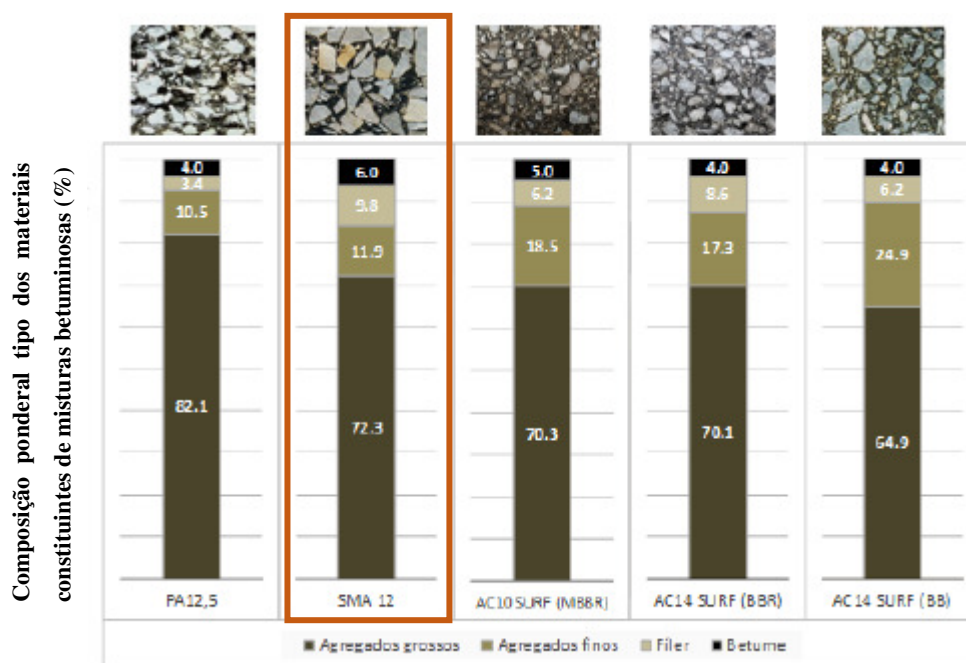


Figura 2.3 – Composição ponderal de diferentes tipos de misturas betuminosas (adaptado de Miranda, 2016)

Uma vez que o comportamento das misturas betuminosas está intrinsecamente relacionado com as características de cada um dos componentes que a constituem, impõe-se a necessidade da sua correta caracterização.

### 2.2.1. Agregados

Os agregados presentes na composição de uma mistura betuminosa do tipo SMA distinguem-se, de acordo com a sua granulometria, em agregados grossos, agregados finos e fíler. Estes agregados podem ser originários de rochas sedimentares (calcárias ou siliciosas), ígneas ou metamórficas, processados por britagem.

A nível nacional, apesar das especificações técnicas para as diversas misturas betuminosas se encontrarem pré-estabelecidas no CETO – Caderno de Encargos Tipo Obra (EP, 2014), este documento ainda não prevê fusos granulométricos para misturas betuminosas do tipo SMA. No entanto, tendo em conta as curvas granulométricas utilizadas internacionalmente, observa-se que, comparativamente às misturas tradicionais, as percentagens de agregado grosso e de fíler são relativamente elevadas e a percentagem de agregado fino bastante reduzida (Carvalho, 2012).

Os agregados grossos, material de dimensão superior a 2,00 mm, ocupam uma elevada percentagem na constituição de misturas betuminosas do tipo SMA, representando cerca de 70 a 80% da massa total de agregados. Devido às suas dimensões, o esqueleto de agregado grosso tende a assegurar por si só um elevado imbricamento, designado internacionalmente por “*stone-on-stone*”, promovendo a adequada distribuição de carregamento pelas partículas de agregado (Miranda, 2016), conforme se ilustra na Figura 2.4.



Figura 2.4 – Repartição de cargas entre as partículas de agregado grosso  
(Martinho, Lanchas, Nunez, Batista, & Miranda, 2013)

Os agregados grossos desempenham as seguintes funções na mistura betuminosa (Silva H. , 2006):

- Garantir estabilidade à mistura – resistência às deformações permanentes (formação de rodeiras);
- Aumentar a resistência mecânica da mistura (aumento do seu módulo de rigidez);
- Assegurar melhor rugosidade superficial – macrotextura, promovendo a aderência na camada de desgaste, contribuindo para um bom desempenho no que respeita à resistência à derrapagem.

Os agregados finos, de dimensões inferiores a 2,00 mm, correspondem entre 20 a 30% da massa total de agregados de uma mistura betuminosa do tipo SMA. Estes são responsáveis por preencher os vazios entre as partículas de agregado grosso, promovendo a sua interligação sem perturbar o efeito “*stone-on-stone*”. Desta forma, os agregados finos permitem que a mistura betuminosa obtenha estabilidade e compacidade (propriedade relacionada com o arranjo estrutural dos agregados, controlada pelo volume de vazios na mistura de agregados – VMA) (Silva H. , 2006; Błażejowski, 2011).

Segundo o CETO (EP, 2014), a designação fíler é atribuída a todo o agregado cuja maior parte passa no peneiro de 0,063 mm e pode ser adicionado a misturas betuminosas do tipo SMA com a finalidade de lhe conferir capacidades de compacidade e de impermeabilização.

Este material selecionado pode ser definido em dois grandes grupos:

- Fíler de recuperação ou recuperado;
- Fíler comercial.

O fíler recuperado pode ser obtido através das frações mais finas dos agregados, em geral provenientes de britagem, podendo ser separados das frações mais grossas dos agregados através de extratores de poeiras (Antunes V. , 2013). Por sua vez, o fíler comercial é produzido em separado, numa instalação industrial segundo um processo controlado, sendo este, por exemplo, pó de calcário, cimento, cal hidráulica devidamente apagada ou cinzas volantes (EP, 2014).

A dosagem de fíler na composição de misturas betuminosas do tipo SMA é bastante significativa, tornando-se evidente a importância da análise das suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, uma vez que este material afeta a resposta do masticue quando sujeito a solicitações de tráfego e, conseqüentemente, o desempenho da mistura (Antunes V. , 2013; Limón-Covarrubias, et al., 2019). Segundo Błażejowski, o fíler mais utilizado em misturas SMA é o fíler comercial de natureza calcária, uma vez que potencia a ligação agregado – masticue.

Desta forma, torna-se evidente que a origem e granulometria dos agregados influenciam, em grande medida, o desempenho da mistura betuminosa. Para além das características dos agregados, a sua distribuição granulométrica afeta diretamente todas as propriedades da mistura betuminosa, nomeadamente a durabilidade, a permeabilidade, a estabilidade, a trabalhabilidade e a resistência à deformação permanente (Carvalho, 2012).

A norma europeia EN 13108-5 define os requisitos para a classificação da curva granulométrica de misturas betuminosas do tipo SMA e preconiza uma grande diversidade de dimensão máxima nominal do agregado (D) utilizados no seu fabrico, numa gama de misturas compreendidas entre o SMA 4 (D = 4 mm), para camadas mais finas, e o SMA 22 (D = 22 mm), para camadas de maior espessura. A escolha de uma maior ou menor dimensão máxima nominal prende-se essencialmente com o desempenho que se pretende conferir ao pavimento, nomeadamente em termos de comodidade, segurança e economia de circulação. De acordo com

EAPA (2018), as gamas de dimensões utilizadas a nível europeu tendem a contemplar, maioritariamente, as misturas SMA 8, SMA 11 e SMA 16.

O fuso granulométrico destas misturas é delimitado por máximos e mínimos, tendo em consideração a percentagem de material que passa nos peneiros 1,4 D mm, D mm, 2 mm e 0,063 mm, conforme se indica no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Limites do fuso granulométrico de misturas tipo SMA (adaptado de EN 13108-5)

<b>D</b>	<b>8</b>	<b>11 (11,2)</b>	<b>16</b>
<b>Peneiro (mm)</b>	<b>% de material passado</b>		
1,4 D <sup>a</sup>	100	100	100
D	90 – 100	90 – 100	90 – 100
2	20 – 40	20 – 35	15 – 30
0,063	5,0 – 14,0	5,0 – 13,0	5,0 – 12,00

<sup>a</sup> Quando o peneiro calculado em 1,4 D não é um número exato na série ISSO 565/R20, deve adotar-se o peneiro mais próximo do valor obtido.

A norma preconiza ainda restrições à diferença entre valores máximos e mínimos do material passado em alguns peneiros (Quadro 2.2).

Quadro 2.2 – Intervalo entre valores máximos e mínimos de material passado nos peneiros seleccionados (EN 13108-5)

<b>Peneiro (mm)</b>	<b>Limites (% de material)</b>	
	<b>Limite inferior</b>	<b>Limite superior</b>
Características do peneiro grosso	10	25
Peneiro opcional entre D e 2	10	25
2	5	15
Características do peneiro fino	4	15
0,063	2,0	6,0

Em âmbito nacional, é frequente a utilização dos fusos granulométricos definidos para as misturas SMA, constantes de Cláusulas Técnicas Especiais que, apesar de não constarem no Caderno de Encargos Tipo Obra, integram a solução de projeto.

### **2.2.2. Ligante betuminoso**

As misturas betuminosas do tipo SMA incorporam uma percentagem de ligante betuminoso superior ao normal, entre 5% e 7%, contribuindo para um melhor preenchimento dos vazios da mistura de agregados (Xavier, Martin, Babu, Jose, & Roy, 2018).

De acordo com o CETO (EP, 2014), o ligante betuminoso é um material adesivo contendo betume que pode estar sob a forma de não modificado, modificado ou emulsionado. O betume é um material praticamente não volátil, adesivo e impermeável à água, derivado do petróleo bruto, muito viscoso e quase sólido à temperatura ambiente. O betume pode ser modificado pela adição de determinados agentes (como por exemplo, elastómeros e plastómetros) que melhoram determinadas características, obtendo-se assim betumes modificados (Silva H. , 2006).

As características dos betumes encontram-se estabelecidas nas especificações aplicáveis, como o CETO. De entre as propriedades mais importantes na caracterização de um betume estão a penetração e a temperatura de amolecimento, relacionadas com a sua consistência. Também a viscosidade do betume assume um papel relevante nesta caracterização, uma vez que esta quantifica a consistência do betume em função da variação da temperatura, permitindo avaliar o intervalo de temperatura em que é possível realizar a mistura e a compactação das misturas betuminosas em boas condições (Carvalho, 2012). Assim, o betume é classificado através do valor obtido no ensaio de penetração, realizado de acordo com a norma portuguesa NP EN 1426, que avalia indiretamente a viscosidade ou dureza do betume a determinada temperatura, estando previstos valores de penetração do betume puro, obtidos neste ensaio, que variam entre 10/20 (betume muito duro) até 180/220 (betume muito mole) (Silva H. , 2006). Por sua vez, a temperatura de amolecimento pode ser obtida de acordo com o ensaio de anel e bola previsto na norma portuguesa NP EN 1427.



De acordo com a EN 12597, os betumes com utilização nas misturas betuminosas do tipo SMA são:

- Betumes de pavimentação;
- Betumes modificados, incluindo betumes modificados com polímeros (PMB).

A seleção do tipo de ligante de uma mistura SMA, para aplicação em camada de desgaste, tem por base as condições locais de temperatura (faixa de temperaturas a que o pavimento estará sujeito) e as cargas de tráfego a que o mesmo estará sujeito (Błażejowski, 2011). O betume utilizado nas misturas do tipo SMA é, em geral, um betume modificado com polímeros, por apresentar vantagens ao nível da coesão e da adesividade, redução da deformação permanente e aumento da vida à fadiga, contribuindo para uma melhor preservação da macrotextura do pavimento (Carvalho, 2012).

### 2.2.3. Aditivos estabilizadores

Para mitigar a quantidade de betume livre e combater a problemática do escorrimento do ligante betuminoso, quer durante o processo de fabrico, transporte e aplicação da mistura SMA, quer durante a sua vida útil em serviço, é habitual a utilização de betumes modificados com incorporação de aditivos estabilizadores. Os aditivos estabilizadores utilizados são, em geral, fibras, mas outros aditivos podem ser incorporados, como por exemplo, granulado de borracha (Nguyen & Tran, 2018).



Figura 2.5 – Esquemas representativos do fenómeno de escorrimento do betume (à esquerda) e da ação das fibras (à direita) (Martinho, Lanchas, Nunez, Batista, & Miranda, 2013)

No domínio das fibras, estas podem ser definidas de acordo com a sua matéria-prima, nomeadamente (Błażejowski, 2011; NCHRP, 2015):

- Fibras de celulose – fibras à base de plantas obtidas, habitualmente, de plantas lenhosas;
- Fibras de pseudo-celulose – fibras obtidas a partir de desperdício de papel;
- Fibras minerais – desenvolvidas a partir da fusão de alguns tipos de rochas e obtidas por fiação ou extrusão, como lã de rocha;
- Celulose-mineral – mistura de celulose com fibras minerais;
- Celulose-polímero – mistura de celulose com diferentes tipos de polímeros;
- Celulose-cera – mistura de celulose com ceras sintéticas, que, além de funcionarem como agentes estabilizadores, alteram a relação viscosidade/temperatura do ligante betuminoso;
- Fibras têxteis – obtidas através do processamento e fragmentação de resíduos de origem têxtil;
- Fibras plásticas – obtidas tipicamente por estiragem de um polímero que derrete através de pequenos orifícios, como por exemplo, polipropileno;
- Fibras de vidro – compósito filamentoso de finíssimos fios de vidro, habitualmente encontrado na forma de lã de vidro;
- Fibras vegetais – derivadas de fibras lenhosas, folhas ou sementes, ou fibras de frutos, como por exemplo, fibras de coco.

Entre os aditivos estabilizadores usualmente utilizados, é largamente divulgada a opção de fibras de celulose, com ou sem revestimento de algum material, como betume ou cera, uma vez que apresentam, geralmente, maior eficiência na absorção/retenção do ligante betuminoso (Antunes D. , 2014). A quantidade de fibras a incorporar na mistura é determinada, em geral, pelo método de *Schellenberg* e representa cerca de 0,3 a 0,4%, sobre o peso da mistura (Błażejowski, 2011).

Como referido anteriormente, a experiência Portuguesa na aplicação de misturas betuminosas do tipo SMA recorre, praticamente em exclusivo, à utilização de fibras de celulose revestidas com betume. Estas fibras, habitualmente em forma de granulado (*pellet*), apresentam as seguintes vantagens (Mourão, 2003):

- Dispersão rápida e completa;

- Inodora e livre de pó;
- Insensibilidade à humidade;
- Facilidade de dosagem;
- Produção de uma mistura mais homogénea.

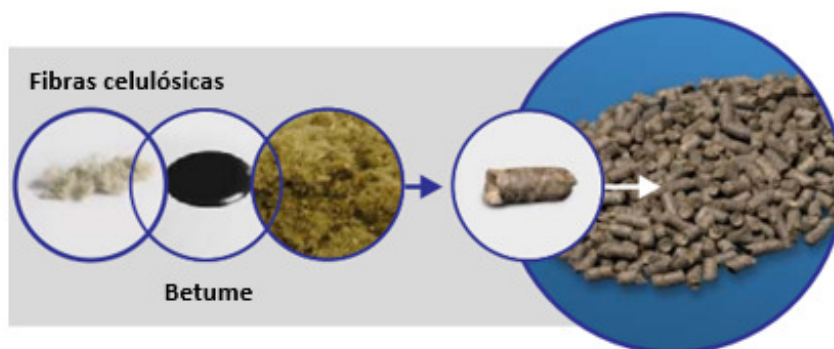


Figura 2.6 – Materiais utilizados no fabrico de granulados de fibras celulósicas revestidas com betume  
(adaptado de JRS, J. Rettenmaier & Söhne, 2019)

Uma vez que a garantia da estabilidade da mistura betuminosa e a inexistência de escorrimento do ligante são conseguidos com a adição de fibras de celulose, pretende-se estudar o comportamento das misturas betuminosas do tipo SMA quando as fibras incorporadas se encontram revestidas com cera poliolefínica, em vez do revestimento habitual, o betume.

Os grãos celulósicos podem ser obtidos através de uma tecnologia extremamente avançada, sendo-lhes incorporada uma cera poliolefínica, compatível com o betume, como veículo aglutinador que permite o encapsulamento da fibra, facilitando a rápida e homogénea dispersão dos grãos durante o processo de mistura na central betuminosa (Ravago, 2018).

A estrutura tridimensional dos grãos possibilita uma elevada viscosidade do betume, o que permite, para além de inibir o escorrimento do betume, assegurar a formação de uma película de ligante envolvendo as partículas do esqueleto pétreo, inibindo a oxidação do ligante, a infiltração de água e o fendilhamento (Melé, Quaresma, & Augusto, 2019).

Apesar das misturas betuminosas do tipo SMA serem de aplicação frequente em Portugal desde 2009, a utilização de SMA com incorporação de fibras de celulose revestidas com cera poliolefínica em pavimentação é recente, tendo sido iniciada em 2015. Contudo, a sua aplicação a nível europeu, em países como Alemanha, Bélgica, Reino Unido, Dinamarca, Polónia e Espanha, já ocorre há duas décadas. Estas aplicações ocorreram geralmente em

pavimentos rodoviários sujeitos a tráfego intenso, aeroportos e infraestruturas portuárias, com resultados positivos, o que tem conduzido a uma regular utilização do produto nos últimos anos. Em Espanha, entre 2018 e 2019, os Cadernos de Encargos sofreram alterações no sentido de introduzirem a possibilidade de utilização de fibras de celulose revestidas com cera ou betume para aplicação em aeroportos (Aena, 2018) e em autoestradas (Abertis, 2019).

No Quadro 2.3 apresentam-se, a título de exemplo, algumas aplicações de misturas betuminosas com incorporação deste tipo de fibras na península ibérica (Mele, Quaresma, & Augusto, 2019).

Quadro 2.3 – Aplicações de misturas betuminosas do tipo SMA com incorporação de fibras de celulose com cera poliolefínica na península ibérica (Ravago, 2018)

Ano	Local	Empreiteiro	Material	Tonelagem
2014	Autovia A5 (Madrid)	DRAGADOS	SMA 11 PMB 45/80-65 0,3 % fibras	> 10000 ton
2014	Autopista AP68 (Logroño)	EIFFAGE	SMA 11 PMB 45/80-65 0,3 % fibras	< 1000 ton
2015	Estrada M30 (Madrid)	ASFALTOS VICÁLVARO	SMA 11 PMB 45/80-65 0,3 % fibras	cerca 1000 ton
2015	Vias portuárias (Huelva)	O.H.L.	SMA 11 PMB 45/80-65 0,3 % fibras	> 7000 ton
2017	Autovia A1 (Madrid)	TECNOFIRMES	SMA 11 PMB 45/80-65 0,3 % fibras	> 15000 ton
2017	Aeroporto de Faro (Faro)	TECNOVIA	SMA 11 PMB 45/80-65 0,3 % fibras	< 200 ton
2018	Autovia A42 (Madrid)	TECNOFIRMES	SMA 11 PMB 45/80-65 0,3 % fibras	> 5000 ton

É importante referir que a utilização de fibras de celulose revestidas com cera poliolefínica em misturas betuminosas a quente contabilizou, na península ibérica, entre 2014 e 2018, uma quantidade superior a 700.000 toneladas (Ravago, 2018).

## 2.3. Principais Propriedades das Misturas Betuminosas do Tipo SMA

É esperado que os pavimentos apresentem boas características funcionais e estruturais, de referir: regularidade superficial; resistência à derrapagem; resistência à deformação permanente e resistência à fadiga. São ainda apontadas outras propriedades que, para além de serem igualmente importantes, são cada vez mais exigidas pelos utentes dos diversos tipos de vias de comunicação, tais como: uma boa capacidade de drenagem superficial da água; a redução de ruído e a visibilidade das marcas rodoviárias (Martinho, Lanchas, Nunez, Batista, & Miranda, 2013).

As propriedades das misturas betuminosas podem ser avaliadas com recurso a ensaios de caracterização descritos na norma europeia EN 13108-20, que especifica o procedimento dos ensaios a realizar, para efeitos de certificação CE de misturas betuminosas destinadas a estradas, aeroportos e outras áreas de circulação (Carvalho, 2012). Esta norma faz parte de uma série de normas de produto, entre elas a norma EN 13108-5, específica para misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt*.

Entre os ensaios de caracterização requeridos pela norma, realçam-se os ensaios relacionados com o desempenho da mistura, nomeadamente:

- Ensaio de escorrimento do ligante;
- Ensaio de sensibilidade à água;
- Ensaio de resistência à deformação permanente;
- Ensaio de caracterização da rigidez e da resistência à fadiga.

Anote-se que o ensaio de escorrimento do ligante é um ensaio específico para misturas betuminosas de granulometria descontínua ou aberta, onde se inserem as misturas do tipo SMA.

### 2.3.1. Escorrimento do ligante

Conforme referido anteriormente, a formulação de misturas betuminosas do tipo SMA requer a incorporação de fibras. Por forma a aferir se a dosagem de fibras incorporada na mistura é a adequada para a estabilização da mistura, realiza-se o ensaio do escorrimento do ligante.

A norma europeia EN 12697-18 preconiza os requisitos aplicáveis ao ensaio de escorrimento do ligante e prevê duas metodologias para a sua realização: o método do cesto (*Basket method*) e o método de *Schellenberg* (*Schellenberg method*).

O método do cesto permite avaliar o escorrimento do ligante de uma amostra de mistura betuminosa fabricada a quente, conservando as temperaturas utilizadas durante o processo de fabrico, transporte e compactação. Porém, devido à reduzida dimensão dos orifícios do cesto, surge uma preocupação relacionada com a forma e comprimento das fibras que poderão obstruir estes orifícios e influenciar os resultados do ensaio (Błażejowski, 2011; Carvalho, 2012). Caso, após avaliação dos orifícios, se verifiquem indícios da sua obstrução, recomenda-se a realização do ensaio pelo método de *Schellenberg*. É importante referir que o método de *Schellenberg* é, em geral, o método utilizado no ensaio de avaliação do escorrimento do ligante.

O ensaio pelo método de *Schellenberg* consiste em colocar a mistura betuminosa no interior de um cilindro de vidro, vulgarmente designado por “copo” e colocar o conjunto no interior da estufa a uma temperatura 25°C (para betume convencional) ou 15°C (para betume modificado) superior à utilizada na preparação da mistura, durante um período de 60 minutos  $\pm 1$  minuto. O resultado deste ensaio corresponde ao material que fica retido no copo, após virar o copo com a base para cima durante 10 segundos. Na maioria dos países, incluindo Portugal, a percentagem máxima admissível de material retido no copo corresponde a 0,3% (Błażejowski, 2011).



Figura 2.7 – Realização do ensaio de *Schellenberg* (à direita) e material retido no copo para misturas SMA sem fibras, com fibras de celulose revestidas com cera poliolefínica e com fibras de celulose revestidas com betume, respetivamente (à esquerda) (Ravago, 2018)

Na Figura 2.8 apresentam-se os resultados de um estudo conduzido pela EPTISA (2014), para avaliação do escorrimento do ligante na presença de diferentes tipos de fibras de

celulose. Este estudo permitiu concluir que a eficiência das fibras de celulose revestidas com cera poliolefínica na inibição do escorrimento do ligante é idêntica à conseguida com incorporação de fibras de celulose revestidas com betume (Mele, Quaresma, & Augusto, 2019).

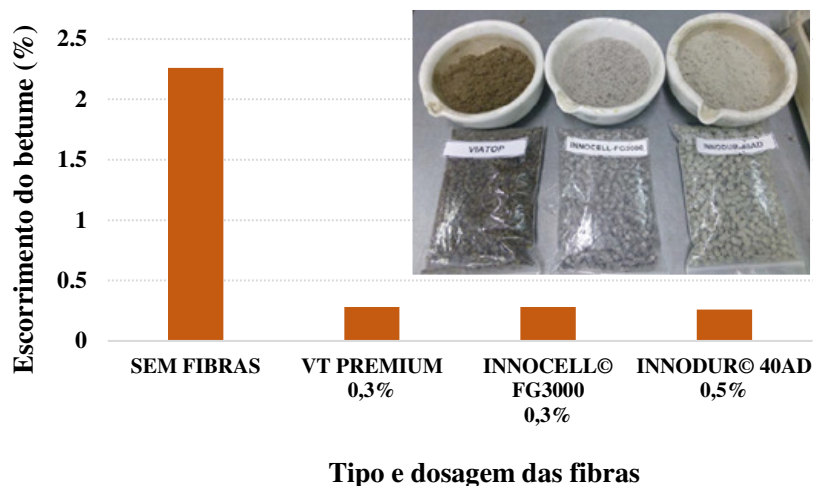


Figura 2.8 – Estudo comparativo do escorrimento do ligante em misturas betuminosas do tipo SMA incorporando diversos tipos de fibras de celulose (EPTISA, 2014)

Num outro estudo (LNEC, 2018), obtiveram-se os seguintes resultados no ensaio de escorrimento do betume pelo método de *Schellenberg*:

- SMA 11 com incorporação de 0,3% de fibras Innocell® FG3000: 0,2%
- SMA 11 sem fibras: 0,7%

Assim, sendo o valor obtido para o escorrimento do betume inferior ao valor máximo admissível, considera-se adequada a incorporação de 0,3% de fibras de celulose revestidas com cera poliolefínica, verificando-se que, de facto, a introdução de fibras de celulose em dosagens na ordem dos 0,3%, reduz significativamente o escorrimento do betume.

### 2.3.2. Sensibilidade à água

A resistência das misturas betuminosas à ação da água tem uma especial importância no desempenho e durabilidade dos pavimentos rodoviários, principalmente em misturas betuminosas aplicadas ao nível da camada de desgaste, visto que a ação da água pode conduzir à perda de ligação entre o agregado e o betume e, consequentemente, à perda de coesão e resistência do material. Desta forma, torna-se essencial a avaliação da sensibilidade à água de

misturas betuminosas, estimada através da determinação da resistência mecânica conservada após condicionamento em água (InIR, 2009).

A norma europeia EN 12697-12 preconiza três métodos de ensaio para avaliação da sensibilidade à água (InIR, 2009):

- Método A, baseado em ensaios de tração indireta (por compressão diametral) de provetes cilíndricos;
- Método B, baseado na resistência à compressão simples de provetes cilíndricos;
- Método C, não aplicável, de uma forma geral, às misturas betuminosas fabricadas em Portugal.

De acordo com a experiência dos estudos realizados para avaliação da sensibilidade à água, o método A é aquele que tem sido mais utilizado a nível europeu (InIR, 2009). Este método assenta na determinação da resistência conservada em ensaio de tração indireta (ITS<sub>R</sub>). Para a realização deste ensaio é necessário um mínimo de 6 provetes cilíndricos, divididos em dois conjuntos com características semelhantes, isto é, a diferença entre as baridades e alturas médias dos provetes não deve exceder 15 kg/m<sup>3</sup> e 5 mm, respetivamente. É ainda referido que todos os provetes devem ter, aproximadamente, o mesmo tempo de cura, não inferior a 16 horas. O primeiro conjunto de provetes, designado por provetes “a seco” (ITS<sub>d</sub>), é acondicionado ao ar a (20 ± 5) °C. O segundo conjunto, designado por provetes imersos (ITS<sub>w</sub>), é acondicionado em banho de água a (40 ± 1) °C, por um período de 68 h a 72 h. No entanto, para garantir a adequada penetração da água nos poros dos provetes, a norma preconiza que os provetes do segundo conjunto sejam previamente submetidos a vácuo em água a (20 ± 5) °C e mantidos durante (30 ± 5) min a uma pressão absoluta de (6,7 ± 0,3) kPa e, só depois, sejam acondicionados no banho de água a (40 ± 1) °C por um período de 68 h a 72 h (Batista, et al., 2011).

Uma vez concluído o período de condicionamento, os provetes são sujeitos a ensaios para determinar a resistência à tração indireta, a uma temperatura de ensaio selecionada (entre 5°C e 25°C), através da aplicação, no provete de ensaio, de uma força vertical a velocidade constante com o auxílio de um equipamento próprio (prensa). O ensaio dá-se por concluído quando é atingida a força vertical máxima e a consequente rotura do provete. A partir dos



valores médios das resistências à tração indireta dos provetes “a seco” e imersos, é calculada a resistência conservada em tração indireta (ITSR).



Figura 2.9 – Provetes acondicionados em banho de água (à direita) e ensaio de tração indireta (à esquerda) (Ravago, 2018)

A necessidade de introdução de aditivos estabilizadores nas misturas betuminosas do tipo SMA está intrinsecamente relacionada com o fenómeno de escorrimento do ligante. Mas há outra questão que se impõe: será que a introdução destes aditivos, especialmente as fibras, não afeta a resistência conservada?

Foram realizados vários estudos para avaliação da sensibilidade à água e verificou-se que, por exemplo, a adição de fibras celulósicas e de coco aumenta a resistência conservada em tração indireta (Vale, Michele Casagrande, & Soares, 2014).

De acordo com o estudo comparativo entre vários aditivos estabilizadores conduzido por Mokhtari e Nejad (2012) verificou-se que, misturas betuminosas com incorporação de fibras minerais e fibras de celulose apresentam valores de  $ITS_d$  próximos das misturas sem adição de fibras. Contudo, para misturas incorporando fibras minerais e fibras de celulose, os valores de  $ITS_w$  são superiores, o que conduz a um aumento da resistência conservada de 4% e 7%, respetivamente, face às misturas sem incorporação de fibras.

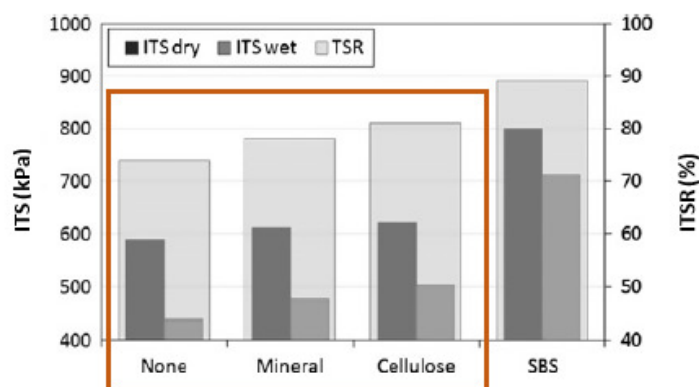


Figura 2.10 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água (Mokhtari & Nejad, 2012)

### 2.3.3. Deformação permanente

As deformações permanentes à superfície do pavimento são resultantes do somatório das deformações permanentes induzidas nas suas camadas (ligadas e granulares) e no solo de fundação. Estas deformações resultam, principalmente, no aparecimento de depressões longitudinais (cavados de rodeira) na zona de passagem dos rodados e, por vezes, de elevações laterais contíguas (Batista, 2004).

Segundo Gardete (2006), são diversos os fatores que influenciam a deformação permanente em camadas betuminosas, tais como:

- Propriedades dos constituintes da mistura betuminosa – agregado, betume e possíveis aditivos;
- Granulometria dos agregados – as misturas com agregados de maior dimensão e granulometria contínua apresentam melhor resistência à deformação permanente devido ao contacto entre as partículas do agregado, oferecendo, assim, uma maior resistência;
- Britagem dos agregados – as misturas com agregados britados são mais resistentes à deformação permanente do que as que utilizam agregados rolados, pois os agregados britados fornecem melhor resistência por atrito interno;
- Dosagem de ligante – o excesso de ligante tende a funcionar como um lubrificante facilitando o movimento relativo entre as partículas;
- Viscosidade do betume – o uso de betumes mais duros ou modificados aumenta a resistência à deformação permanente;
- Compactação insuficiente – se a camada apresentar uma porosidade muito superior à que se irá verificar a longo prazo, as cargas do tráfego irão produzir assentamentos indesejáveis. Um maior esforço de compactação leva a um maior contacto entre as partículas do agregado ficando estas orientadas de forma a resistirem mais;
- Condições de serviço, como sejam a temperatura (que afeta a viscosidade do betume) e as ações do tráfego (pressão dos pneus, tipo de rodado, distribuição lateral, etc).

As misturas betuminosas do tipo SMA possuem um forte esqueleto pétreo com elevado contacto entre as partículas de agregado grosso, favorecendo o desempenho da mistura relativamente à deformação permanente. Contudo, por se tratar de uma mistura com uma

percentagem de betume relativamente elevada, é conveniente aferir a sua resistência à deformação permanente.

Num estudo conduzido por Lavasani *et al.* (2015), cujo objetivo consistiu na avaliação da influência do tipo e teor de fibras, minerais e orgânicas, nas propriedades mecânicas das misturas betuminosas, permitiu concluir que ambas as fibras proporcionam melhorias. Na Figura 2.11 verifica-se que a deformação permanente diminui com o aumento do teor em fibras, até um ponto ótimo, a partir do qual se verifica o aumento da deformação permanente com o aumento do teor em fibras, devido à perda de contacto entre os agregados grossos.

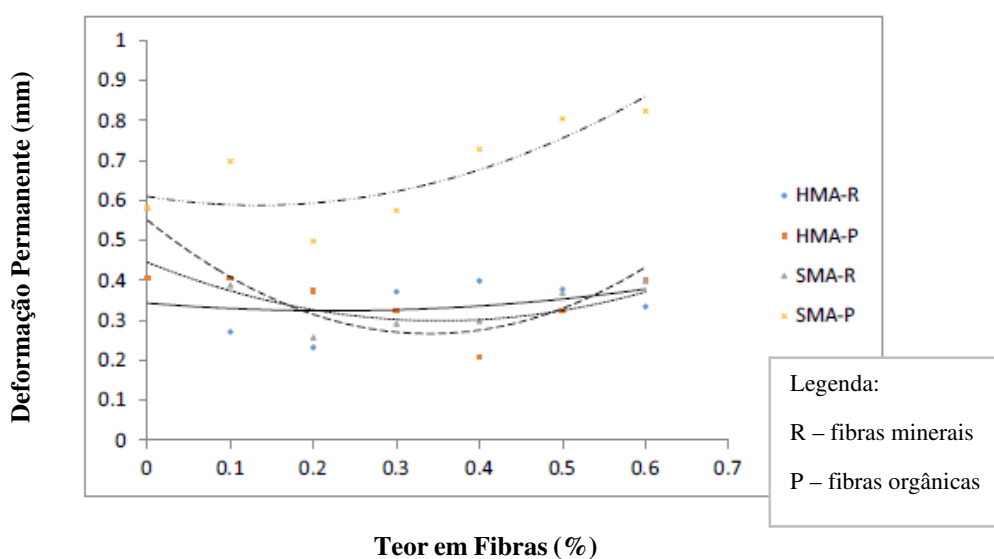


Figura 2.11 – Efeito da percentagem de fibras na deformação permanente a 25°C (Lavasani, Namin, & Fartash, 2015)

A avaliação da resistência à deformação permanente em misturas betuminosas pode ser realizada de acordo com vários ensaios, sendo os mais comuns o ensaio de simulação em pista e os ensaios de compressão (ensaio de compressão uniaxial e ensaio de compressão triaxial). A realização destes ensaios origina uma curva representativa da deformação vertical permanente em função do número de ciclos (Figura 2.12). Essa curva compreende, normalmente, três fases distintas (Freire, 2002):

- Fase primária – o acréscimo de deformação por carregamento é elevado, existindo uma rápida deformação do provete que diminui com o aumento do número de ciclos. No final desta fase observa-se uma súbita diminuição da velocidade de deformação, que pode dever-se a um rearranjo das partículas de agregado,

conduzindo a um subsequente melhor comportamento à deformação permanente da mistura betuminosa;

- Fase secundária ou linear – a velocidade de deformação permanece constante;
- Fase terciária – ocorre uma rápida deformação do provete e, conseqüentemente, a sua rotura, verificando-se deformações plásticas da mistura, com um acentuado aumento da velocidade de deformação.

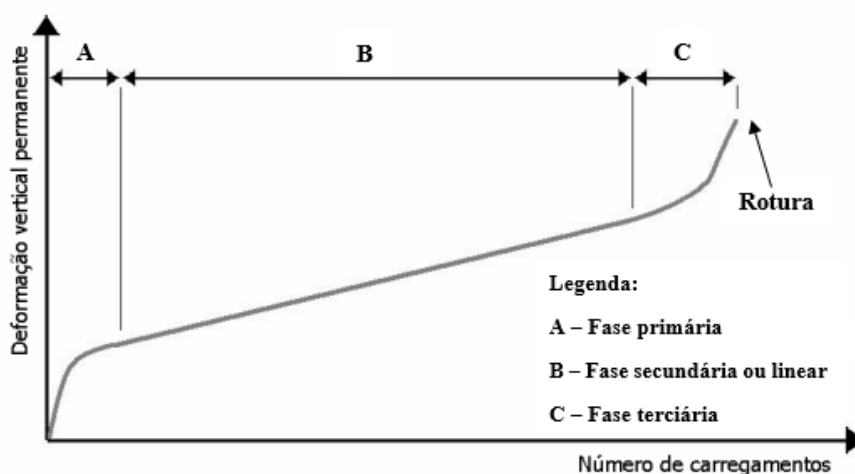


Figura 2.12 – Fases da evolução da deformação permanente em misturas betuminosas (adaptado de Freire, 2002)

Quando se verifica uma excessiva deformação permanente nas camadas betuminosas do pavimento, tal ocorre, em geral, nos primeiros anos de vida do pavimento, enquanto o betume é jovem e, conseqüentemente, menos viscoso. Após o endurecimento do betume, devido à exposição a fatores ambientais e por oxidação, este apresenta maior viscosidade e o pavimento torna-se mais resistente à deformação permanente (Gardete, 2006).

O ensaio de simulação em pista, *wheel-tracking test* na língua inglesa, tem ganho preponderância a nível mundial (Freire, 2002). No ensaio de simulação em pista de laboratório, preconizado na norma EN 12697-22, o provete a ensaiar, constituído por uma lajeta de mistura betuminosa, é sujeito à passagem repetida de um rodado a temperatura constante, medindo-se a redução da espessura total da camada, em função do número de passagens da roda. A aplicação de carga através da roda do equipamento deve ocorrer durante 10000 ciclos, correspondendo cada ciclo a duas passagens da roda. As categorias para a resistência à deformação permanente encontram-se definidas na norma de produto EN 13108-5, relativa às misturas do tipo SMA, e são designadas consoante os valores de:

- Taxa de deformação máxima ( $WTS_{AIR\ max}$ );

- Percentagem de profundidade de rodeira máxima ( $PRD_{AIR\ max}$ ).

No estudo realizado pelo LNEC (2018), foi realizado o ensaio para avaliação da resistência à deformação permanente de uma mistura betuminosa SMA 11 com incorporação de 0,3% de fibras de celulose revestidas com cera poliolefínica, de acordo com a norma EN 12697-22, utilizando o equipamento de pequenas dimensões, segundo o procedimento B, ao ar. A temperatura de ensaio foi de 60°C. Os resultados obtidos traduzem um bom comportamento à deformação permanente, tendo-se obtido os seguintes valores médios:

- Taxa de deformação,  $WTS_{AIR} = 0,05\text{ mm}$ ;
- Profundidade de rodeira a 10000 ciclos,  $RD_{AIR} = 2,0\text{ mm}$ ;
- Percentagem de profundidade de rodeira,  $PRD_{AIR} = 3,9\%$ .

De salientar que o valor de  $WTS_{AIR}$  obtido cumpre o requisito presente no C.E. tal que  $WTS_{AIR} \leq 0,07\text{ mm}$ . Na Figura 2.13 apresenta-se um gráfico onde se pode observar a evolução da deformação dos provetes com os ciclos de carga, durante o ensaio de pista.

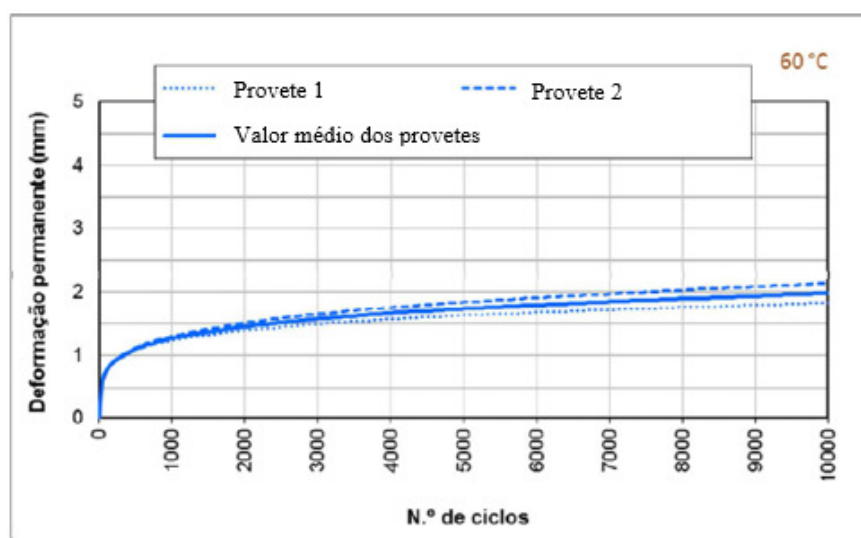


Figura 2.13 – Resultados obtidos no ensaio de pista (LNEC, 2018)

#### 2.3.4. Módulo de rigidez e resistência à fadiga

O comportamento reológico das misturas betuminosas nas camadas dos pavimentos rodoviários, influenciado sobretudo pela presença do betume, depende essencialmente da temperatura e da frequência de aplicação das cargas. Assim, as misturas betuminosas

apresentam um comportamento marcadamente viscoso quando sujeitas a elevadas temperaturas e maiores tempos de carga, e um comportamento elástico quando sujeitas a baixas temperaturas e a reduzidos tempos de carga (Quaresma, 2018).

O módulo de rigidez das misturas betuminosas é influenciado por vários fatores, tais como, a temperatura a que as mesmas se encontram, a frequência de carregamento, as características dos materiais que as constituem e a sua própria composição (Branco, Picado Santos, & Garcia Pereira, 2011). Os módulos de rigidez apresentados para as misturas betuminosas tradicionais são superiores aos medidos para as misturas betuminosas do tipo SMA. Tal deve-se ao facto destas misturas incorporarem teores em betume superiores ao das misturas tradicionais (Antunes D. , 2014).

A resistência à fadiga traduz-se na capacidade de uma camada betuminosa resistir à repetida passagem de veículos que induzem tensões e respetivas extensões de tração aos materiais. Com a sucessiva passagem dos rodados dos veículos vão-se acumulando extensões instaladas, conduzindo ao aparecimento de fendas. Admite-se, em geral, que o fenómeno de fadiga ocorre quando os valores de extensão de tração instalada no material são superiores à extensão máxima de tração de rotura. Entre os fatores que influenciam a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa, destacam-se os seguintes (Branco, Picado Santos, & Garcia Pereira, 2011):

- Percentagem de betume – maior durabilidade, por conseguinte, maior percentagem de betume, melhor resistência à fadiga;
- Densidade – misturas mais densas apresentam uma melhor resistência à fadiga relativamente a misturas abertas.

A caracterização das misturas betuminosas relativamente ao seu módulo de rigidez e resistência à fadiga é efetuada, geralmente, com recurso ao mesmo tipo de ensaios. Estes encontram-se definidos na norma europeia EN 12697-24 e são os que se enunciam:

- Ensaios de flexão realizados em provetes trapezoidais ou em provetes prismáticos, com carregamento em dois pontos;
- Ensaios de flexão realizados em provetes prismáticos, com carregamento em três ou quatro pontos;

- Ensaios de tração indireta em provetes cilíndricos;
- Ensaios de tração-compressão direta uniaxial em provetes cilíndricos;
- Ensaios de tração direta uniaxial em provetes cilíndricos ou provetes prismáticos.

Em Portugal, o ensaio de flexão em quatro pontos (4PB-PR) é dos mais utilizados e, para a sua realização, são necessários provetes prismáticos, vulgarmente designados por vigas, obtidos por corte de lajetas. Estes provetes são colocados no equipamento de ensaio composto por um suporte constituído por quatro apoios, sobre o qual o provete fica simplesmente apoiado nos dois apoios externos, um braço servo pneumático, que aplica uma força por intermédio dos dois apoios internos, e transdutores. O equipamento situa-se num espaço com controlo de temperatura e com um computador para recolha de resultados.

A metodologia de ensaio consiste na aplicação de um carregamento sinusoidal repetido, representativo das ações do tráfego a que o pavimento estará sujeito ao longo da sua vida em serviço. O carregamento é transmitido através dos dois apoios internos, verticalmente e perpendicularmente ao eixo longitudinal. Estes apoios internos estão localizados a um terço dos apoios externos da viga e simétricos em relação ao centro do provete, sendo também nestes apoios o local de aplicação das cargas verticais. Os quatro apoios, sobre os quais é colocado o provete, permitem livre rotação e translação, sendo o deslocamento vertical impedido pelos dois apoios externos fixos. As tensões de tração máximas são geradas ao longo de cerca de um terço da extensão do provete, sendo mais provável que a rotura ocorra numa destas secções de tensão máxima. Este tipo de ensaio vai induzir danos contínuos nos provetes a ensaiar até que o provete sofra rotura, podendo ser observado através da redução gradual da rigidez inicial do material (Afonso M. , 2014).

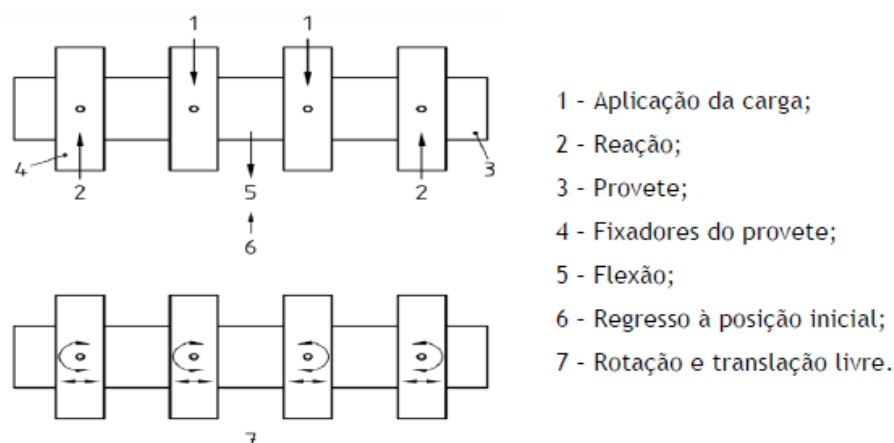


Figura 2.14 – Princípio básico do ensaio 4PB-PR (Afonso M., 2014 adaptado de EN 12697-24)

No estudo conduzido por Lavasani *et al.* (2015) referido anteriormente, verifica-se, à semelhança do que se concluiu na avaliação à deformação permanente, que o módulo de rigidez é influenciado pelo tipo e teor em fibras. Assim, conforme representado na Figura 2.15, à medida que o teor em fibras aumenta, o módulo de rigidez aumenta até atingir o seu valor máximo (ponto ótimo). A partir deste ponto, o teor em fibras afeta a aderência entre os agregados grossos conduzindo à perda de resistência e, conseqüentemente, à diminuição do módulo de rigidez.

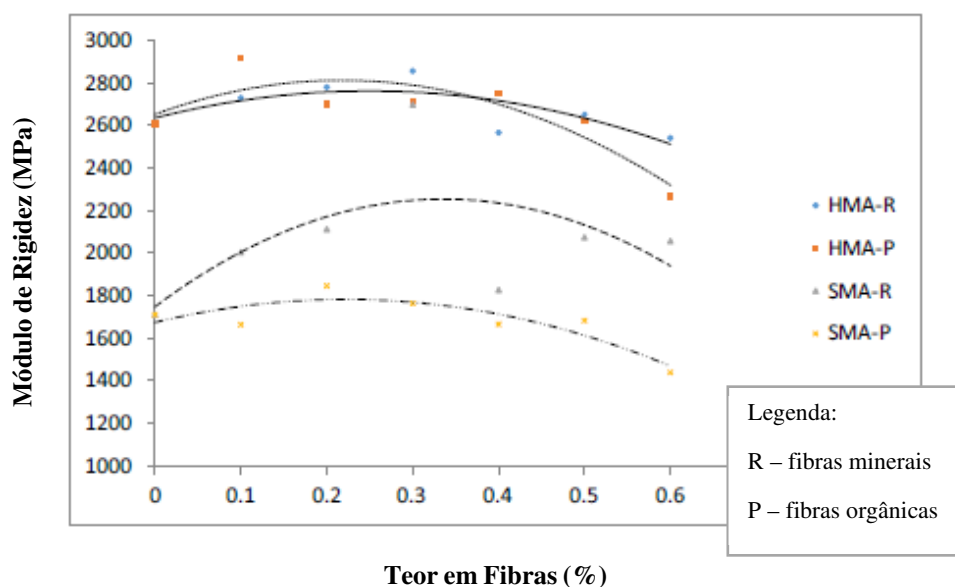


Figura 2.15 – Efeito da percentagem de fibras no módulo de rigidez (25°C) (Lavasani, Namin, & Fartash, 2015)

## 2.4. Formulação das Misturas Betuminosas do Tipo SMA

A formulação de misturas betuminosas visa estabelecer a composição ponderal dos constituintes da mistura através de um conjunto de procedimentos e ensaios, por forma a obter um comportamento otimizado em serviço de acordo com as condições locais de tráfego, climáticas e estruturais.

Numa primeira fase, a formulação de misturas betuminosas era realizada através de métodos ditos “por receita” (ou por especificação) resultantes da experiência acumulada da sua utilização. Mais tarde, surgiram, nos Estados Unidos da América, os métodos de formulação empíricos, sendo o método Marshall o mais conhecido. Com o aumento da agressividade do



tráfego e, conseqüentemente, maiores exigências de durabilidade do pavimento associadas à evolução dos materiais disponíveis, verificou-se uma evolução dos métodos de formulação. Os métodos mais recentes recorrem a procedimentos que simulam o comportamento das misturas betuminosas durante a sua produção, espalhamento, compactação e durante o seu período de vida em serviço (Silva H. , 2006).

No que concerne às misturas betuminosas do tipo SMA, a seleção dos agregados, da curva granulométrica, do tipo e percentagem de betume e do tipo e quantidade de aditivos estabilizadores a incorporar na mistura, não podem ser definidos com recurso exclusivo aos métodos ditos “por receita”, uma vez que não existe experiência suficiente para formular, com a fiabilidade necessária, este tipo de misturas. Assim, torna-se evidente a necessidade de complementar a sua formulação de acordo com critérios baseados nas propriedades mecânicas dos materiais que compõem a mistura e no seu desempenho (Capitão, 2003).

Desta forma, à semelhança de outras misturas betuminosas (EP, 2014), a formulação de misturas betuminosas do tipo SMA deve ser realizada de acordo com requisitos definidos em termos de receita de composição e de requisitos para os materiais constituintes, em associação com requisitos adicionais baseados em ensaios relacionados com o desempenho. Posto isto, em seguida serão abordados vários métodos utilizados na formulação de misturas betuminosas, nomeadamente, métodos ditos “por receita”, método Marshall (método empírico), métodos volumétricos (com especial enfoque na metodologia SUPERPAVE) e, por fim, métodos baseados no desempenho.

#### **2.4.1. Métodos ditos “por receita”**

Os métodos tipo “receita” são utilizados para misturas betuminosas tradicionais, de composição conhecida que, após longos períodos de aplicação, para certas condições de tráfego, de clima e materiais, revelaram ter desempenhos satisfatórios. De acordo com este método, a mistura betuminosa é definida por uma determinada especificação que preconiza, para além da constituição e procedimento para a elaboração da mistura, a curva granulométrica do agregado, a classe de penetração do betume, a espessura da camada, bem como as condições de fabrico na central, aplicação e compactação. Estes métodos não preveem a produção de provetes para ensaio em laboratório ou para análise volumétrica, uma vez que são métodos utilizados para composições conhecidas e testadas.

No caso das misturas betuminosas do tipo SMA, a aplicação de fusos granulométricos tornou-se o método principal na formulação da composição da mistura (Błażejowski, 2011). Este método envolve a análise granulométrica dos agregados, incluindo o fíler, seguida de um balanço entre as proporções de todos os agregados de forma a que a curva granulométrica se situe nos limites granulométricos definidos na norma europeia EN 13108-5.

Este método é bastante simples, mas não deve ser utilizado isoladamente, sob o risco de conduzir a uma deficiente formulação da mistura SMA. Assim, os métodos ditos “por receita” são utilizados como um ponto de partida para a definição da curva granulométrica, sendo exigidos outros ensaios que permitem avaliar determinadas propriedades das misturas betuminosas, como o método Marshall e o ensaio de *wheel-tracking* para análise do comportamento da mistura à deformação permanente.

#### **2.4.2. Métodos empíricos – Método Marshall**

Os métodos de formulação empíricos surgem da necessidade de preencher algumas lacunas existentes nos métodos ditos “por receita” e baseiam-se na determinação da percentagem de betume, de modo a respeitar os limites de diversas variáveis determinadas em ensaio, como a estabilidade, a deformação, a porosidade e a baridade. Através da análise destas variáveis, obtidas em provetes com diferentes teores em betume, procede-se à escolha do teor ótimo em betume como sendo aquele que otimiza o valor dessas variáveis (Silva H. , 2006).

Os métodos empíricos têm sido aplicados em todo o mundo na formulação de misturas betuminosas, sendo o mais conhecido desta categoria o método Marshall. Este método, desenvolvido nos E.U.A., utiliza um ensaio de compressão diametral ou de tração indireta. Incluem-se igualmente nesta categoria o método de Duriez, desenvolvido em França, que utiliza um ensaio de compressão uniaxial e o método Hveem, desenvolvido nos E.U.A., que utiliza um ensaio triaxial.

O método de formulação Marshall é o método de maior utilização nesta categoria, tanto em Portugal como no resto do mundo. Este método aplica-se a misturas betuminosas densas, aplicadas em qualquer camada, cuja dimensão máxima nominal dos agregados não seja superior a 25 mm.

A aplicação do método Marshall requer a produção de um número mínimo de 3 provetes (63 mm de altura por 101 mm de diâmetro) para cada percentagem de betume estudado (no

mínimo 5, variando em intervalos de 0,5%) e para cada curva granulométrica considerada. Após fabrico dos provetes, procede-se à compactação das misturas betuminosas, com o compactador Marshall, através da aplicação de 35, 50 ou 75 pancadas em cada lado do provete, de acordo com a classe de tráfego a que estarão sujeitas, ligeiro, médio ou pesado, respetivamente. Após este procedimento medem-se os parâmetros de composição volumétrica – VMA, volume de vazios, baridade máxima teórica e baridade aparente e, submetem-se os provetes ao ensaio Marshall, a uma temperatura de 60°C. Neste ensaio impõe-se uma deformação vertical ao provete, através de um carregamento de compressão diametral, a uma velocidade de 51 mm/min, até ocorrer a rotura do provete. Os resultados do ensaio são a estabilidade Marshall, a máxima carga para a qual ocorre a rotura do provete e a deformação Marshall, deformação do provete para a qual ocorre a rotura.

O método tradicional de formulação de misturas SMA tem por base a análise da porosidade em provetes Marshall (Abreu & Picado Santos, 2009). Para estas misturas a energia de compactação em ensaio Marshall é de 50 pancadas por face. Após a realização do ensaio, conforme descrito anteriormente, a percentagem ótima de betume é selecionada de modo a obter porosidades nos provetes Marshall entre 3% e 4% (Drüschner & Schäfer, 2000).

### 2.4.3. Métodos volumétricos

As características essenciais das misturas betuminosas do tipo SMA estão relacionadas com os seus parâmetros volumétricos, verificando-se que a qualidade da mistura é essencialmente determinada de acordo com as proporções volumétricas dos vazios, do betume e dos agregados (AAPA, 2000). Desta forma, a composição da mistura betuminosa é obtida com base em propriedades volumétricas, tais como o volume de vazios dos agregados (VMA), o volume de vazios da mistura betuminosa ( $V_v$ ) e o volume de vazios preenchidos por betume (VPB), procurando cumprir a principal exigência especificada, a porosidade pretendida.

Devido às limitações reconhecidas no método Marshall, foi desenvolvida, nos Estados Unidos da América, a metodologia SUPERPAVE (*Superior Performance Asphalt Pavements* – Pavimentos Asfálticos de Desempenho Superior) (NCHRP, 2007), permitindo especificar materiais, formular misturas betuminosas e prever o desempenho do pavimento. Assim, como

no método Marshall, são ensaiados provetes com diferentes composições granulométricas da mistura, variando a percentagem de betume, sendo os provetes compactados no compactador giratório, que procura reproduzir, tão fielmente quanto possível, as condições de compactação utilizadas *in situ*. A percentagem ótima de betume é calculada com base na porosidade, para vários níveis de compactação, correspondendo a porosidade, em geral, a 4%. Este valor traduz a chamada compactação de construção, assumida como aquela em que se obtém 92% da baridade máxima teórica (Silva A. , 2014).

Desta forma, esta metodologia veio inovar os métodos de formulação de misturas betuminosas, prevendo três níveis de formulação, de acordo com o volume de tráfego previsto (leve, médio e pesado, respetivamente), tal que (Gardete, Picado Santos, & Capitão, 2009):

- no primeiro nível, determina-se a percentagem em betume a utilizar na mistura betuminosa através da análise das propriedades volumétricas dos provetes;
- nos outros dois níveis, realizam-se ensaios mecânicos e de desempenho das misturas, como sejam, a resistência à deformação permanente, a resistência à fadiga e/ou a determinação do módulo de deformabilidade.

Os métodos volumétricos estão na base dos métodos de formulação baseados no comportamento das misturas betuminosas.

#### **2.4.4. Métodos baseados no desempenho**

A formulação de misturas betuminosas baseada no seu desempenho visa a obtenção da composição da mistura que lhe confira um determinado nível de comportamento. Estes métodos consistem em ensaios mecânicos e de desempenho das misturas, como sejam, a resistência à deformação permanente, a resistência à fadiga e/ou a determinação do módulo de deformabilidade.

Nos métodos de formulação baseados no comportamento das misturas betuminosas, produzem-se inicialmente misturas baseadas na composição volumétrica ótima. Em seguida, realizam-se os ensaios para avaliação das propriedades pretendidas, conduzindo à composição ótima da mistura betuminosa, aquela que garante que todas as propriedades de comportamento avaliadas são superiores a um mínimo especificado. Como exemplo, podem referir-se os

métodos desenvolvidos nos E.U.A., nos níveis 2 e 3 do método de formulação SUPERPAVE, para tráfego médio e elevado. Posteriormente, surgiu outro método de formulação baseado no comportamento das misturas betuminosas, apresentado no documento SHRP A-698 (Silva H. , 2006).

#### **2.4.5. Utilização de métodos combinados**

Atualmente, em diversos países, a formulação de misturas betuminosas resulta da combinação dos diversos métodos apresentados. A título de exemplo, em Portugal, a formulação de misturas betuminosas de acordo com as especificações presentes no CETO (EP, 2014), deve ser realizada tendo por base todos os métodos enunciados, estando estabelecidos valores a cumprir para cada procedimento.

A metodologia de formulação de misturas betuminosas do tipo SMA, prevê, para além dos fusos granulométricos, requisitos e propriedades a conferir à mistura, tais como:

- características Marshall – estabilidade e deformação;
- vazios na mistura de agregado (VMA) e porosidade ( $V_V$ );
- relação ponderal fíler-betume;
- índice de resistência conservada (IRC);
- resistência à deformação permanente;
- sensibilidade à água (ITSR);
- escoamento do betume.

### **2.5. Principais Aspetos Construtivos das Misturas Betuminosas do Tipo SMA**

O fabrico de misturas betuminosas a quente pode ser realizado em centrais de produção do tipo contínuo ou descontínuo. Os principais elementos que compõem uma central de produção de misturas betuminosas são: as tremonhas pré-doseadoras de agregados (unidade de alimentação de agregados frios); a unidade de secagem de agregados (tambor secador); os

tanques de armazenamento de betume e silos de fíler; silo de armazenamento de granulado de fibras (no caso de misturas do tipo SMA); a unidade misturadora; e os silos de armazenamento das misturas betuminosas quentes. A diferença na constituição dos dois tipos de central de produção prende-se com o facto de, nas centrais descontínuas existir uma unidade própria para a mistura, denominada misturador, enquanto nas centrais contínuas o processo de mistura desenvolve-se no tambor secador misturador (Bento, 2010).



Figura 2.16 – Exemplo de uma central de fabrico, do tipo contínuo, de misturas betuminosas a quente (Marini-Ermont, 2019)

A produção e aplicação de misturas betuminosas do tipo SMA processa-se de forma semelhante à das misturas tradicionais. No entanto, estas misturas requerem cuidados específicos. Assim, torna-se necessário um maior cuidado no que concerne ao fracionamento do agregado, à sequência de introdução dos materiais na misturadora e ao tempo de mistura, garantindo que é o suficiente para uma perfeita homogeneidade da mistura. O fabrico das misturas do tipo SMA processa-se em duas fases: a fase seca e a fase húmida. A fase seca inicia-se aquando da introdução dos agregados e estende-se até à introdução do granulado de fibras de celulose. A fase húmida inicia-se com a introdução do betume e termina quando a mistura é descarregada na pá que conduz o material quente ao silo de armazenamento (Błażejowski, 2011).

De acordo com vários autores, a sequência e tempos de mistura para a produção de SMA deverá variar de acordo com o tipo de aditivo estabilizador a incorporar na mistura. Assim, no caso de fibras celulósicas em granulado, estas são, geralmente, misturadas com o fíler e depois com o agregado, sem necessidade de qualquer tempo extra, na fase seca. Contudo, é indicado um tempo extra após a injeção do betume, para fomentar a impregnação das fibras (Graf, 2006; Błażejowski, 2011).

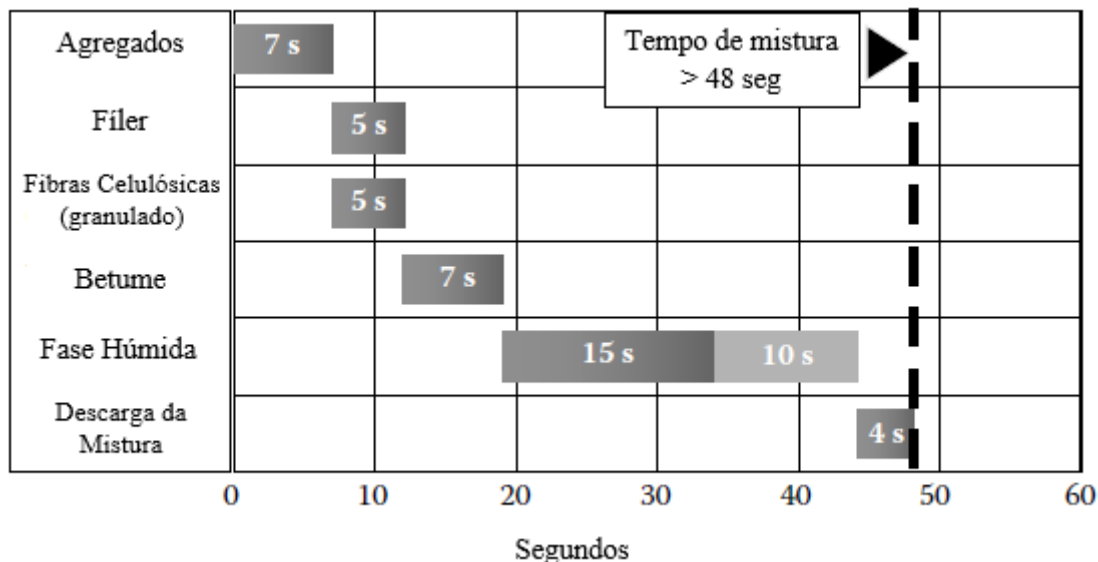


Figura 2.17 – Sequência e tempos de mistura dos componentes de misturas SMA (adaptado de Błażejowski, 2011)

Na prática, aquando da aplicação da mistura betuminosa do tipo SMA, pode verificar-se a exsudação do ligante. Tal pode dever-se à incorreta dispersão das fibras conduzindo à necessidade de ajustar o tempo de mistura, aumentando o tempo de mistura a seco.

A norma EN 12697-35, fixa o tempo máximo de mistura, no caso de um SMA, em 4 minutos.

As fibras podem ser introduzidas na misturadora de forma manual ou através de um sistema de dosagem automático, utilizado quando a produção o justificar (15 a 20 mil toneladas de mistura) (Martinho, Lanchas, Nunez, Batista, & Miranda, 2013).



Figura 2.18 – Doseador automático de granulado de fibras (Martinho, 2015)

Após o processo de fabrico segue-se a aplicação e compactação da mistura. As misturas betuminosas do tipo SMA apresentam uma elevada trabalhabilidade, devido à elevada percentagem de betume, o que facilita o seu espalhamento durante a aplicação. Nesta fase podem ser utilizados os mesmos equipamentos utilizados para as misturas convencionais: a pavimentadora para espalhamento e o cilindro de rolos lisos para compactação. É importante referir que, por forma a garantir a macrotextura característica das misturas SMA, apenas o compactador de rolo de cilindros lisos pode ser utilizado.

A compactação adequada deve ser obtida antes da mistura SMA arrefecer, cerca de 10°C abaixo da temperatura de fabrico, sendo que o cilindro de rolos deve ser passado no seguimento da passagem da pavimentadora, num curto espaço de tempo. De acordo com a experiência, a compactação deve ser iniciada com uma passagem estática seguida de passagens com vibração (EAPA, 2018).



Figura 2.19 – Pavimentadora e cilindro de rolos metálicos lisos (HAMM, 2019)



O esquema de compactação depende de vários fatores: as propriedades da mistura, em especial do betume, a espessura da camada a aplicar e as condições meteorológicas (EAPA, 2018).

## 2.6. Controlo de Qualidade

Tal como especificado no Caderno de Encargos Tipo Obra (EP, 2014) para as misturas betuminosas a quente, a verificação de conformidade de misturas do tipo SMA é constituída por duas fases de controlo de qualidade, sendo a primeira fase no decorrer da obra e a segunda fase, após conclusão da obra e antes da sua receção provisória.

Para efeitos de controlo de qualidade da unidade terminada, é necessária a consideração de lotes, que deverão corresponder ao menor dos critérios que se apresentam: 500 m de extensão de faixa; 3500 m<sup>2</sup> de faixa; extensão total construída num dia. Em cada lote são extraídos um mínimo de cinco carotes, em pontos escolhidos aleatoriamente, para determinação das propriedades a seguir mencionadas. Importa salientar que a regularidade superficial de cada lote será controlada 24 horas após execução de cada camada.

Na primeira fase são avaliadas, por lote, as seguintes propriedades:

- As características gerais da mistura, nomeadamente a análise granulométrica dos agregados e a percentagem de betume que deverá cumprir o estabelecido em projeto;
- A espessura média da camada não deverá ser inferior ao valor especificado no projeto. Caso tal se verifique, será passível de aceitação se, no máximo dois provetes apresentarem valores individuais de espessura inferiores a 10% da espessura especificada em cada lote;
- A porosidade deverá cumprir os requisitos definidos em caderno de encargos, podendo apenas ser aceite se, não mais de um provete, apresentar valor individual desenquadrado com os valores estabelecidos para a porosidade individual e média do lote a verificar;

- A regularidade superficial de acordo com:
  - Controlo topográfico face aos perfis transversais e longitudinais de projeto, conferindo se as cotas e a largura da camada executada cumprem o estabelecido em projeto;
  - Regularidade longitudinal e transversal avaliada em pontos distanciados de 25 m, por meio de régua fixa (no caso da regularidade transversal) ou móvel (no caso da regularidade longitudinal) com 3 metros de comprimento, podendo apenas ser aceite se todos os valores medidos cumprirem os critérios de regularidade estabelecidos.
- A aderência à camada subjacente deverá revelar a existência de uma colagem eficiente, não se verificando nenhum desprendimento de seções nos carotes extraídos;
- A macrotextura deverá apresentar-se homogênea, uniforme e isenta de segregações, e será avaliada pelos valores de profundidade de textura, MTD, determinados através do método volumétrico da mancha, caso o adjudicatário entenda adequado proceder à sua determinação anteriormente à caracterização final do pavimento. Os ensaios devem ser realizados ao longo da rodeira externa, espaçados de 100 m, e devem cumprir os valores mínimos estabelecidos nas especificações definidas para a mistura em causa;
- O coeficiente de atrito, avaliado por meio da realização de ensaios com o pêndulo britânico, caso o adjudicatário entenda adequado proceder à sua determinação anteriormente à caracterização final do pavimento. Os ensaios devem ser realizados com um espaçamento de 100 m e os valores obtidos de PTV (coeficiente de atrito pontual) devem cumprir os valores mínimos estabelecidos nas especificações definidas para a mistura em causa.

Por sua vez, a segunda fase de controlo de qualidade consiste na verificação da totalidade da extensão da camada de desgaste, após a conclusão da obra. Esta fase é denominada de “Caracterização Final do Pavimento” e pretende avaliar os seguintes parâmetros:

- A irregularidade longitudinal, por medição em contínuo, com recurso a equipamentos que permitem o levantamento do perfil longitudinal da superfície e

do Índice de Irregularidade Longitudinal, IRI. Estes valores são calculados por troços de 100 m e o valor representativo de cada troço é a média obtida nas duas rodeiras, sendo aceite se respeitarem os valores admissíveis especificados;

- A macrotextura, por medição em contínuo da profundidade de textura, com recurso a equipamentos tipo laser acoplados a um veículo. Esta avaliação é efetuada ao longo da rodeira externa de cada uma das vias construídas e permite determinar a profundidade média do perfil, MPD. Os resultados obtidos são aceites se o valor médio do ensaio em cada lote não for inferior ao estabelecido e, caso tal não se verifique, se apenas um valor individual (valor médio por troços de 100 m) por lote apresentar um resultado inferior, em mais do que 25%, àquele valor;
- O coeficiente de atrito, em medições em contínuo com piso molhado, com recurso a equipamentos munidos de um sistema de rega automático tipo SCRIM ou tipo *Grip Tester*, ao longo da rodeira externa de cada uma das vias do lote. Este ensaio deve ser realizado a uma velocidade de 50 km/h com uma película de água de 0,5 mm de espessura, sobre a superfície ensaiada. Para aceitação, a camada poderá passar por dois ensaios distanciados no tempo: antes da abertura ao tráfego e, caso os valores sejam não conformes, o ensaio será repetido ao fim de três meses de entrada em serviço da via. A camada é aceite se o valor médio em troços de 100 m não for inferior ao estabelecido e se não mais do que um dos resultados obtidos for inferior ao estabelecido em 10%;
- A avaliação da capacidade estrutural nos casos em que a estrutura de pavimentação seja construída na íntegra ou em obras de beneficiação cujo reforço de misturas betuminosas seja superior a 0,10 m de espessura. Esta avaliação é realizada por meio de ensaios com o defletómetro de impacto, FWD. A camada é aceite se o valor estimado para a vida restante do pavimento não for inferior ao estabelecido no projeto de execução.

Assim, verificada a conformidade das propriedades apresentadas, procede-se à aceitação da camada de desgaste. No caso da camada de desgaste não cumprir os requisitos de conformidade definidos em projeto, a mesma pode ser aceite se forem cumpridos os critérios de aceitação previstos com a aplicação de penalizações financeiras. Ainda assim, apesar destes

critérios estarem definidos em caderno de encargos, o dono da obra poderá rejeitar a camada de desgaste.

## **2.7. Considerações Finais**

As misturas betuminosas do tipo SMA têm sido uma aposta crescente na construção de camadas de desgaste. Esta tendência deve-se a um conjunto de propriedades fundamentais que estas misturas apresentam, revelando um bom desempenho mecânico e funcional. Características como a boa resistência à formação de rodeiras (deformação permanente) e o bom desempenho no que respeita ao fendilhamento (fadiga), aliadas à preocupação crescente com a redução da emissão de ruído no contacto pneu-pavimento e a elevada vida útil, são as propriedades invocadas na escolha das misturas SMA em detrimento de misturas tradicionais, como o betão betuminoso ou o betão betuminoso rugoso.

A constituição das misturas SMA possui, face às misturas habitualmente aplicadas, uma maior percentagem de betume, uma maior quantidade e qualidade de agregado grosso e a utilização de agentes estabilizadores, em geral, fibras celulósicas, o que se traduz num maior investimento inicial. Porém, a sua maior durabilidade origina um menor custo no ciclo de vida, dando resposta à cada vez maior preocupação com a minimização dos impactes ambientais.

Em suma, à semelhança das restantes misturas betuminosas, as misturas SMA devem ser elaboradas tendo em vista o adequado desempenho às solicitações a que o pavimento estará sujeito, respeitando a normalização existente, escolhendo criteriosamente os materiais que a constituem e procurando uma formulação que garanta os resultados pretendidos.

Um campo que deverá ser explorado prende-se com a diversidade de aditivos estabilizadores que podem ser incorporados nas misturas betuminosas do tipo SMA. Com base na experiência de utilização de fibras de celulose revestidas com betume, pretende-se caracterizar a incorporação de fibras de celulose revestidas com cera poliolefínica nestas misturas. Para isso, será necessário realizar misturas idênticas, respeitando a mesma formulação, processos construtivos e programa de ensaios, possibilitando assim uma análise comparativa do desempenho de ambas as misturas.

## **3. ESTUDO EXPERIMENTAL**

### **3.1. Enquadramento**

O objetivo deste estudo consiste em aprofundar o conhecimento sobre misturas betuminosas do tipo SMA e, em especial, estudar e avaliar o comportamento de misturas betuminosas do tipo SMA incorporando fibras celulósicas revestidas com cera poliolefínica. Para isso, realizou-se uma análise comparativa dos resultados obtidos com este material face aos resultados conhecidos para as misturas betuminosas do tipo SMA incorporando fibras celulósicas revestidas com betume.

Tendo em consideração os objetivos estabelecidos, foi programada a aplicação de duas misturas betuminosas do tipo SMA com incorporação dos dois tipos de fibras celulósicas descritas, em trechos realizados em obra, em condições idênticas. Neste capítulo descrevem-se as várias etapas deste estudo experimental, desde a formulação da mistura, a construção dos trechos e a caracterização laboratorial das misturas em análise.

Os trabalhos realizados no âmbito deste estudo inseriram-se numa empreitada de beneficiação de uma extensão aproximada de 16 km da Rede Complementar da Rede Rodoviária Nacional, cuja solução de beneficiação do pavimento da Plena Via consiste na aplicação de mistura betuminosa a quente do tipo SMA com características de desgaste. Esta mistura será designada, ao longo deste trabalho, por SMA8\* por se tratar de uma mistura do tipo SMA 8 com alterações na sua fração grosseira. A totalidade da camada de desgaste aplicada foi realizada com mistura SMA8\* com incorporação de fibras celulósicas revestidas com betume, com designação comercial Viatop, à exceção de um trecho com cerca de 350 m de extensão, cuja mistura aplicada incorpora fibras celulósicas revestidas com cera poliolefínica, com designação comercial Innocell FG3000.

### 3.2. Descrição Geral da Obra

A infraestrutura rodoviária objeto do presente estudo apresenta, em termos de secção transversal, um perfil de 1 x 2, com via de lentos. A faixa de rodagem tem uma largura de 7,0 m em secção corrente e de 10,0 m em secção corrente com via de lentos e bermas com larguras variáveis.

Antes da intervenção, apresentava um pavimento flexível com camada de desgaste em betão betuminoso, tendo resultado do seguinte faseamento construtivo (TPF, 2015):

- Em 1945: execução de um revestimento superficial betuminoso duplo, supostamente assente sobre uma camada de macadame hidráulico;
- Primeira operação de conservação em 1974: colocação, quando necessário, de mistura betuminosa densa, em camada de regularização. Sobre esta camada foi colocado um betão betuminoso, em camada de desgaste, com 0,03 m de espessura;
- Segunda operação de conservação: colocação de mistura betuminosa densa, em camada de regularização, com 0,04 m de espessura. Sobre esta camada foi colocado um betão betuminoso, em camada de desgaste, com 0,05 m de espessura.

No que concerne aos solos de fundação, estes apresentam natureza arenosa, com uma fração de material passado no peneiro n.º 200 ASTM compreendida entre 10 e 30%. Os teores de água *in situ* encontram-se, frequentemente, cerca de 3% acima do teor em água ótimo do Proctor Modificado e os graus de compactação *in situ* apresentam valores, em geral, entre 80 e 90% (TPF, 2015).



Figura 3.1 – Estrutura do pavimento antes da beneficiação

Relativamente às deformações observadas no pavimento, o troço em estudo apresentava uma camada de desgaste bastante envelhecida, sendo notório o seu envelhecimento e a falta de capacidade de carga do pavimento. Os tipos de deformações mais evidentes consistiam em cavado de rodeiras, deformações provocadas pelas raízes das árvores e fendilhamento, verificando-se significativamente fendilhamento do tipo pele de crocodilo, por vezes com desagregação superficial.



Figura 3.2 – Fendilhamento em estado avançado com início de desagregação (à esquerda) e fendilhamento com ramificação, formando pele de crocodilo (à direita) (TPF, 2015)

A solução adotada para beneficiação do pavimento Plena Via (TPF, 2015; JJR, 2019) consistiu na fresagem de 0,12 m, visando a criação de uma caixa para colocação das camadas de base e de desgaste. As camadas de misturas betuminosas a quente aplicadas, foram:

- Argamassa betuminosa AC4 reg ligante (AB), com uma espessura média de 0,03 m, nos locais que, após fresagem, se verifique ainda a possibilidade de propagação de fissuras às camadas superiores (cerca de 10% da área de fresagem), com posterior aplicação de camada de base em macadame betuminoso AC20 base 35/50 (MB), com uma espessura média de 0,09 m, sendo esta aplicação efetuada em duas camadas;
- Na restante área do pavimento, aplicação de camada em macadame betuminoso AC20 base 35/50 (MB), com uma espessura média de 0,12 m, sendo esta aplicação efetuada em duas camadas;
- Camada de desgaste em SMA8\* surf PMB 45/80-65, com 0,04 m de espessura.

### 3.3. Formulação das Misturas SMA

A formulação da mistura betuminosa do tipo SMA8\* em estudo compreendeu, numa primeira instância, a seleção e caracterização dos agregados e a definição da curva granulométrica. Posteriormente, recorreu-se ao método de formulação Marshall para a determinação da percentagem “ótima” de betume a incorporar na mistura e, consequentemente, a quantidade de fibras celulósicas.

#### 3.3.1. Agregados

Os agregados utilizados na mistura betuminosa em estudo, mistura SMA8\*, compreendem diferentes tipos de frações e naturezas pétreas, conforme se indica:

- Agregado de fração granulométrica 0/4 mm com natureza pétreia calcária;
- Agregado de fração granulométrica 0/6 mm com natureza pétreia granítica;
- Agregado de fração granulométrica 6/12 mm com natureza pétreia do tipo gabro.



Figura 3.3 – Agregados constituintes da mistura betuminosa SMA8\*: pó calcário 0/4 mm (à esquerda), pó granítico 0/6 mm (ao centro) e brita 6/12 mm (à direita)

Nos quadros seguintes, apresentam-se os requisitos dos agregados para a camada betuminosa SMA8\* com características de desgaste, impostos em Caderno de Encargos (EP, 2014). Note-se que, por não existirem requisitos dos agregados específicos para misturas betuminosas do tipo SMA, são utilizadas as especificações para o microbetão betuminoso rugoso, AC10 surf (mBBr).



Quadro 3.1 – Propriedades/ requisitos dos agregados para misturas betuminosas a quente do tipo AC 10 surf (mBBr) (adaptado de EP, 2014)

Propriedades/ Requisitos	Ref. <sup>a</sup> Normativa	Mistura SMA8* surf [AC 10 surf (mBBr)]
Qualidade dos finos (g/kg) [3% - 10%]	NP EN 933-9	MB <sub>F</sub> 10
Índice de achatamento (%)	NP EN 933-3	FI <sub>15</sub>
Percentagem de superfícies esmagadas e partidas (%)	NP EN 933-5	C <sub>100/0</sub>
Resistência à fragmentação, Los Angeles (%)	NP EN 1097-2	LA <sub>20</sub>
Resistência ao desgaste por atrito, micro-Deval (%)	NP EN 1097-1	M <sub>DE</sub> 15
Resistência ao polimento do agregado grosso para camada de desgaste (%)	NP EN 1097-8	PSV <sub>50</sub>
Massa volúmica das partículas (Mg/m <sup>3</sup> )	NP EN 1097-6	A declarar
Absorção de água (%)	NP EN 1097-6	≤ 1

### 3.3.2. Fíler

Na mistura betuminosa em estudo foi aplicado fíler comercial com natureza pétreo calcária. Nos quadros seguintes, apresentam-se os dados característicos do fíler utilizado na mistura SMA8\*, bem como a sua granulometria, obtida por peneiração com jato de ar.

Quadro 3.2 – Características do fíler utilizado na mistura betuminosa SMA8\* (JJR, 2019)

Características do fíler	Resultados obtidos
Massa volúmica (Mg/m <sup>3</sup> )	2,6
Volume de vazios (%)	30
Teor de humidade (%)	0

Quadro 3.3 – Granulometria do filler utilizado na mistura betuminosa SMA8\* (JJR, 2019)

Abertura da malha do peneiro	% de material passado
2	100
0,125	100
0,063	91

### 3.3.3. Ligante

O ligante utilizado é um betume modificado com polímeros, do tipo PMB 45/80-65 e as suas propriedades são as indicadas no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Propriedades do betume PMB 45/80-65 (Lusasfal, 2019)

Requisitos	Propriedades	Unidade	PMB 45/80-65
Consistência a temperatura de serviço intermédia	Penetração a 25°C	0,1 mm	Classe 4 (45 - 80)
Consistência a temperatura de serviço elevada	Temperatura de amolecimento	°C	Classe 7 (≥ 55)
Durabilidade, Resistência ao envelhecimento, RTFOT (163°C)	Variação de massa, máxima	%	Classe 2 (≤ 0,3)
	Penetração a 25°C	0,1 mm	Classe 7 (≥ 60)
	Aumento da temperatura de amolecimento	°C	Classe 2 (≤ 8)
Outros requisitos	Temperatura de inflamação	°C	Classe 3 (≥ 235)
	Ponto de fragilidade de Fraas	°C	Classe 5 (≤ -10)
	Recuperação elástica a 25°C	°C	Classe 3 (≥ 70)

### 3.3.4. Aditivo estabilizador

Por forma a realizar a análise comparativa de duas misturas betuminosas a quente do tipo SMA8\*, cuja única diferença reside no tipo de aditivo estabilizador incorporado na mistura, utilizaram-se dois tipos de granulado de fibras celulósicas:

- Fibras celulósicas revestidas com betume, com designação comercial *Viatop® Standard ARBOCEL* da J. Rettenmaier & Söhne;
- Fibras celulósicas revestidas com cera poliolefínica, com a designação comercial *Innocell® FG3000* da Ravago Chemicals.

Na Figura 3.4 observa-se o aspeto dos dois granulados de fibras celulósicas utilizados e no Quadro 3.5 sumarizam-se as suas principais propriedades.



Figura 3.4 – Granulado de fibras celulósicas Innocell® FG3000 e Viatop®

Quadro 3.5 – Propriedades das fibras de celulose Viatop® e Innocell® FG3000 (Ravago , 2018; JJR, 2019)

Propriedades		Viatop®	Innocell® FG3000
Fibra pura ativa	Comprimento médio	1000 µm	1100 µm
	Diâmetro médio	45 µm	45 µm
	pH	6,5 - 8,5	6 - 8
Granulado	Fibra celulósica pura	87 a 93 %	88 a 92 %
	Comprimento médio	2 a 10 mm	2 a 8 mm
	Diâmetro médio	3 a 5 mm	4 a 6 mm
	Densidade aparente	0,44 a 0,57 g/cm³	0,45 a 0,50 g/cm³

O betume utilizado no revestimento do granulado das fibras de celulose *Viatop*® é um betume 50/70 (JJR, 2019).

De acordo com o Caderno de Encargos, a percentagem do granulado de fibras a incorporar nas misturas deverá ser superior ou igual a 0,30%, em peso, da mistura.

### **3.3.5. Curva granulométrica e estudo Marshall**

Com base nas granulometrias das frações dos agregados constituintes da mistura, determinaram-se as proporções dos materiais granulares para a composição da mesma, visando a que a curva granulométrica se ajustasse, tão bem quanto possível, ao fuso granulométrico indicado no Caderno de Encargos.

Uma vez definida a curva granulométrica da mistura, procedeu-se ao estudo Marshall para determinar a percentagem de betume a incorporar na mistura betuminosa. Para o efeito, fabricaram-se provetes com diversas percentagens de betume, compactados com a aplicação de 50 pancadas em cada face do provete e submeteram-se os provetes ao ensaio Marshall. A percentagem “ótima” de betume resultou da média dos valores das percentagens de betume que conduzem a:

- Valor máximo da baridade da mistura betuminosa compactada (EN 12697-6);
- Valor médio dos limites de porosidade (EN 12697-8);
- Valor máximo correspondente à estabilidade Marshall (EN 12697-34);
- Valor médio dos limites da deformação Marshall (EN 12697-34).

### **3.3.6. Validação da composição da mistura SMA**

Após realização do estudo Marshall foi realizado um trecho experimental que permitiu aferir os processos construtivos e validar a composição ponderal da mistura a adotar em obra. Estes aspetos são descritos em pormenor na secção 3.4.2.

### 3.4. Processo Construtivo

O processo construtivo compreendeu as fases de transposição da fórmula de trabalho, definida após estudo laboratorial, para a central, a realização dos trechos experimentais e, por fim, a construção dos trechos piloto objeto deste estudo.

Em seguida, descrevem-se as diretrizes de fabrico, transporte e compactação da mistura betuminosa SMA8\*em estudo, bem como os equipamentos utilizados ao longo de todo o processo construtivo.

O fabrico da mistura betuminosa foi assegurado por uma central de produção do tipo contínuo, da marca ERMONT modelo RM – 160, com capacidade de produção máxima de 160 t/h, instalada em Alcácer do Sal. Os agregados constituintes da mistura encontravam-se em área de armazenamento junto da central de produção e a alimentação da central foi realizada pelo manobrador da pá carregadora, segundo indicação do operador da central que possui a fórmula de trabalho para fabrico da mistura, aprovada após construção do trecho experimental. A temperatura de fabrico prevista foi de 165°C, de acordo com as indicações do fabricante do betume.



Figura 3.5 – Em cima: central de fabrico, do tipo contínuo; em baixo: tremonhas para armazenamento de agregados (à esquerda) e sistema automático de dosagem de fibras (à direita)

Após a sua produção, a mistura foi transportada em viaturas basculantes de caixa aberta, sempre cobertas por encerado, com fundo liso e perfeitamente limpo.

O espalhamento da mistura betuminosa foi realizado por uma pavimentadora da marca VÖGELE SPRAY-JET, modelo SUPER 1800-3i, com mesa flutuante de extensão hidráulica, capaz de repartir uniformemente a mistura betuminosa sem a produção de segregação dos materiais constituintes. A mesa vibradora da pavimentadora é do tipo extensível e capaz de produzir de forma homogênea, a toda a largura de espalhamento, o grau de compactação mínimo especificado. A pavimentadora é movida de um sistema automático de nivelamento progressivo, constituído por sensores e por pêndulo.



Figura 3.6 – Pavimentadora VÖGELE SUPER 1800-3i, em trecho experimental

Segundo indicação do CETO, a compactação de misturas betuminosas do tipo SMA deve ser realizada com recurso a cilindros de rolo liso de peso médio igual ou superior a 10 toneladas, sem vibração. Assim, a compactação foi realizada com um cilindro de rolos lisos do tipo HAMM HD 110.





Figura 3.7 – Cilindro de rasto liso do tipo HAMM HD 110, em trecho experimental (à esquerda) e em trecho piloto (à direita)

No Quadro 3.6 apresenta-se um resumo das características dos equipamentos mencionados.

Quadro 3.6 – Resumo das características dos equipamentos utilizados (JJR, 2019)

<b>Pavimentadora VÖGELE SUPER 1800-3i</b>	
Peso de serviço	22 420 kg
<b>Cilindro HAMM HD 110</b>	
Peso de serviço	10 540 kg
Peso básico	9 930 kg
Peso máximo	13 300 kg
Carga sobre o eixo dianteiro	5 300 kg
Carga sobre o eixo traseiro	5 300 kg

### 3.4.1. Transposição para a central

Após concluído o processo de formulação da mistura, procedeu-se à transposição da fórmula de estudo para a central de fabrico, de modo a validar o processo produtivo. Foram realizadas quatro transposições até aprovação da fórmula final. No decorrer destas transposições, procurou-se garantir que a fração granulométrica mais fina da curva se

aproximava do limite inferior do fuso granulométrico, com o intuito de potenciar a macrotextura.

### 3.4.2. Trecho experimental

De acordo com as recomendações presentes nas Cláusulas Técnicas Especiais, uma vez validada a capacidade da central de fabrico para reprodução da fórmula de estudo, realizou-se um trecho experimental para aferir as características da mistura betuminosa proposta e validar o processo de execução em obra.

A realização deste trecho experimental decorreu a 7 de maio de 2019 e a mistura SMA8\* surf PMB 45/80-65 foi aplicada sobre uma camada de AC20 bin ligante (MB) que, por sua vez assentava, sobre duas camadas constituídas por material proveniente de fresagem (80%) e ABGE (20%), replicando na íntegra o método construtivo da empreitada de beneficiação. A espessura da camada aplicada foi de 0,04 m e o procedimento e os equipamentos adotados para a execução do trecho experimental foram os descritos anteriormente.



Figura 3.8 – Aspeto final da mistura SMA8\*, aplicada no trecho experimental

A execução do trecho experimental permitiu verificar e afinar parâmetros, tais como, as condições de transporte e de espalhamento, a temperatura, trabalhabilidade da mistura e o esquema de compactação.

### 3.4.3. Aplicação em obra

Após realização do trecho experimental e a sua aceitação por parte da fiscalização, procedeu-se à aplicação da mistura SMA8\* em obra. Esta aplicação decorreu nos meses de



maio e junho de 2019, com recurso aos procedimentos e equipamentos descritos anteriormente. Em síntese, enumeram-se os principais aspetos construtivos:

- A mistura betuminosa a quente do tipo SMA8\* foi produzida em central contínua a uma temperatura alvo de 165°C;
- Após o fabrico, a mistura foi transportada para a obra em viaturas basculantes de caixa aberta e descarregada na pavimentadora para realização do seu espalhamento em camada de 0,04 m;
- A compactação foi realizada quando a mistura betuminosa atingiu uma temperatura entre os 150°C e 155°C, tendo sido realizado um mapa de espalhamento, numa colaboração entre o adjudicatário e a fiscalização, com a finalidade de controlar a temperatura da mistura de todas as viaturas de transporte e, assim, realizar a compactação mais próxima ou mais afastada da pavimentadora, tendo em conta a temperatura pretendida para a compactação;
- Em todo o processo de compactação existiu um cilindro de rasto liso de reserva, com as mesmas características;
- As juntas de trabalho foram feitas de modo a assegurar a perfeita ligação das secções executadas.

Como enunciado no início deste capítulo, a totalidade da camada de desgaste aplicada nesta empreitada foi realizada com mistura betuminosa SMA8\* PMB 45/80-65 com incorporação de fibras celulósicas de designação comercial Viatop, à exceção de um trecho com cerca de 350 m. Este trecho foi realizado com mistura betuminosa SMA8\* PMB 45/80-65 com incorporação de fibras celulósicas de designação comercial Innocell FG3000, em 10 de maio de 2019, por forma a dar resposta aos objetivos do presente trabalho. A construção deste trecho foi idêntica à construção da restante camada de desgaste, não se tendo verificado necessária qualquer alteração no processo construtivo, bem como, qualquer diferença na camada espalhada e compactada.



Figura 3.9 – Aspeto final da mistura aplicada no trecho piloto realizado com SMA8\* incorporando fibras celulósicas Innocell FG3000

#### 3.4.4. Controlo de qualidade das misturas SMA

O controlo de qualidade completou o processo construtivo e destinou-se a verificar a conformidade da mistura betuminosa SMA8\* aplicada. Esta fase compreendeu ensaios executados nos meses de maio e junho de 2019 e compreendeu sondagens à rotação, para aferição de características como a espessura da camada de desgaste, a baridade e a porosidade, e a avaliação das características superficiais do pavimento, nomeadamente a microtextura, pelo ensaio do Pêndulo Britânico, e a macrotextura, pelo ensaio da técnica volumétrica da mancha.

##### ○ Macrotextura – Mancha de Areia

A avaliação da macrotextura pela técnica volumétrica da mancha processou-se pela medição da profundidade média de textura da superfície (MTD – *Mean Texture Depth*) da mistura SMA8\* e encontra-se preconizado na norma europeia EN 13036-1. Este ensaio foi realizado pontualmente e consistiu no espalhamento, por um disco revestido de borracha, de um volume conhecido de areia de granulometria normalizada, segundo uma área de geometria circular. Em seguida, procedeu-se a diversas medições do diâmetro para avaliar a área circular de espalhamento. A divisão do volume de areia pela área média da “mancha” formada pelo espalhamento, avaliada com base na medição do diâmetro obtido, indicou a profundidade média de textura da superfície.

- **Microtextura – Pêndulo Britânico**

O Pêndulo Britânico é um equipamento portátil e de simples utilização, que permitiu obter a resistência pontual à derrapagem na superfície do pavimento. Este ensaio, previsto na norma europeia EN 13036-4, realizou-se sobre a superfície do pavimento limpa e devidamente saturada de água. O valor medido neste ensaio é expresso em unidades PTV (*Pendulum Test Value* na terminologia inglesa), corrigido para a temperatura da superfície do pavimento durante o ensaio.

### **3.5. Avaliação do Desempenho das Misturas SMA**

Este subcapítulo pretende referenciar os ensaios realizados em laboratório a fim de caracterizar as misturas betuminosas em estudo. Numa primeira fase, pretendeu-se perceber o efeito da incorporação de fibras celulósicas, na mistura SMA em análise, no escoamento do ligante, através da realização do ensaio de escoamento pelo método de *Schellenberg*. Em seguida, para avaliação das características mecânicas das misturas em estudo, realizaram-se dois ensaios, o ensaio da resistência à deformação permanente e o ensaio de módulo de rigidez e de avaliação da resistência à fadiga. Estes ensaios foram realizados no laboratório da Consulpav – Consultores e Projetistas de Pavimentos, Lda.

Importa referir que, tendo presente o objetivo de analisar comparativamente as misturas betuminosas do tipo SMA8\* cuja única diferença reside no tipo de revestimento das fibras celulósicas incorporadas – betume (Viatop) ou cera poliolefínica (Innocell FG3000), os ensaios no âmbito desta campanha laboratorial foram realizados para ambas as misturas, segundo os mesmos procedimentos e condições. Em seguida definem-se as duas misturas betuminosas do tipo SMA8\* analisadas nos ensaios:

- SMA8\* A - V: mistura fabricada em laboratório com incorporação de fibras celulósicas Viatop;
- SMA8\* A - I: mistura fabricada em laboratório com incorporação de fibras celulósicas Innocell FG3000.

Em síntese, no Quadro 3.7 apresentam-se as normas que regulam os ensaios descritos, bem como os requisitos constantes nas Cláusulas Técnicas Especiais do projeto para misturas do tipo SMA8\* utilizando betume PMB 45/80-65.

Quadro 3.7 – Normas de ensaio para avaliação das características mecânicas e valores exigidos para a mistura SMA8\*

Requisitos / Propriedades		Norma de Ensaio	Valores Exigidos
Escorrimento do Ligante	<i>Schellenberg</i>	EN 12697-18	$\leq 0,3\%$
Deformação Permanente	<i>Wheel-Tracking</i>	EN 12697-22	WTS <sub>AIR</sub> máx 0,07
Módulo de Rigidez		EN 12697-26	-
Resistência à Fadiga		EN 12697-24	-

### 3.5.1. Escorrimento do ligante

O ensaio de escorrimento do ligante foi realizado de acordo com o método de *Schellenberg*. Este ensaio foi realizado para várias misturas SMA8\* fabricadas em laboratório, fazendo variar a percentagem de fibras incorporadas na mistura. Foram fabricadas misturas sem incorporação de aditivo estabilizador e com incorporação de fibras celulósicas em percentagens de 0,2%, 0,3%, 0,4% e 0,5%, sobre o peso da mistura. Foram realizadas, para cada percentagem de fibras incorporadas, duas misturas SMA8\*, uma com incorporação de fibras celulósicas Viatop e outra com fibras celulósicas Innocell FG3000.

O ensaio consistiu em colocar a mistura betuminosa fabricada em laboratório no interior de um copo de vidro e colocar o conjunto no interior da estufa a 180°C, 15°C superior à temperatura de fabrico da mistura, por se tratar de um betume modificado, durante um período de 60 minutos  $\pm$  1 minuto. Após este tempo retirou-se o recipiente da estufa e virou-se o copo com a base para cima durante 10 segundos  $\pm$  1 segundo. O resultado do ensaio corresponde ao material que fica retido no copo.



Figura 3.10 – Realização do ensaio de *Schellenberg* (à esquerda) e material retido no copo (à direita)

### 3.5.2. Resistência à deformação permanente

O ensaio de deformação permanente, muitas vezes designado por ensaio de pista ou ensaio *wheel-tracking*, destina-se a avaliar a resistência da mistura à deformação plástica, através da medição da profundidade de rodeira que é obtida durante a aplicação de um determinado número de ciclos de ensaio de uma roda normalizada.

Este ensaio foi realizado em provetes prismáticos (lajetas) produzidas em laboratório e compactadas com recurso ao *Roller Compactor*. Os ensaios de deformação permanente foram realizados segundo o procedimento B ao ar, preconizado na norma EN 12697-22, tendo as lajetas sido acondicionadas durante 4 horas à temperatura de 60°C e posteriormente sujeitas a 10000 ciclos de carga.

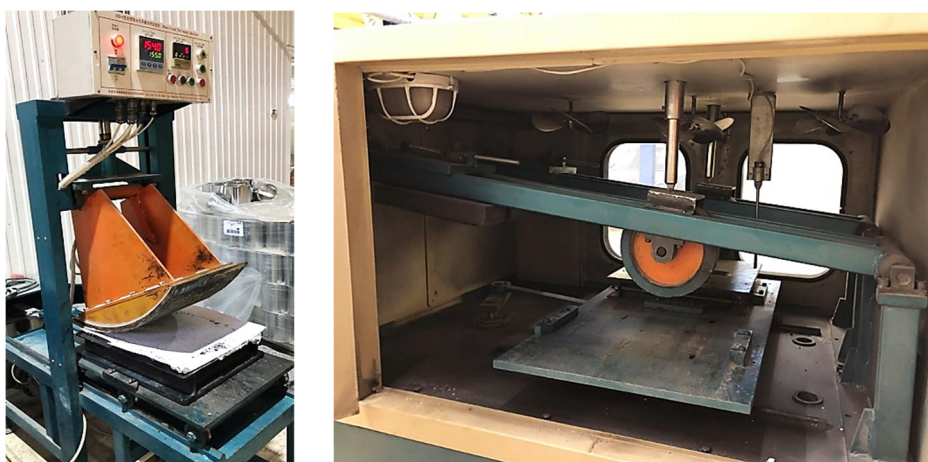


Figura 3.11 – *Roller Compactor* (à esquerda) e equipamento para ensaio de pista (à direita), pertencentes ao laboratório da empresa Consulpav



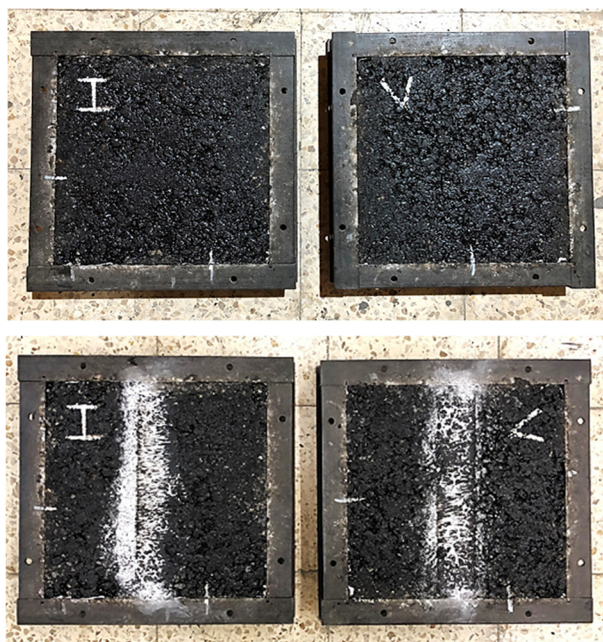


Figura 3.12 – Lajetas das misturas SMA8\* A - I e SMA8\* A - V antes (em cima) e após (em baixo) ensaio de deformação permanente

### 3.5.3. Módulo de rigidez e resistência à fadiga

Para realização dos ensaios para determinação do módulo de rigidez e avaliação da resistência à fadiga foram ensaiados provetes prismáticos (vigas), obtidos por corte de lajetas. Na Figura 3.13 mostra-se, a título de exemplo, alguns dos provetes utilizados neste ensaio e na Figura 3.14 observa-se um provete colocado no equipamento de ensaio.

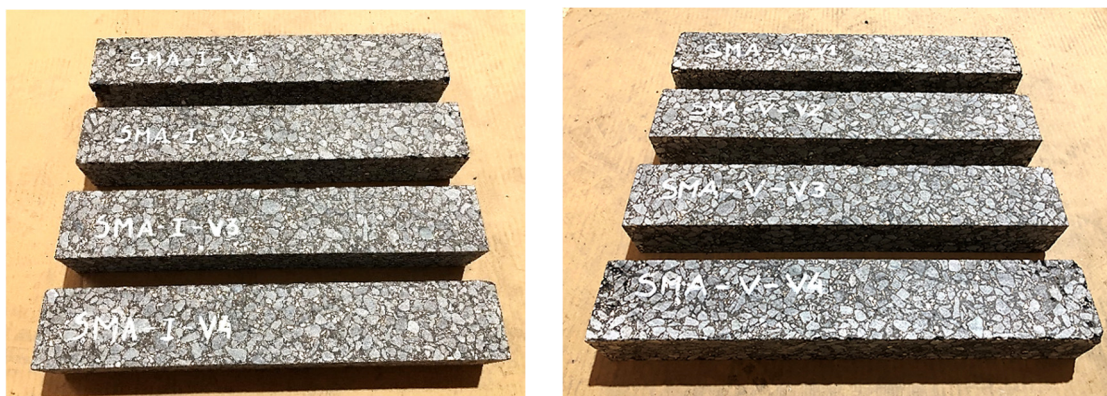


Figura 3.13 – Provetes prismáticos avaliados no ensaio de módulo de rigidez e de resistência à fadiga

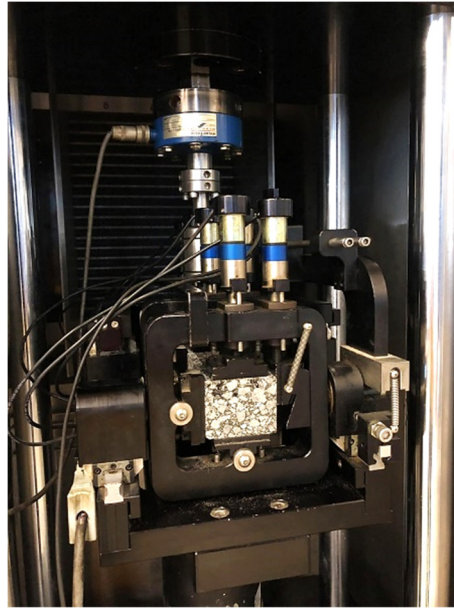


Figura 3.14 – Ensaio de flexão em quatro pontos com viga

O módulo de rigidez foi determinado por ensaio de flexão em quatro pontos, segundo o Anexo B da norma EN 12697-26. Complementarmente, mediu-se o ângulo de fase, o qual mede o desfasamento no tempo entre a onda da carga e a onda da deformação e, através do qual se evidencia o comportamento elástico, para valores entre  $0^\circ$  e  $45^\circ$ , ou viscoso, para valores entre  $45^\circ$  e  $90^\circ$ . O ensaio foi realizado a  $20^\circ\text{C}$ , o carregamento foi definido de forma a produzir uma deformação de  $50\text{ }\mu\text{m}$ , e variou-se a frequência de carregamento entre 0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 8 Hz e 10 Hz, sendo que, no final o provete voltou a ser carregado a 0,1 Hz, de modo a aferir se ocorreu algum dano prematuro por fadiga.

A resistência à fadiga foi avaliada segundo o ensaio de flexão em quatro pontos, especificado na norma EN 12697-24, com aplicação de uma extensão controlada. O objetivo deste ensaio consiste na determinação do número de ciclos de aplicação de carga até que o provete atinja a rotura, quando se verifica a diminuição do módulo de rigidez para metade do seu valor inicial. O ensaio decorreu a  $20^\circ\text{C}$ , com uma frequência de aplicação de 10 Hz. Inicialmente determinou-se o módulo de rigidez inicial e procedeu-se à aplicação de cargas sinusoidais até se atingir a rotura por fadiga dos provetes.

### 3.6. Caracterização Final do Pavimento

A caracterização final do pavimento foi realizada entre os meses de julho e novembro de 2019 pela empresa Consulstrada – Consultores de Engenharia e Sistemas de Gestão, Lda., com o objetivo de avaliar as características de superfície e a capacidade de carga do pavimento. Os ensaios constantes da campanha realizada para a caracterização final do pavimento permitiram avaliar as seguintes características: microtextura, através do ensaio com recurso ao equipamento SCRIM; macrotextura, através do ensaio realizado com o equipamento Texturómetro Laser; irregularidade superficial longitudinal, através do ensaio realizado com o equipamento Perfilómetro Laser; capacidade de carga do pavimento, através de ensaios de carga com o equipamento Defletómetro de Impacto.

Em seguida, descrevem-se os ensaios realizados, bem como o funcionamento dos equipamentos utilizados.

#### 3.6.1. Macrotextura

A avaliação da macrotextura foi realizada com recurso ao equipamento Texturómetro Laser. Este equipamento é composto por um sensor laser de alta precisão com 64 kHz e pode operar a velocidades compreendidas entre 40 e 120 km/h, permitindo a medição em contínuo da profundidade média do perfil (MPD – *Mean Profile Depth*) (Consulstrada, 2019).



Figura 3.15 – Equipamento Texturómetro Laser (Consulstrada, 2019)



### 3.6.2. Microtextura

Os ensaios para avaliação da microtextura têm como objetivo proceder à medição da resistência à derrapagem. O ensaio para avaliação da aderência através da medição do coeficiente de atrito foi realizado com recurso ao equipamento SCRIM (*Sideway Force Coefficient Routine Investigation Machine* na terminologia inglesa). Este equipamento permitiu a medição do valor do coeficiente de atrito transversal, CAT, devido à obliquidade da roda de ensaio relativamente ao sentido do movimento do veículo de ensaio. O ensaio foi realizado sobre a superfície do pavimento molhada, com recurso a um jato de água controlado, alimentado por um reservatório de água acoplado ao equipamento, a uma velocidade de 50 km/h (Consulstrada, 2019).



Figura 3.16 – Equipamento SCRIM (à esquerda) e unidade de medida SCRIM (à direita) (Consulstrada, 2019)

### 3.6.3. Irregularidade longitudinal superficial (IRI)

A medição da Irregularidade Longitudinal, expressa através do IRI (*International Roughness Index* na terminologia inglesa) foi realizada utilizando o Perfilómetro Laser. Este equipamento permitiu a medição do perfil longitudinal da estrada, ao longo de ambos os rodados, mediante dispositivos lasers instalados ao nível do para-choques do veículo. As leituras efetuaram-se circulando a uma velocidade constante, entre os 40 e os 120 km/h (Consulstrada, 2019).



Figura 3.17 – Equipamento Perfilômetro Laser (Consulstrada, 2019)

### 3.6.4. Capacidade de carga do pavimento

Os ensaios de carga realizaram-se com recurso ao Defletômetro de Impacto – FWD (*Falling Weight Deflectometer* na terminologia inglesa). Este equipamento permite efetuar ensaios de carga não destrutivos através da aplicação, na superfície do pavimento, de uma força de impulso resultante da queda de uma massa de uma determinada altura. Os deslocamentos verticais da superfície do pavimento induzidos por esta carga são medidos em vários pontos, através de 9 geofones (medidores de velocidades sísmicas) apoiados na referida superfície.



Figura 3.18 – Equipamento Defletômetro de Impacto (Consulstrada, 2019)

Este equipamento, para além de medir o valor de pico da força, dos deslocamentos e do tempo de aplicação da carga, permite medir e registar a distância percorrida e as temperaturas do ar e da superfície do pavimento. Em cada ponto ensaiado com o Defletômetro de Impacto é efetuado um impacto inicial, cujo objetivo é o ajuste da placa de carga à superfície do pavimento e, de seguida, um impacto para o qual se efetua a medição das deflexões. A força aplicada na superfície do pavimento foi de 65 kN. Essa força é aplicada ao pavimento através de uma placa de carga de 0,30 m de diâmetro. Em cada ensaio foi efetuada a medição da temperatura

atmosférica e da superfície do pavimento, a fim de se proceder à correção dos módulos para as temperaturas de projeto (Consulstrada, 2019).

### **3.7. Considerações Finais**

Neste capítulo foram apresentadas as diversas fases que compõem a empreitada de beneficição onde foi aplicada a mistura betuminosa a quente SMA8\* PMB 45/80-65. Descreveu-se o processo de formulação da mistura e o processo construtivo, incluindo os ensaios realizados para controle de qualidade da mistura aplicada em camada de desgaste, bem como, os ensaios de caracterização final do pavimento. Estes ensaios permitiram caracterizar o pavimento no que concerne à macrotextura, microtextura, regularidade superficial e capacidade de carga.

Este capítulo apresentou também os ensaios, realizados em laboratório, para avaliação comparativa do desempenho das misturas SMA8\* utilizando ou fibras celulósicas revestidas com betume ou fibras celulósicas revestidas com cera poliolefínica. A realização destes ensaios permitiu avaliar a influência da percentagem de fibras celulósicas, incorporadas na mistura, no escoamento do ligante, a avaliação das características mecânicas, nomeadamente no que respeita à resistência à deformação permanente, módulo de rigidez e resistência à fadiga.

Os resultados obtidos nas diversas fases de formulação das misturas SMA8\* e nos ensaios referidos neste capítulo serão apresentados e discutidos no próximo capítulo, Capítulo 4 – Resultados e Discussão.



## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Enquadramento**

Neste capítulo apresentam-se e analisam-se resultados relativos à formulação das misturas SMA8\* e a ensaios realizados no âmbito o controlo de qualidade das misturas, ensaios para avaliação do desempenho das misturas e, por fim, ensaios realizados para caracterização final do pavimento. Importa referir que os resultados apresentados neste capítulo provêm dos valores obtidos em ensaios de campo e em ensaios realizados em laboratório. Os ensaios realizados em laboratório tiveram como objeto de estudo misturas SMA8\* A, fabricadas em laboratório, com as mesmas características das misturas aplicadas em obra.

### **4.2. Formulação das Misturas SMA**

Em seguida apresentam-se as características dos materiais constituintes da mistura SMA 8\*, nomeadamente os agregados e o betume, bem como, os resultados obtidos no estudo Marshall.

#### **○ Agregados**

No Quadro 4.1 apresentam-se os valores obtidos para variadas propriedades dos agregados constituintes das misturas betuminosas SMA8\*.

Quadro 4.1 – Valores obtidos para os agregados constituintes da mistura betuminosa SMA8\* (JJR, 2019)

Propriedades/ Requisitos	Fração		
	0/4 mm	0/6 mm	6/12 mm
Qualidade dos finos (g/kg)	1,67	3,33	-
Índice de achatamento (%)	-	-	16
Percentagem de superfícies esmagadas e partidas (%)	-	-	100
Resistência à fragmentação, Los Angeles (%)	-	-	16
Resistência ao desgaste por atrito, micro-Deval (%)	-	-	14
Resistência ao polimento do agregado grosso para camada de desgaste (%)	-	-	56
Massa volúmica das partículas (Mg/m <sup>3</sup> )	2,57	2,77	2,88
Absorção de água (%)	0,90	0,50	0,94

Por observação dos resultados obtidos e, enquadrando-os com os requisitos dos agregados para misturas betuminosas a quente do tipo AC 10 surf (mBBr) apresentados no Quadro 3.1, observa-se que os valores obtidos para todas as propriedades cumprem os requisitos estabelecidos com exceção do índice de achatamento da fração granulométrica 6/12, que deveria ser igual ou inferior a 15% (FI<sub>15</sub>).

#### ○ **Betume**

Para avaliar algumas propriedades do betume utilizado na formulação das misturas SMA8\*, procedeu-se à sua caracterização quanto à viscosidade, penetração, resiliência e temperatura de amolecimento, como se ilustra na Figura 4.1. Estes ensaios foram realizados no laboratório da empresa Consulpav e os resultados obtidos podem ser observados no Quadro 4.2.



Figura 4.1 – Ensaios realizados ao betume PMB 45/80-65. Em cima: ensaio de viscosidade (à esquerda) e ensaio de penetração (à direita); em baixo: ensaio de resiliência (à esquerda) e ensaio anel e bola (à direita)

Quadro 4.2 – Valores obtidos para o betume PMB 45/80-65 incorporado na mistura betuminosa SMA8\*

Propriedades	Unidade	PMB 45/80-65
Viscosidade a 175°C	m.Pa.s	312
Penetração a 25°C	0,1 mm	44
Resiliência	%	17
Temperatura de amolecimento (ensaio anel e bola)	°C	68

Enquadrando os resultados obtidos com as propriedades do betume PMB 45/80-65 constantes do Quadro 3.4, observa-se que o valor obtido para a penetração a 25°C é ligeiramente inferior ao requisito, uma vez que deveria situar-se no intervalo 45 a 80 (0,1 mm).

### 4.2.1. Curva granulométrica e estudo Marshall

Em seguida, apresentam-se as principais conclusões resultantes do estudo laboratorial realizado, com a finalidade de determinar a composição da mistura betuminosa a quente do tipo SMA8\* surf PMB 45/80-65, conforme enunciado no subcapítulo 3.3.5.

Inicialmente, para realização do estudo laboratorial da mistura SMA8\*, foram definidas as proporções dos materiais granulares a incorporar na mistura, conforme se indica no Quadro 4.3. Na Figura 4.2 apresenta-se a respectiva curva granulométrica da mistura.

Quadro 4.3 – Percentagens das frações granulométricas a incorporar na mistura (fase de estudo laboratorial)

Materiais	Percentagens
Brita 6/12	71,0 %
Pó 0/6	10,0 %
Pó de Pedra 0/4	12,0 %
Fíler comercial	7,0 %

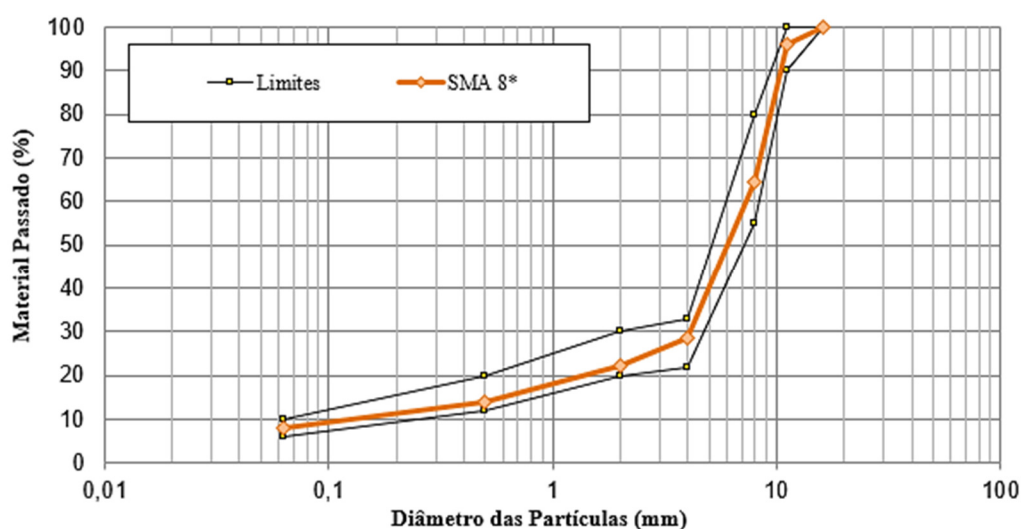


Figura 4.2 – Curva granulométrica da mistura SMA8\* obtida em fase de estudo laboratorial

Posteriormente, conduziu-se o estudo Marshall com o intuito de aferir a percentagem “ótima” de betume. No Quadro 4.4 e na Figura 4.3 apresentam-se os principais resultados obtidos.



Quadro 4.4 – Valores de baridade, porosidade, estabilidade e deformação obtidos no ensaio Marshall

% Betume	Baridade, $\rho_{bssd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidade, $V_v$ (%)	Estabilidade, $S$ (kN)	Deformação, $F$ (mm)	Quociente Marshall, $Q$ (kN/mm)
5,0	2484	2,7	12,4	2,2	5,6
5,5	2500	3,1	13,1	2,5	5,5
6,0	2498	3,9	14,2	2,8	5,4
6,5	2483	5,4	13,4	4,3	3,1
7,0	2478	5,8	12,7	4,7	2,7

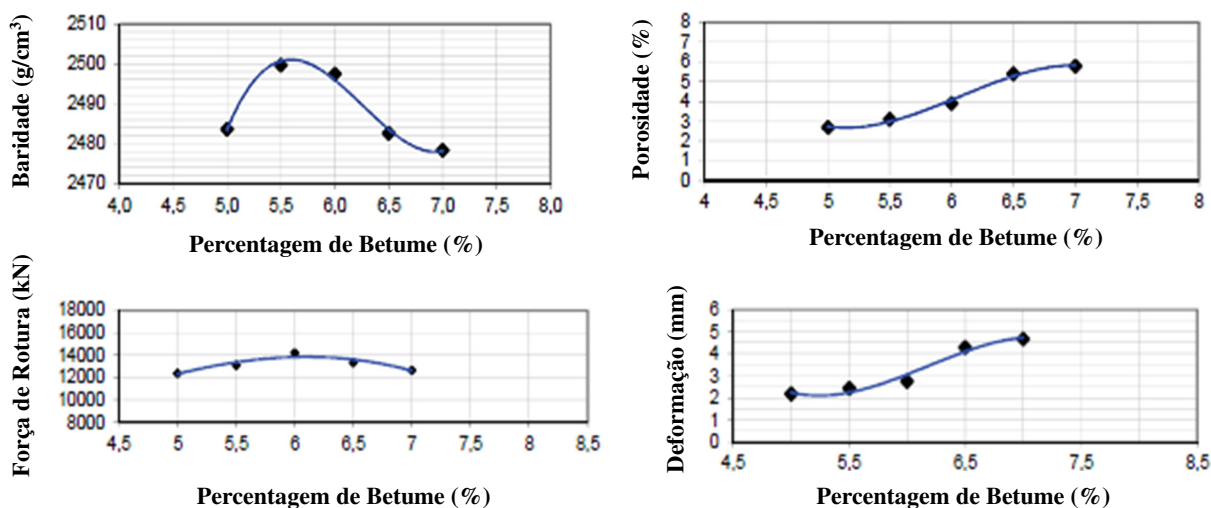


Figura 4.3 – Curvas características da mistura SMA8\* obtidas no ensaio Marshall

Após análise dos resultados concluiu-se que a percentagem média ponderal determinada é de 5,8 % de betume. No Quadro 4.5 apresenta-se o quadro resumo das conclusões obtidas, referenciando os valores limites impostos pelo C.E.

Quadro 4.5 – Principais conclusões do estudo de composição da mistura betuminosa a quente do tipo SMA8\*  
surf PMB 45/80-65 com 5,8% betume

Requisitos / Propriedades		Ref. <sup>a</sup> Normativa	Valores Exigidos	Valores Obtidos
Características Marshall	Estabilidade, S (kN)	EN 12697-34	$S_{\min}7,5 - S_{\max}17,5$	14
	Deformação, F (mm)		$F_{\min}2,0 - F_{\max}4,0$	2,6
	Quociente Marshall, Q (kN/mm)		$Q_{\min}3,0$	3
Vazios na mistura de agregados (VMA), (%)		EN 12697-8	$VMA_{\min}14$	17,8
Porosidade, $V_v$ (%)		EN 12697-8	$V_{\min}2,0 - V_{\max}5,0$	3,4
Índice de Resistência Conservada (IRC) em ensaios de compressão Marshall (%)		MIL-STD- 620A	$IRC_{\min}80$	89
Resistência à Deformação Permanente (“Wheel-tracking”)	Taxa de deformação $WTS_{AIR}$ (mm/10 <sup>3</sup> ciclos de carga)	EN 12697-22	$WTS_{AIR \max}0,07$	0,03
	Profundidade de rodeira máxima, $PRD_{AIR}$ (%)		Valor a declarar	3,2
Percentagem de ligante (%)		-	$B_{\min}6,0$	5,8
Sensibilidade à água, ITSR (%)		EN 12697-12	$ITSR_{90}$ (90%)	88
Escorrimento de betume (%)		EN 12697-18	$\leq 0,3$	0,3

Fixada a percentagem de betume e, com base no ensaio de escorrimento do ligante, definiu-se que a percentagem de granulado de fibras celulósicas a incorporar na mistura corresponde a 0,30%, em peso, da mistura. Importa referir que a dosagem de fibras celulósicas Viatop e de fibras celulósicas Innocell FG3000 a incorporar na mistura foi a mesma, uma vez que, com a dosagem definida, ambas cumpriram os valores exigidos em C.E. para o escorrimento do betume.

#### 4.2.2. Transposição para a central de fabrico

Visto que as Cláusulas Técnicas Especiais definem a percentagem mínima de ligante, a incorporar nas misturas betuminosas do tipo SMA, em 6,0%, verificou-se a necessidade de redefinir a percentagem de betume de 5,8% para 6,0%. Assim, mostrou-se necessário aumentar a percentagem de granulado de fibras a incorporar na mistura para 0,35%, em peso, da mistura. A fórmula final e aprovada da mistura betuminosa a quente SMA8\*, após transposição para a central de fabrico, é a que se apresenta no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Fórmula final da mistura SMA8\*, após transposição para a central

<b>Materiais</b>	<b>Percentagens</b>
Brita 6/12	64,2 %
Pó 0/6	14,5 %
Pó de Pedra 0/4	8,5 %
Fíler comercial	6,8 %
PMB 45/80-65	6,0 %
Fibras	0,35 %

Os valores representativos da curva granulométrica obtida através das percentagens dos materiais indicados no quadro anterior, estão apresentados no Quadro 4.7, onde se indicam igualmente os limites impostos em C.E. Na Figura 4.4 representam-se graficamente as curvas granulométricas de estudo e após transposição, para que se possa observar a sua evolução.

Quadro 4.7 – Valores representativos das curvas granulométricas da mistura SMA8\* obtidas em fase de estudo laboratorial e após transposição para a central de fabrico

Abertura da malha dos peneiros série base + série 1 (mm)	% de material passado			
	Fuso granulométrico	Curva granulométrica de estudo	Curva teórica após transposição	Curva obtida após transposição
16	100,0	100,0	100	100
11,2	90,0 – 100,0	96,0	96,3	97,7
8	55,0 – 80,0	64,5	61,2	65,2
4	22,0 – 33,0	28,6	31,2	27,1
2	20,0 – 30,0	22,4	24,7	21,7
0,5	12,0 – 20,0	13,9	16,1	13,2
0,063	6,0 – 13,0	8,0	8,9	7,9

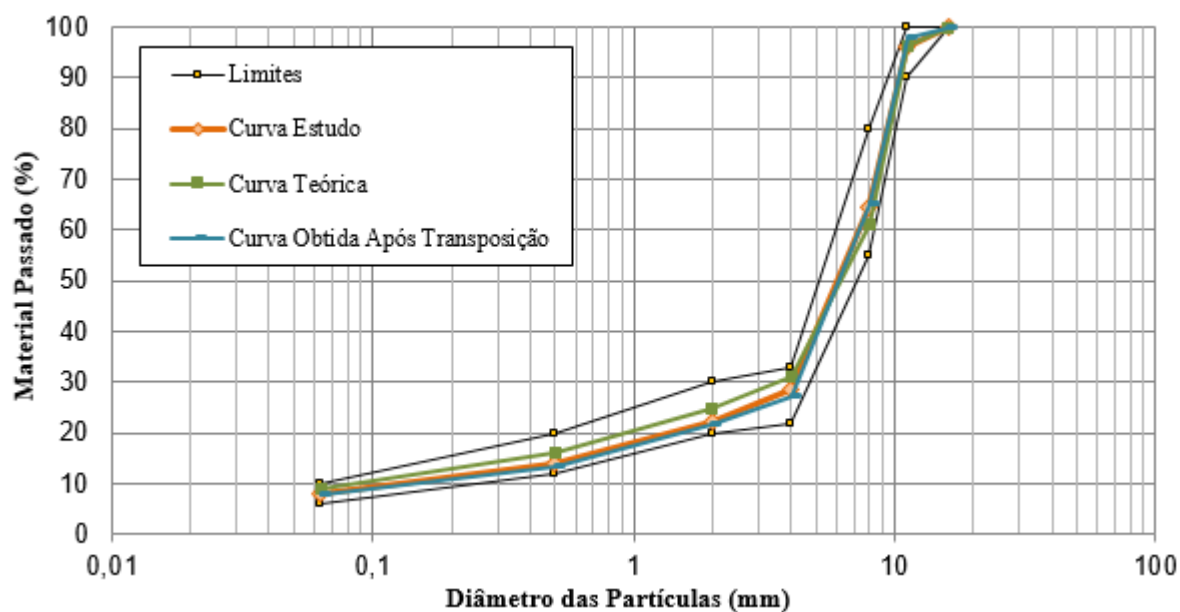


Figura 4.4 – Curvas granulométricas da mistura SMA8\* obtidas em fase de estudo laboratorial e após transposição para a central de fabrico

Para além da transposição da fórmula de trabalho da mistura para a central, mostrou-se importante realizar a afinação das fibras na central de produção. Concluiu-se que a percentagem de fibras pretendida, 0,35% em peso da mistura, foi conseguida para as 110 e 120 toneladas à hora (t/h) com uma velocidade de 17,2 Hz e 18,8 Hz, respetivamente.

### 4.2.3. Trecho experimental e composição da mistura SMA a aplicar em obra

Da análise da amostra recolhida no decorrer da realização do trecho experimental, verificaram-se algumas características da mistura aplicada, tais como a percentagem betume e a granulometria. Desta análise, concluiu-se que a percentagem de betume estava em concordância com o valor pretendido de 6,0%, tendo-se obtido um valor final de 5,98%. Por sua vez, apesar da maioria da curva granulométrica obtida para a mistura se encontrar dentro do fuso definido para a mistura SMA8\* ou dentro das tolerâncias previstas, o material passado no peneiro de dimensão 0,063 mm não cumpriu os requisitos, como se pode observar no Quadro 4.9. Verificada esta discrepância nos valores de fíler e de acordo com as conclusões técnicas resultantes dos ensaios de controlo de qualidade realizados, foi revista e fixada a fórmula de trabalho a utilizar durante todo o processo produtivo. Assim, a fórmula final para produção da mistura betuminosa a quente SMA8\* PMB 45/80-65, com características de desgaste, é a que se apresenta no quadro infra.

Quadro 4.8 – Fórmula final da mistura SMA8\*, após trecho experimental

<b>Materiais</b>	<b>Percentagens</b>
Brita 6/12	61,6 %
Pó 0/6	16,0 %
Pó de Pedra 0/4	8,5 %
Fíler comercial	7,9 %
PMB 45/80-65	6,0 %
Fibras	0,35 %

À semelhança de outras obras em que se procedeu à aplicação de misturas SMA em camada de desgaste, com composição similar à mistura SMA8\*, verificou-se que 6,0% de betume é bastante, pelo que, na empreitada de beneficiação em apreço foi aplicada uma percentagem de 5,9% de betume.

Quadro 4.9 – Valores representativos das curvas granulométricas da mistura SMA8\* obtidas após transposição para a central de fabrico, após trecho experimental e curva final aprovada para produção e aplicação em obra

Abertura da malha dos peneiros série base + série 1 (mm)	% de material passado			
	Fuso granulométrico	Curva obtida após transposição	Curva obtida após trecho experimental	Curva final aprovada
16	100,0	100	100	100
11,2	90,0 – 100,0	97,7	96,2	97,2
8	55,0 – 80,0	65,2	59,6	56,2
4	22,0 – 33,0	27,1	21,9	29,4
2	20,0 – 30,0	21,7	16,6	21,9
0,5	12,0 – 20,0	13,2	10,2	13,8
0,063	6,0 – 13,0	7,9	5,2	7,7

Na Figura 4.5 representam-se graficamente as curvas granulométricas obtidas após transposição, após realização do trecho experimental, bem como a curva final aprovada pela fiscalização.

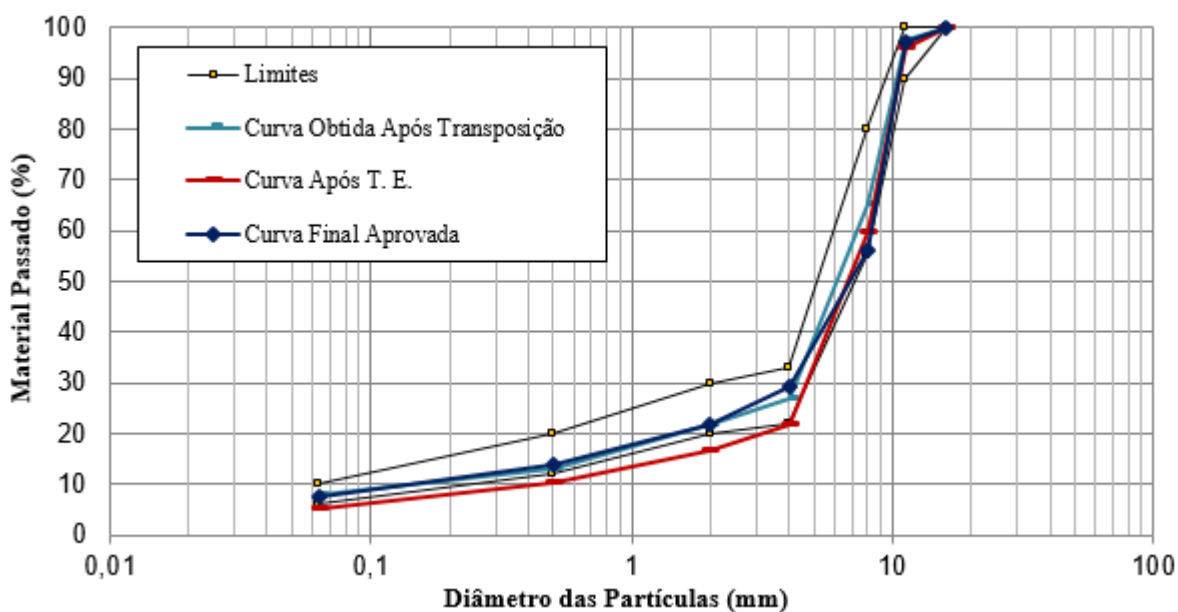


Figura 4.5 – Curvas granulométricas da mistura SMA8\* obtidas após transposição para a central de fabrico, após realização do trecho experimental e curva final e aprovada

### 4.3. Controlo de Qualidade das Misturas SMA Aplicadas

Para efeitos de análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios realizados em campo, consideraram-se dois trechos piloto realizados, em condições idênticas, com misturas betuminosas do tipo SMA8\* com incorporação dos dois tipos de fibras celulósicas em estudo. Assim, consideraram-se os seguintes trechos:

- SMA8\* - V: trecho piloto realizado com mistura SMA8\* com incorporação de fibras celulósicas revestidas com betume, com designação comercial Viatop, com cerca de 1 km de extensão, no sentido crescente;
- SMA8\* - I: trecho piloto realizado com mistura SMA8\* com incorporação de fibras celulósicas revestidas com cera poliolefínica, com designação comercial Innocell FG3000, com cerca de 350 m de extensão, no sentido crescente.

Com o intuito de aferir algumas propriedades da mistura SMA8\* aplicada, realizaram-se sondagens à rotação. Através da análise das amostras recolhidas, determinaram-se propriedades como a baridade, a porosidade e a espessura da camada de desgaste, resumidas no Quadro 4.10. A totalidade dos valores pode ser consultada no Anexo A.1.

Quadro 4.10 – Valores médios dos resultados de ensaios sobre provetes obtidos em sondagens à rotação

Propriedades	SMA8* - V	SMA8* - I
Baridade (kg/m <sup>3</sup> )	2432	2437
Baridade máxima teórica (kg/m <sup>3</sup> )	2537	2553
Porosidade (%)	4,1	4,5
Espessura projeto (cm)	4,0	4,0
Espessura obtida (cm)	4,3	4,0

### 4.3.1. Macrotextura – Mancha de areia

A avaliação da macrotextura pela técnica volumétrica da mancha, para determinação da altura de areia, foi realizada de acordo com o procedimento descrito no subcapítulo 3.4.4. No Quadro 4.11 apresenta-se o local onde foram efetuados os ensaios, bem como o volume de areia espalhado, os valores médios de diâmetro da área circular e a profundidade de textura, MTD.

Quadro 4.11 – Valores médios de textura, MTD, obtidos pela técnica volumétrica da mancha de areia

km	Volume de Areia (cm³)	Valores Médios de Diâmetro (cm)	Textura, MTD (mm)
SMA8* - V			
3+987	25,90	16,1	1,3
4+187		15,6	1,4
4+387		16,4	1,2
4+587		16,6	1,2
4+787		17,1	1,1
4+987		15,8	1,3
SMA8* - I			
5+253	25,90	15,1	1,4

Enquadrando os resultados obtidos com o limite imposto à profundidade de textura, medida pelo método volumétrico da mancha de areia, MTD, para as propriedades das misturas SMA8\*, verificou-se que todos os valores obtidos cumprem o requisito constante do Caderno de Encargos (EP, 2014),  $MTD \geq 1,0$  mm.

### 4.3.2. Microtextura – Pêndulo Britânico

A avaliação da microtextura com recurso ao Pêndulo Britânico foi realizada de acordo com o procedimento descrito no subcapítulo 3.4.4. No Quadro 4.12 apresenta-se o local onde



foram efetuados os ensaios e o valor médio de microtextura, PTV, com a devida correção da temperatura.

Importa mencionar que os valores obtidos nos ensaios para aferição da microtextura do pavimento referem-se à superfície de pavimento submetida à passagem do tráfego, onde já se verificou, em parte, a remoção da película de betume e o polimento da superfície dos agregados. No trecho piloto SMA8\* - V o ensaio foi realizado no final do mês de maio, enquanto que no trecho piloto SMA8\* - I o ensaio foi realizado no final do mês de julho.

Quadro 4.12 – Valores médios dos resultados de microtextura, PTV

Mistura	SMA8* - V						SMA8* - I
km de ensaio	3+987	4+187	4+387	4+587	4+787	4+987	5+253
PTV	67	67	67	67	67	67	68

Enquadrando os resultados obtidos com o limite imposto à resistência à derrapagem inicial – microtextura, para as propriedades das misturas SMA8\*, verificou-se que todos os valores obtidos cumprem o requisito constante do Caderno de Encargos (EP, 2014),  $PTV \geq 60$ .

No Anexo A.3 apresentam-se mais dados relativos a este ensaio, tais como a temperatura de ensaio, os valores médios PTV obtidos, o fator de correção da temperatura e o valor PTV corrigido.

#### 4.4. Avaliação do Desempenho das Misturas SMA

Para efeitos de análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios realizados em laboratório, consideraram-se duas misturas do tipo SMA8\* cujas diferenças residem apenas no tipo de fibras celulósicas incorporadas na mistura. Estas misturas, previamente descritas no subcapítulo 3.5, são:

- SMA8\* A - V: mistura fabricada em laboratório com incorporação de fibras celulósicas revestidas com betume, com designação comercial Viatop;

- SMA8\* A - I: mistura fabricada em laboratório com incorporação de fibras celulósicas revestidas com cera poliolefínica, com designação comercial Innocell FG3000.

#### 4.4.1. Escorrimento do ligante – Método de Schellenberg

Com o intuito de melhor compreender o efeito das fibras de celulose incorporadas nas misturas SMA no fenómeno de escorrimento do ligante, realizou-se o ensaio de *Schellenberg* de acordo com o procedimento descrito no subcapítulo 3.5.1, tendo-se obtido os resultados apresentados no quadro infra.

Quadro 4.13 – Resultados do ensaio de escorrimento do ligante, método de *Schellenberg*

% Fibras	Sem	0,2% Fibras		0,3% Fibras		0,4% Fibras		0,5% Fibras	
Tipo Fibras	Fibras	V	I	V	I	V	I	V	I
Material Escorrido (%)	0,58	0,33	0,38	0,18	0,23	0,18	0,18	0,13	0,14

Enquadrando os resultados obtidos com o limite máximo imposto ao escorrimento do betume, apresentado no Quadro 3.7, verificou-se que a mistura SMA8\* sem incorporação de fibras celulósicas ultrapassa largamente este limite e que a mistura SMA8\* com incorporação de 0,2% de fibras celulósicas, apesar de apresentar um valor de escorrimento do betume significativamente melhor, também excede este valor. Por sua vez, as misturas SMA8\* com incorporação de 0,3%, de 0,4% e de 0,5% de fibras celulósicas cumprem o valor admissível para o material escorrido, previsto em C.E. para esta problemática. Assim, conclui-se que, independentemente do revestimento das fibras celulósicas, a sua incorporação na ordem dos 0,3% sob o peso da mistura reduz significativamente o escorrimento do betume, certificando a condição prevista nas Cláusulas Técnicas Especiais do projeto de que a percentagem do granulado de fibras a incorporar neste tipo de misturas deverá ser igual ou superior a 0,3%, em peso, da mistura.

#### 4.4.2. Resistência à deformação permanente

Para a avaliação da deformação permanente analisaram-se as misturas SMA8\* A - V e SMA8\* A - I. Relativamente ao número de amostras ensaiadas, foram produzidas quatro lajetas com as misturas fabricadas em laboratório, duas de cada mistura, de dimensões 50x300x300 mm<sup>3</sup>. Na Figura 4.6 representam-se os resultados médios obtidos para cada mistura SMA8\* A. No Anexo A.4 podem ser observados todos os dados relativos aos ensaios de deformação permanente.

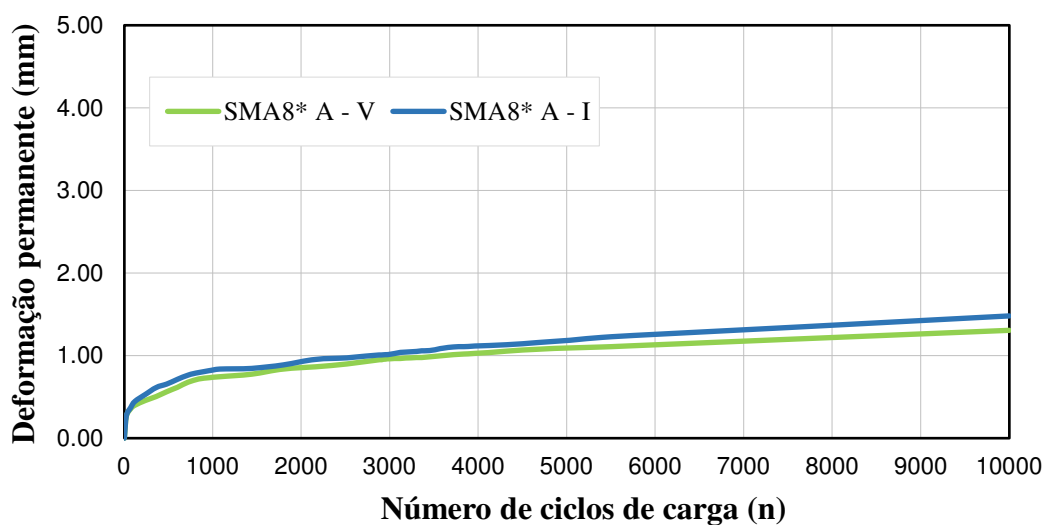


Figura 4.6 – Resultados médios do comportamento à deformação permanente das misturas SMA8\* A - V e SMA8\* A - I

Os resultados obtidos permitiram verificar que, para as duas misturas, se obteve uma baixa deformação permanente no final dos 10.000 ciclos de carga do ensaio (inferior a 2 mm). No Quadro 4.14 estão indicados os resultados do ensaio à deformação permanente, tais como os valores médios da profundidade de rodeira, da taxa de deformação e da percentagem de profundidade de rodeira.

Quadro 4.14 – Valores médios dos resultados de deformação permanente das misturas SMA8\* A - V e SMA8\* A - I

Mistura	$V_V$ (%)	Profundidade de rodeira, $RD_{AIR}$ (mm)	Taxa de deformação, $WTS_{AIR}$ (mm/10 <sup>3</sup> ciclos)	Percentagem de profundidade de rodeira, $PRD_{AIR}$ (%)
SMA8* A - V	2,8	1,3	0,04	2,6
SMA8* A - I	2,7	1,5	0,06	3,0

Para as misturas SMA8\* A - V e SMA8\* A - I, a profundidade média de rodeira foi de 1,3 mm e de 1,5 mm para os 10.000 ciclos de ensaio, a taxa de deformação média obtida foi de 0,04 mm/10<sup>3</sup> ciclos e 0,06 mm/10<sup>3</sup> ciclos e a percentagem de profundidade média de rodeira foi de 2,6% e 3,0%, respetivamente.

Enquadrando os resultados obtidos com o limite imposto à taxa de deformação do Quadro 3.7, para as propriedades da mistura SMA8\* apresentadas no subcapítulo 3.5, as duas misturas analisadas cumpriram o requisito  $WTS_{AIR\ máx}$  de 0,07 mm/10<sup>3</sup> ciclos. Quando realizada uma análise comparativa relativa aos valores obtidos para a profundidade de rodeira, verificou-se que os valores são similares para ambas as misturas.

#### **4.4.3. Módulo de rigidez e resistência à fadiga**

As misturas avaliadas no ensaio de módulo de rigidez e de avaliação da resistência à fadiga, foram apenas as fabricadas em laboratório, SMA8\* A - V e SMA8\* A - I. Estes ensaios obedeceram às condições de ensaio indicadas em 3.5.3, de acordo com os procedimentos descritos nas respetivas normas europeias. Para a realização deste ensaio foram realizadas duas lajetas para cada uma das misturas SMA8\*, permitindo obter, por corte, 8 provetes prismáticos com dimensões aproximadas de 50 x 65 x 380 mm<sup>3</sup>.

Os provetes foram caracterizados quanto às suas dimensões e baridade geométrica, verificando-se que as suas dimensões de secção apresentam variações inferiores a 1,0 mm e a sua baridade geométrica apresenta variações inferiores a 1% do valor médio do conjunto, conforme especificado nas normas EN 12679-29 e EN 12679-24, respetivamente.

Numa primeira fase, antes do ensaio de fadiga de cada provete prismático, determinaram-se os módulos de rigidez e ângulo de fase para um espectro de frequências de ensaio entre 0,1 Hz e 10Hz, considerando uma temperatura de 20°C, uma extensão constante de 50 µm e um número limitado de aplicações de carga, 100 ciclos. No Quadro 4.15 apresentam-se os valores médios de módulo de rigidez e de ângulo de fase, por frequência de ensaio, para cada mistura SMA8\* ensaiada.

Quadro 4.15 – Valores médios de módulo de rigidez e ângulo de fase das misturas SMA8\* A - V e SMA8\* A - I

Mistura	$V_V$ (%)	Frequência (Hz)								
		0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	8,0	10,0	0,1
		Módulo de Rigidez, $E$ (MPa) a 20°C								
SMA8* A - V	2,5	2362	3222	4737	6136	7756	9970	11180	11706	2300
SMA8* A - I	2,4	2418	3304	4856	6238	7745	10167	11346	11884	2386
		Ângulo de Fase, $\delta$ (°) a 20°C								
SMA8* A - V	2,5	46	43	38	35	30	25	23	22	45
SMA8* A - I	2,4	46	43	38	34	30	25	23	22	44

Para uma frequência de 8 Hz, verifica-se um módulo de rigidez médio de 11180 MPa, para a mistura SMA8\* A – V, e de 11346 MPa para a mistura SMA8\* A – I. Avaliando as misturas analisadas quanto à sua rigidez, observa-se que ambas são de classe  $S_{min11000}$ , de acordo com o estabelecido no Quadro 22 da norma NP EN 13108-1.

Também os valores do ângulo de fase, medida do desfasamento entre as tensões e as deformações, foram semelhantes, permitindo considerar uma componente elástica semelhante para as duas misturas SMA8\*.

Nas Figuras 4.7 e 4.8 são apresentados os resultados médios obtidos para o módulo de rigidez e ângulo de fase, para as duas misturas betuminosas, constatando-se que as misturas analisadas possuem um comportamento muito semelhante. A totalidade dos valores de módulo de rigidez e de ângulo de fase encontram-se dispostos no Anexo A.5.

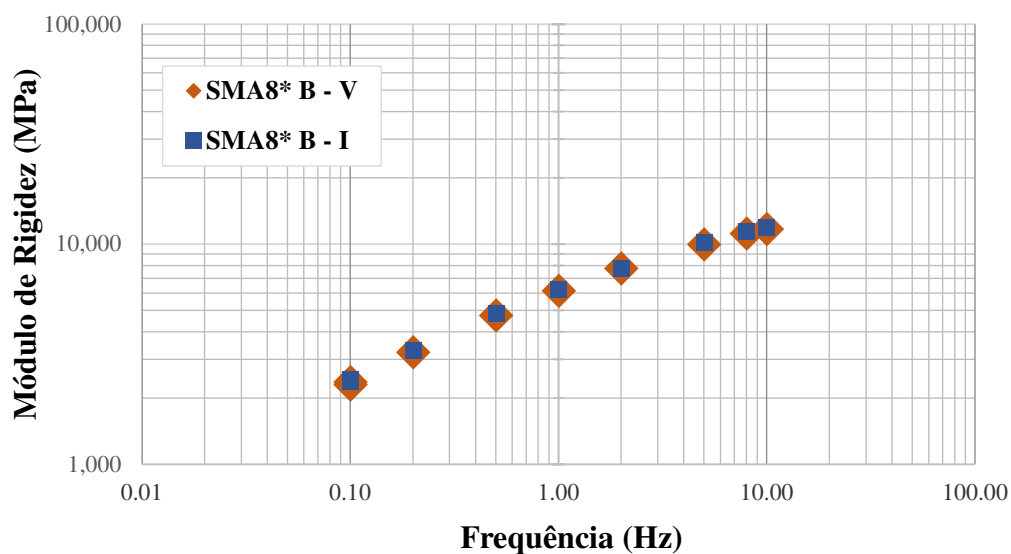


Figura 4.7 – Resultados médios do comportamento do módulo de rigidez das misturas SMA8\* A - V e SMA8\* A - I

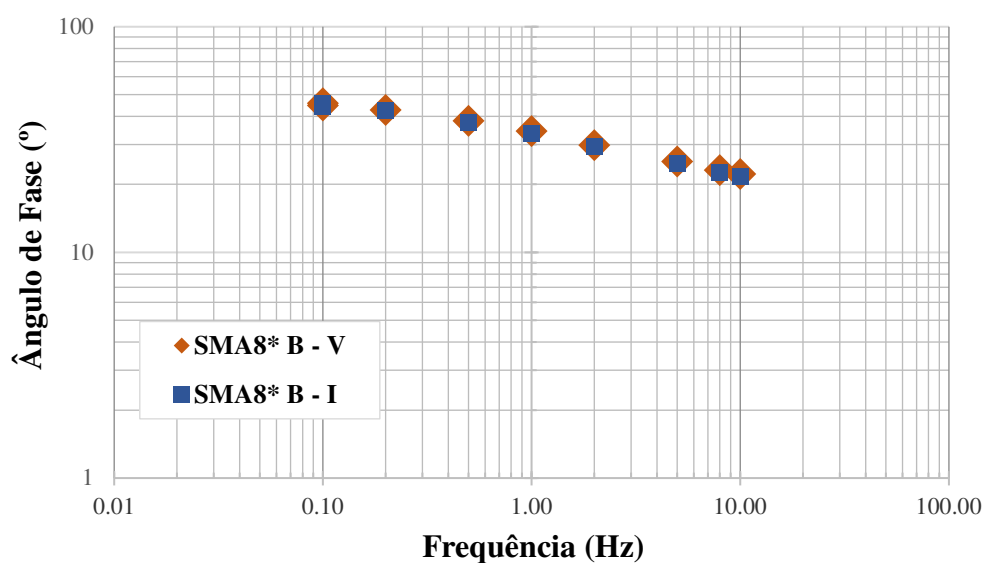


Figura 4.8 – Resultados médios do comportamento do ângulo de fase das misturas SMA8\* A - V e SMA8\* A - I

Seguidamente, procedeu-se ao ensaio de fadiga sujeitando cada provete prismático a uma frequência de 10 Hz, a uma temperatura de 20°C e a um valor constante de extensão, que se fez variar entre 250  $\mu\text{m}$  e 500  $\mu\text{m}$ . O ensaio terminou com o decréscimo do módulo de rigidez para metade do valor inicial, registando-se o número de ciclos para o qual tal se verifica. Os resultados obtidos nos ensaios de avaliação de resistência à fadiga podem ser observados nos quadros infra.

Quadro 4.16 – Resultados de resistência à fadiga da mistura SMA8\* A - V

SMA8* A - V								
Extensão ( $\mu\text{m}$ )	500			400		300		
Extensão inicial ( $\mu\text{m}$ )	497	497	502	362	363	290	291	290
N.º ciclos final do ensaio	60000	50000	45000	250002	280000	1000000	1200000	1100001
Provete	1	4	5	7	8	2	3	6
$V_V$ (%)	2,7	2,4	2,9	2,5	2,6	2,2	2,1	2,4

Quadro 4.17 – Resultados de resistência à fadiga da mistura SMA8\* A - I

SMA8* A - I							
Extensão ( $\mu\text{m}$ )	500		300			250	
Extensão inicial ( $\mu\text{m}$ )	496	500	285	287	287	236	232
N.º ciclos final do ensaio	50000	50000	620000	620000	900004	2800000	2200000
Provete	3	5	1	2	6	7	8
$V_V$ (%)	2,6	2,1	2,6	2,3	2,2	2,2	2,5

Com base nos valores dos Quadro 4.16 e 4.17 traçou-se a lei de fadiga obtida para as misturas, projetando graficamente em escalas logarítmicas de base decimal o número de ciclos final do ensaio e a extensão constante inicial para cada determinação (Figura 4.9).

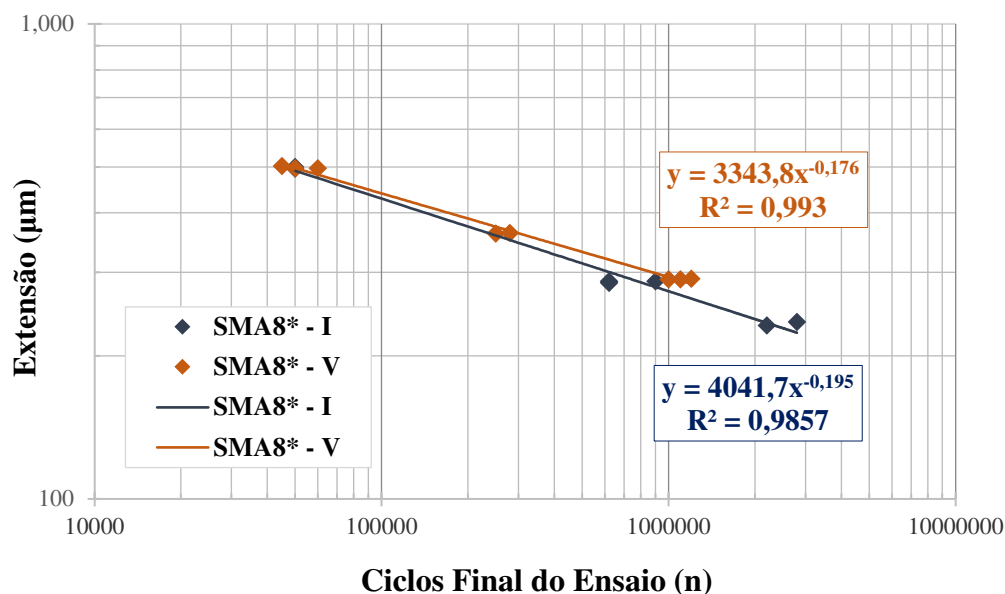


Figura 4.9 – Resultados de resistência à fadiga das misturas SMA8\* A - V e SMA8\* A - I e respectivas leis de fadiga

A partir da lei de fadiga obtida para cada mistura SMA8\*, pode-se estabelecer que para estas condições a extensão inicial associada a um ensaio com duração de  $1 \times 10^6$  ciclos,  $\epsilon_6$ , é de:

- SMA8\* A - V:  $\epsilon_6 = 294 \mu\text{m}$
- SMA8\* A - I:  $\epsilon_6 = 273 \mu\text{m}$

Enquadrando estes resultados com as categorias de resistência à fadiga estabelecidas no Quadro 25 da norma NP EN 13108-1, conclui-se que ambas as misturas se incluem na categoria  $\epsilon_{6-260}$ .

## 4.5. Caracterização Final do Pavimento

### 4.5.1. Macrotextura – Texturómetro Laser

A avaliação da macrotextura com recurso ao equipamento Texturómetro Laser permitiu a medição em contínuo da profundidade média do perfil, MPD. Os valores médios de MPD



foram calculados por troços de 100 m, sendo o seu valor médio o representativo desse troço. No Quadro 4.18 apresentam-se o km inicial e final ensaiado, de acordo com os trechos definidos no início deste capítulo, bem como o valor médio de textura, MPD, obtido através da média dos valores representativos dos vários troços de 100 m.

Quadro 4.18 – Valores médios de textura, MPD, obtidos com recurso ao equipamento Texturómetro Laser

Mistura	km de Ensaio		Textura, MPD (mm)
SMA8* - V	4+000	5+100	1,2
SMA8* - I	5+100	5+400	1,1

Na Figura 4.10 apresenta-se a evolução dos valores de MPD calculados para troços de 100 m, destacando os valores correspondentes aos trechos SMA8\* - V e SMA8\* - I, bem como o requisito mínimo de MPD definido no Caderno de Encargos. Estes valores são apresentados no Anexo A.6.

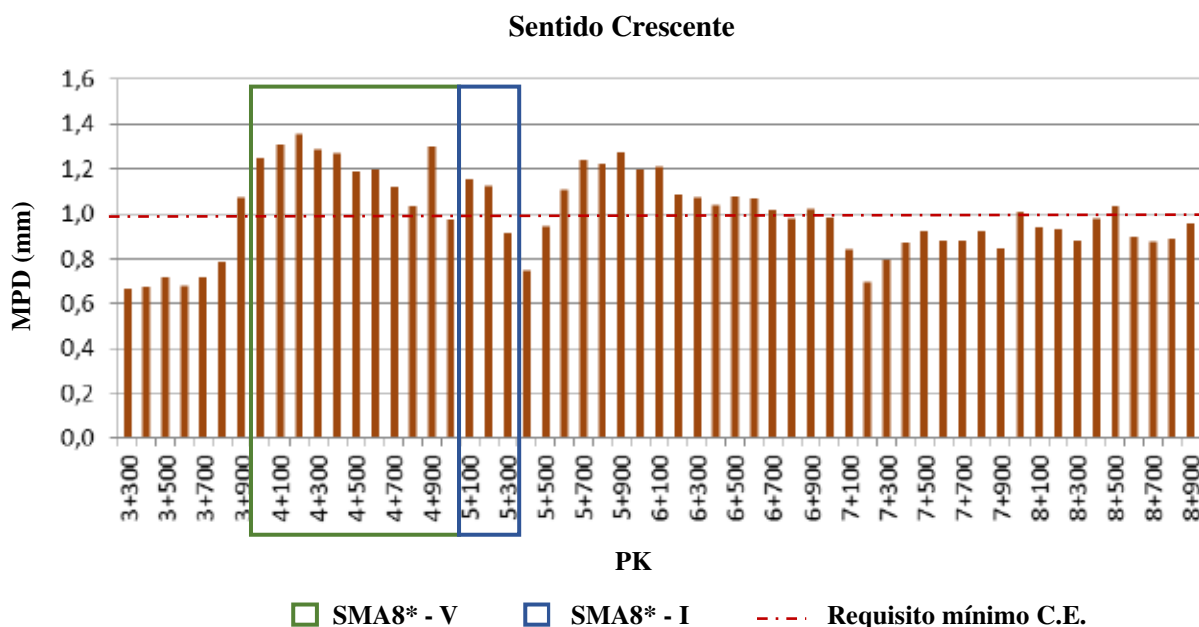


Figura 4.10 – Valores de MPD calculados para troços de 100 m, sentido crescente (adaptado de Consulstrada, 2019)

Enquadrando os resultados obtidos com o limite imposto à profundidade de textura média do perfil, MPD, para as propriedades das misturas SMA8\*, verificou-se que a generalidade dos valores obtidos cumprem o requisito constante do C.E.,  $MPD \geq 1,0$  mm. No trecho SMA8\* - V os valores de MPD variam entre 1,0 mm e 1,4 mm e no trecho SMA8\* - I, em três troços de 100 m, verificou-se um valor de MPD de 0,9 mm, abaixo do valor mínimo exigido, e dois valores de 1,2 mm e 1,1 mm.

#### 4.5.2. Microtextura – SCRIM

O ensaio de avaliação da aderência foi realizado com recurso ao SCRIM, que permitiu a medição do valor do coeficiente de atrito transversal, calculado por troços de 100 m. No Quadro 4.19 apresentam-se o km inicial e final ensaiado, de acordo com os trechos definidos no início deste capítulo, bem como o valor médio processado do coeficiente de atrito, CAT, obtido através da média dos valores representativos dos vários troços de 100 m.

Quadro 4.19 – Valores médios de coeficiente de atrito, CAT, obtidos com recurso ao equipamento SCRIM

Mistura	km de Ensaio		Valor Médio de CAT
SMA8* - V	3+953	5+153	0,49
SMA8* - I	5+153	5+453	0,51

Na Figura 4.11 apresenta-se a evolução dos valores de CAT calculados para troços de 100 m, destacando os valores correspondentes aos trechos SMA8\* - V e SMA8\* - I, bem como o requisito mínimo de CAT definido no Caderno de Encargos. Estes valores são apresentados no Anexo A.7.

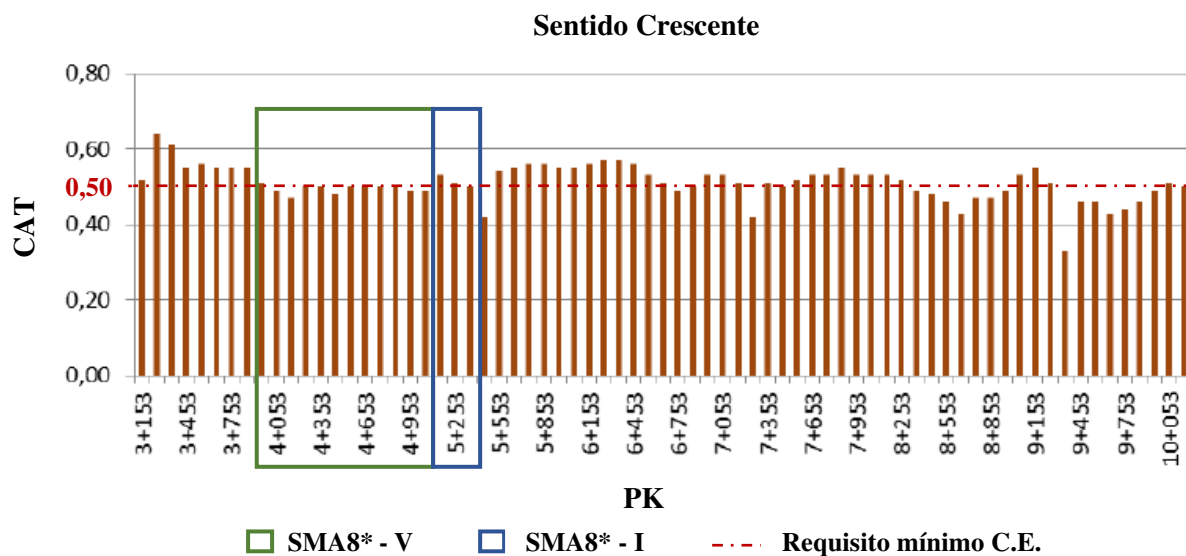


Figura 4.11 – Valores de CAT calculados para troços de 100 m, sentido crescente (adaptado de Consultrada, 2019)

Enquadrando os resultados obtidos com o requisito de conformidade para o coeficiente de atrito à velocidade de 50 km/h, para as propriedades das misturas SMA8\*, verificou-se que a maioria dos valores obtidos cumprem o especificado no C.E.,  $CAT \geq 0,50$ . No trecho SMA8\* - V os valores de CAT variam entre 0,47 e 0,51 enquanto que, no trecho SMA8\* - I os valores de CAT são todos iguais ou superiores ao valor exigido, variando entre 0,50 e 0,53.

#### 4.5.3. Irregularidade Longitudinal Superficial (IRI) – Perfilômetro Laser

A medição da irregularidade longitudinal foi efetuada com recurso ao equipamento Perfilômetro Laser, ao longo das duas rodeiras, conforme procedimento descrito no subcapítulo 3.6.3. Os valores de IRI foram calculados por troços de 100 m e o valor médio obtido nas duas rodeiras, por cada troço de 100 m, será o representativo desse troço.

Quadro 4.20 – Valores médios de irregularidade longitudinal, IRI, obtidos com recurso ao equipamento Perfilômetro Laser

Mistura	km de Ensaio		Valor Médio IRI (m/km)
SMA8* - V	4+000	5+100	0,7
SMA8* - I	5+100	5+400	0,7

Na Figura 4.12 apresenta-se a evolução dos valores de IRI calculados para trechos de 100 m, destacando os valores correspondentes aos trechos SMA8\* - V e SMA8\* - I. Estes valores são apresentados no Anexo A.8.

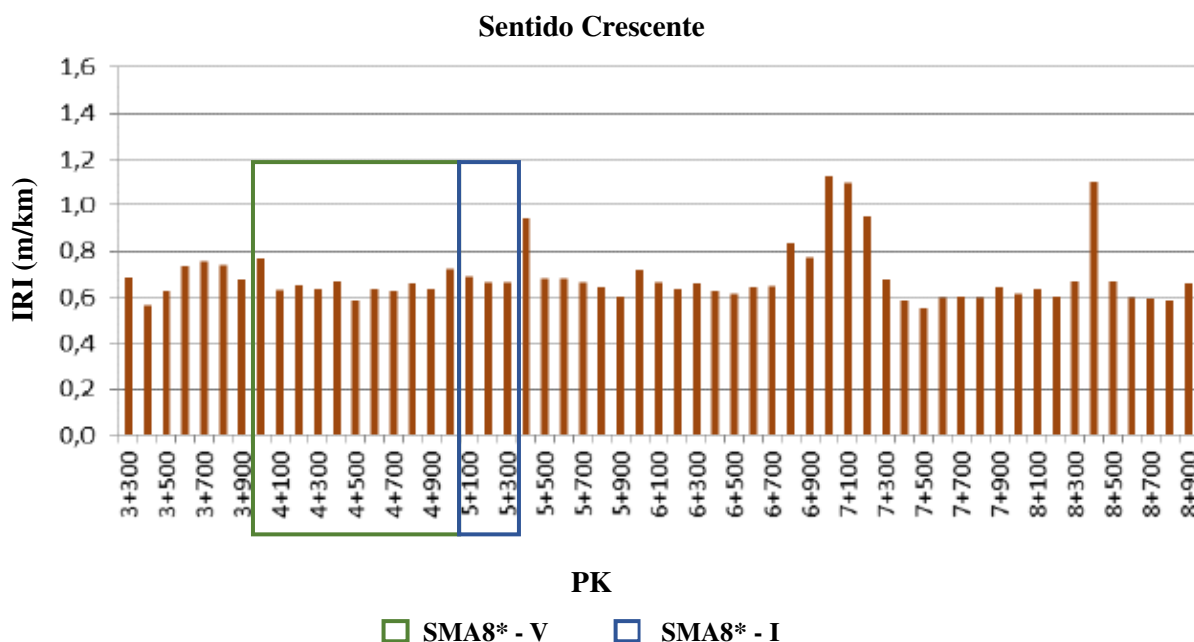


Figura 4.12 – Valores de IRI calculados para trechos de 100 m, sentido crescente (adaptado de Consultrada, 2019)

De acordo com o CETO (EP, 2014), são definidos, para efeitos de verificação de conformidade, valores admissíveis de IRI para a camada de desgaste, conforme se apresenta no Quadro 4.21.

Quadro 4.21 – Valores admissíveis de IRI, calculados por trechos de 100 m

Avaliação do IRI	Localização: Plena Via
em 50% da extensão do lote	$IRI \leq 1,5 \text{ m/km}$
em 80% da extensão do lote	$IRI \leq 2,5 \text{ m/km}$
em 100% da extensão do lote	$IRI \leq 3,0 \text{ m/km}$

Com base nos valores médios de IRI, foram definidos os gráficos que traduzem o andamento da irregularidade longitudinal ao longo dos trechos SMA8\* - V e SMA8\* - I, conforme se indica na Figura 4.13.

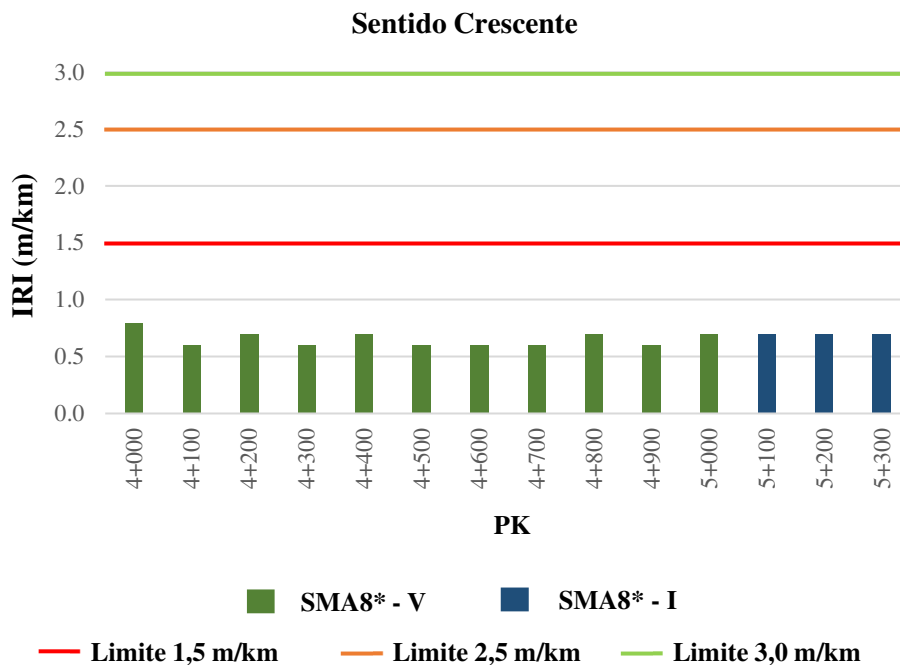


Figura 4.13 – Valores de IRI calculados para trechos de 100 m, sentido crescente com indicação dos valores admissíveis de IRI definidos em C.E.

Enquadrando os resultados obtidos com os valores admissíveis de IRI definidos em C.E., verificou-se que 100% dos valores de IRI se encontram abaixo de 1,5 m/km, excedendo largamente os parâmetros exigidos e avaliando os trechos SMA8\* - V e SMA8\* - I, quanto à sua irregularidade superficial, como *‘muito bom’*.

#### 4.5.4. Capacidade de carga do pavimento – Defletómetro de Impacto

Com o objetivo de proceder à caracterização estrutural final do pavimento rodoviário, foram realizados, em julho de 2019, ensaios de carga com recurso ao Defletómetro de Impacto (FWD), que permitiram estimar as características de deformabilidade das camadas constituintes dos pavimentos. Os ensaios foram realizados com um espaçamento de 100 m, num alinhamento coincidente com a rodovia direita relativa à passagem dos veículos pesados, na via ensaiada.

Numa primeira fase, registaram-se os valores numéricos das deflexões medidas em campo, representados no Anexo A.9. Estes valores foram também projetados sob a forma gráfica, para melhor visualização da oscilação dos mesmos com a distância (Figura 4.14). Nesta figura estão ainda destacados os valores referentes aos trechos em análise, SMA8\* - V e SMA8\* - I.

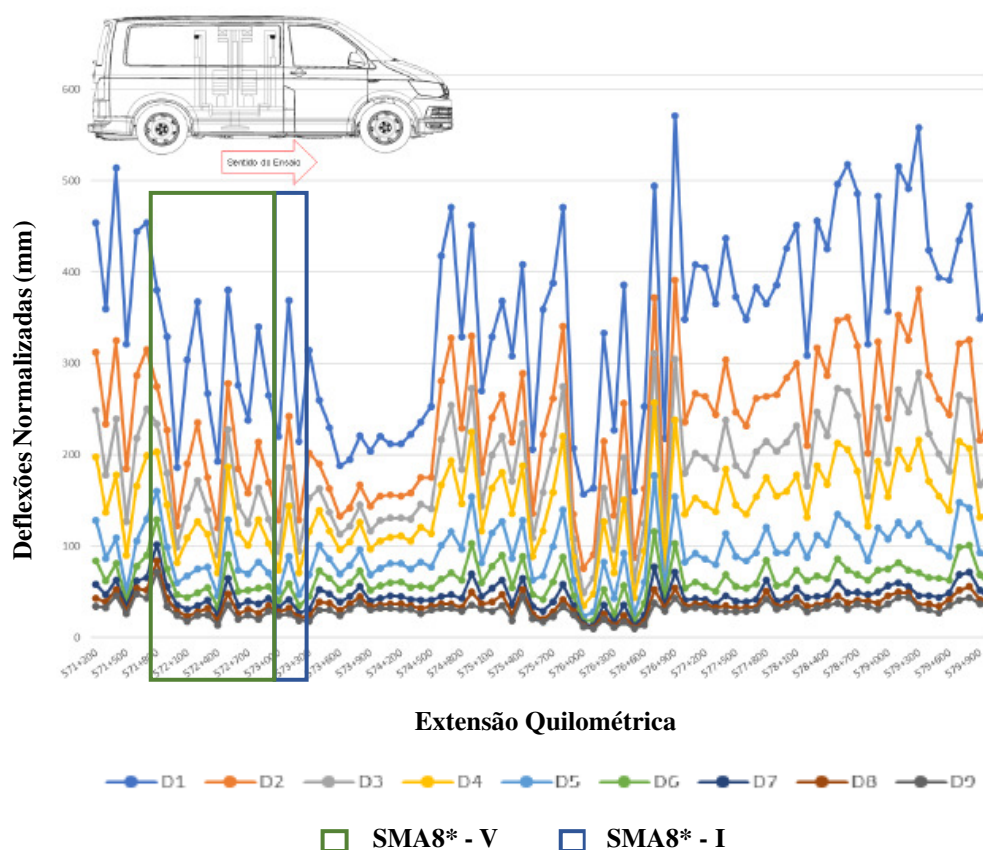


Figura 4.14 – Representação gráfica das deflexões normalizadas, para 65 kN. Sentido crescente (adaptado de Consultrada, 2019)

Em seguida, para a avaliação da capacidade de carga, definiram-se zonas de comportamento estrutural homogêneo, através da aplicação do método das diferenças acumuladas, preconizado pela AASHTO (Consultrada, 2019). Para tal, agruparam-se as deflexões obtidas nos dois sentidos de circulação rodoviária, tendo-se obtido o zonamento que se apresenta na Figura 4.15. Este gráfico permite verificar que as zonas com melhores comportamentos, correspondentes aos troços ascendentes, são as zonas 2 e 4, sendo que os trechos piloto estão inseridos na zona 2.

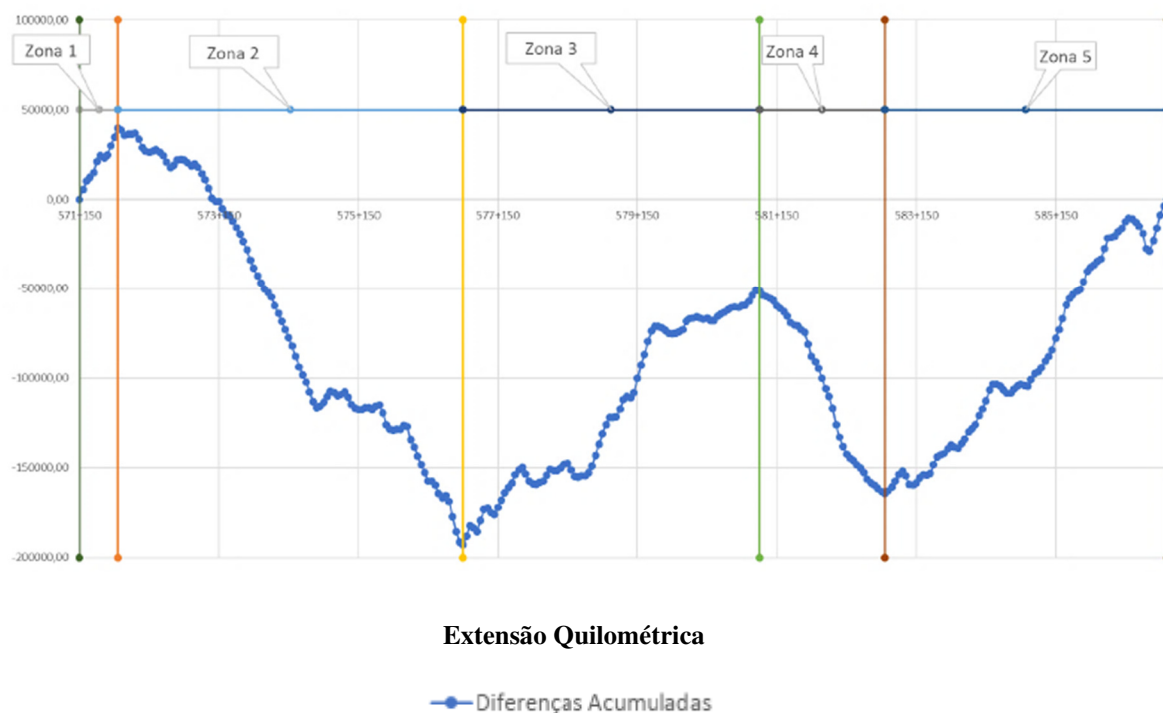


Figura 4.15 – Zonas de comportamento estrutural homogêneo, definidas de acordo com o método das diferenças acumuladas (Consulstrada, 2019)

Após o zonamento e a definição dos modelos de comportamento estrutural e, a partir dos resultados dos ensaios de carga efetuados com o FWD, estimaram-se os módulos de deformabilidade das camadas e do solo de fundação, pelo processo de retro análise.

No Quadro 4.22 apresentam-se os modelos de comportamento estrutural estabelecidos neste estudo, para a camada de desgaste: o módulo de deformabilidade ( $E_{TE}$ ) estimado para a temperatura de ensaio (TE) a 0,02 m de profundidade e o módulo de deformabilidade ( $E_{TP}$ ) para a temperatura de projeto (TP) a 0,02 m de profundidade, para a camada de desgaste em SMA8\* com 0,04 m.

Quadro 4.22 – Modelo de comportamento estrutural para a camada de desgaste (Zona 2) (adaptado de Consulstrada, 2019)

PK representativo	$E_{TE}$ (MPa)	TE (°C)	$E_{TP}$ (MPa)	TP (°C)	e (m)
572+450	5000	28,7	5100	27,9	0,04

## 4.6. Considerações Finais

Neste capítulo apresentaram-se os resultados das diversas fases que compuseram o programa de ensaios das misturas SMA8\*, enquadrando os resultados obtidos com as propriedades/requisitos impostos nas normas europeias e no Caderno de Encargos da I.P.

Em síntese, este capítulo engloba resultados referentes a:

- Formulação da mistura, tais como os valores característicos obtidos para os agregados e para o betume, a curva granulométrica da mistura SMA8\* desde a fase inicial de estudo laboratorial, passando pelo estudo Marshall, transposição para a central e realização do trecho experimental, permitindo observar as conclusões que foram sendo retiradas em cada etapa e as correções que foram sendo efetuadas até à formulação final a aplicar em obra;
- Ensaios realizados para avaliação das características de superfície, avaliação do desempenho das misturas analisadas e para caracterização final do pavimento.

No próximo capítulo, Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos Futuros, sumarizam-se as principais conclusões do estudo realizado, dando resposta, de forma objetiva, aos objetivos definidos para este trabalho e definem-se as principais linhas de investigação a seguir, por forma a consolidar e aprofundar o conhecimento das misturas betuminosas do tipo SMA.



## **5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

### **5.1. Principais Conclusões**

Apesar das misturas betuminosas do tipo SMA serem utilizadas na Europa desde o final dos anos 60, a primeira aplicação prática em Portugal ocorreu apenas em 2004. A partir de 2009, as misturas SMA têm tido uma crescente aplicação em camadas de desgaste de pavimentos rodoviários apresentando, na sua maioria, um bom desempenho quando fundamentado numa boa formulação, fabrico e aplicação.

Visto que a formulação das misturas SMA prevê a incorporação de aditivos estabilizadores para minimização da problemática do escorrimento do betume e que, para este efeito, em Portugal, o Caderno de Encargos da empresa Infraestruturas de Portugal apenas preconiza a utilização de fibras de celulose revestidas com betume, a presente dissertação visou uma análise comparativa do comportamento de misturas betuminosas do tipo SMA com incorporação de fibras celulósicas revestidas com ceras poliolefínicas, com a solução frequentemente utilizada. Para tal, foram avaliados todos os processos, desde a formulação das misturas SMA e o seu processo construtivo, caracterização do desempenho mecânico e funcional.

Da análise dos resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, relativamente à formulação das duas misturas SMA e ao seu processo construtivo, as principais conclusões são:

- Relativamente à formulação das misturas e ao seu processo construtivo, utilizaram-se processos idênticos para as misturas SMA com ambas as fibras;
- A composição ponderal das misturas SMA a produzir para aplicação em obra foi igual para as misturas com ambos os tipos de fibras;
- Não foram verificadas anomalias durante as fases de produção, transporte, espalhamento e compactação;

- A composição volumétrica das duas misturas SMA após compactação é idêntica, apresentando resultados semelhantes de baridade e porosidade;
- Relativamente à avaliação da macrotextura, pela técnica volumétrica da mancha de areia, os valores de MTD obtidos foram semelhantes e cumpriram os requisitos impostos em C.E. ( $MTD \geq 1,0$  mm);
- No que diz respeito à avaliação da microtextura, através de ensaio com Pêndulo Britânico, os valores de PTV obtidos foram semelhantes e cumpriram os requisitos impostos em C.E. ( $PTV \geq 60$ ).

Da análise dos resultados de desempenho, relativamente ao ensaio de *Schellenberg*, de deformação permanente, de módulo de rigidez e de resistência à fadiga, retiraram-se as principais conclusões:

- Em relação à inibição do escorrimento do ligante, salienta-se a eficácia de ambas as fibras celulósicas na minimização desta problemática, observando-se que, para as dosagens de fibras previstas em C.E., 0,3% a 0,4%, se obtiveram resultados semelhantes, na ordem dos 0,2%, inferiores ao limite máximo imposto para a percentagem de material escorrido;
- No que diz respeito à deformação permanente, as misturas SMA apresentaram um bom comportamento,  $WTS_{AIR} \leq 0,07$  mm/10<sup>3</sup> ciclos;
- Em relação ao módulo de rigidez, as misturas SMA exibiram um comportamento semelhante, apresentando módulos com a mesma ordem de grandeza, para a mesma frequência de ensaio (classe  $S_{min}11000$ , para uma frequência de 8 Hz). Também o ângulo de fase apresentou valores idênticos nas duas misturas SMA, permitindo considerar uma componente elástica semelhante para as duas misturas;
- No que se refere ao comportamento das misturas SMA à resistência à fadiga, para uma duração de  $1 \times 10^6$  ciclos, observou-se um comportamento semelhante, uma vez que ambas as misturas se classificam na categoria  $E_{6-260}$ .

Da análise dos resultados de caracterização final do pavimento, relativamente aos ensaios de avaliação da textura, do coeficiente de atrito e da irregularidade longitudinal superficial, as principais conclusões são:

- Relativamente à avaliação da macrotextura, com recurso ao equipamento Texturómetro Laser, os valores médios de MPD obtidos foram semelhantes e cumpriram os requisitos impostos em C.E. ( $MPD \geq 1,0$  mm);
- No que diz respeito à avaliação da microtextura, com recurso ao equipamento SCRIM, os valores médios de CAT obtidos foram semelhantes e cumpriram, na generalidade, os requisitos impostos em C.E. ( $CAT \geq 0,50$ );
- Em termos de IRI, os trechos analisados foram avaliados como *‘muito bom’*, uma vez que a totalidade dos valores obtidos se encontram abaixo de 1,5 m/km.

Em síntese, a realização do presente trabalho permitiu concluir que independentemente do tipo de revestimento das fibras celulósicas incorporadas nas misturas SMA, os procedimentos construtivos são idênticos, bem como são semelhantes os resultados das diversas propriedades avaliadas. Assim, este trabalho contribuiu para a possibilidade de inclusão das fibras celulósicas revestidas com cera poliolefínica em Caderno de Encargos, como alternativa à utilização de fibras celulósicas revestidas com betume.

## 5.2. Trabalhos Futuros

Embora se considere que o presente trabalho clarifica a possibilidade de utilização de fibras de celulose revestidas com cera poliolefínica em misturas betuminosas do tipo SMA, continuam a subsistir diversos temas de interesse dentro deste tipo de misturas, nomeadamente, os que resultam da introdução de diversos tipos de aditivos estabilizadores, bem como de algumas eventuais dificuldades na obtenção de algumas características de desempenho funcional.

De facto, verifica-se uma crescente introdução de fibras de natureza tão diversa como fibras obtidas a partir de resíduos de garrafas de plástico e fibras vegetais, como fibras de coco.

Assim, considera-se interessante o estudo do comportamento de misturas betuminosas do tipo SMA com incorporação de fibras de natureza não celulósica.

Admite-se que, alguns aspetos de melhoria do comportamento mecânico possam estar relacionados com outros componentes das misturas betuminosas do tipo SMA, como é o caso do fíler e do tipo de betume. Neste âmbito, considera-se relevante a análise do efeito do tipo e natureza do fíler nas misturas SMA, bem como o estudo do tipo de betume a incorporar nas misturas SMA, que poderá incluir polímeros do tipo borracha reciclada de pneus.

Tem-se verificado, nestas e noutras obras, a necessidade de melhoria do coeficiente de atrito transversal, pelo que se considera relevante a realização de estudos que possibilitem obter melhores resultados. Também nesta obra, à semelhança de outras obras analisadas, se verificou que a percentagem de betume mínima a incorporar nas misturas do tipo SMA é bastante elevada, pelo que se recomenda a condução de trabalhos que possibilitem a incorporação de uma maior dosagem de betume nestas misturas.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AAPA. (2000). *Stone Mastic Asphalt: Design & Application Guide*. Australian Asphalt Pavement Association, Port Melbourne.
- Abertis. (2019). *Documento Núm. 3. - Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares*. Autopistas, Concesionaria Española, S.A., Barcelona.
- Abreu, C. (2009). *Caracterização do Desempenho de um Stone Mastic Asphalt*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Abreu, C., & Picado Santos, L. (2009). *Contribuição para o Uso de “Stone Mastic Asphalt” na Tecnologia Portuguesa*. Atas do XV CILA - Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Lisboa.
- Aena. (2018). *Instrucciones Generales para la Elaboración de Proyectos. Anexo 5.- Pliegos de Prescripciones Técnicas Particulares de unidades de obra. Mezclas bituminosas en caliente en áreas de movimiento de aeronaves*. Aena, Empresa de Gestion de Aeropuertos des Estado, S.A. Dirección de Infraestructuras y Tecnologías. Dirección de Proyectos y Construcción. Madrid.
- Aena. (2018). *Instrucciones Generales para la Elaboración de Proyectos. Anexo 5.- Pliegos de Prescripciones Técnicas Particulares de unidades de obra. Mezclas bituminosas en caliente en áreas de movimiento de aeronaves*. Aena, Empresa de Gestion de Aeropuertos des Estado, S.A. Dirección de Infraestructuras y Tecnologías. Dirección de Proyectos y Construcción. Madrid.
- Afonso, J., & Gomes, L. (2016). *Misturas Betuminosas do Tipo SMA - A Experiência da Mota-Engil Engenharia e Construção*. Atas do 8º Congresso Rodoviário Português. LNEC, Lisboa.
- Afonso, M. (2014). *Resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas com Betumes Temperados*. Dissertação de Mestrado. Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Antunes, D. (2014). *Misturas Betuminosas Temperadas, do Tipo SMA, com Incorporação de Material Betuminoso Reciclado e Fibras Celulósicas - Contribuição para a sua Caracterização*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.

- Antunes, V. (2013). *Influência do Filer no Comportamento de Mastiques Betuminosos*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa.
- Batista, F. (2004). *Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos – Misturas Betuminosas Densas a Frio*. Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Batista, F., Antunes, M., Teixeira, A., Ferreira, C., Guimarães, C., Gomes, V., & Gomes, L. (2011). *Estudo da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas*. Atas do XVI CILA – Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Rio de Janeiro.
- Bento, F. (2010). *Avaliação de Desempenho de Misturas Betuminosas Recicladas a Quente*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Błazejowski, K. (2011). *Stone Matrix Asphalt. Theory and Practice*. CRC Press-Taylor e Francis Group, Boca Raton.
- Branco, F., Picado Santos, L., & Garcia Pereira, P. (2011). *Pavimentos Rodoviários*. Edições Almedina (4ª Reimpressão), Coimbra.
- Capitão, S. (2003). *Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade*. Tese de Doutoramento. Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Carvalho, A. (2012). *Estudo da Utilização de Fibras em Misturas Betuminosas*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- Consulstrada. (2019). *Empreitada de Beneficiação. Avaliação da Capacidade de Carga do Pavimento - Ensaios de Carga com o Defletómetro de Impacto*. Consulstrada - Consultores de Engenharia e Sistemas de Gestão, Lda., Barreiro.
- Consulstrada. (2019). *Empreitada de Beneficiação. Caracterização dos Pavimentos. Avaliação da Aderência - Medição do Coeficiente de Atrito*. Consulstrada - Consultores de Engenharia e Sistemas de Gestão, Lda., Barreiro.
- Consulstrada. (2019). *Empreitada de Beneficiação. Caracterização Final dos Pavimentos. Avaliação da Regularidade Longitudinal (IRI) e da Textura (MPD)*. Consulstrada - Consultores de Engenharia e Sistemas de Gestão, Lda., Barreiro.
- Drüschner, L., & Schäfer, V. (2000). *Stone Mastic Asphalt*. German Asphalt Association, Bonn.

- EAPA. (2007). *Long-Life Asphalt Pavements – Technical version*. European Asphalt Pavement Association, Bruxelas.
- EAPA. (2018). *Heavy Duty Surfaces, The Arguments for SMA*. European Asphalt Pavement Association, Bruxelas.
- EP. (2014). *Caderno de Encargos Tipo Obra, 14.03 - Pavimentação, Características dos Materiais*. Estradas de Portugal, S.A. (atual I.P. - Infraestruturas de Portugal, S.A.), Almada.
- EP. (2014). *Caderno de Encargos Tipo Obra, 15.03 - Métodos Construtivos*. Estradas de Portugal, S.A. (atual I.P. - Infraestruturas de Portugal, S.A.), Almada.
- EPTISA. (2014). *Estudio Comparativo para Evaluar la Dispersión y Escurrimiento de las Fibras de Celulosa*. Expediente n.º 140114.
- Freire, A. (2002). *Deformações Permanentes de Misturas Betuminosas em Pavimentos Rodoviários*. Tese de Doutoramento. Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Gardete, D. (2006). *Comparação de Ensaios Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Gardete, D., Picado Santos, L., & Capitão, S. (2009). *Formulação Volumétrica de Misturas Betuminosas Tradicionais Portuguesas: Análise de Procedimentos Implementados Noutros Países*. Atas do XV CILA - Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Lisboa.
- Gardete, D., Picado Santos, L., & Capitão, S. (2011). *Formulação Volumétrica e Desempenho de Misturas Betuminosas Stone Mastic Asphalt*. Atas do XVI CILA – Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Rio de Janeiro.
- Gardete, D., Picado Santos, L., & Capitão, S. (2013). *Formulação Volumétrica de Misturas Betuminosas - Análise dos Níveis de Compactação para Formulação de um AC 20 e de um SMA*. Atas do 7º Congresso Rodoviário Português. LNEC, Lisboa.
- Graf, K. (2006). *Splittmastixasphalt—Anwendung und Bewährung*. Rettenmaier Seminar eSe-MA'06, Zakopane.

- HAMM. (2019). *HAMM, A Wirtgen Group Company*. Retrieved from <https://www.hamm.eu/en/products/tandem-rollers/series-hd~1/hd-110.179172.php>
- InIR. (2009). *Ensaio de Comparação Interlaboratorial para Avaliação da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas Compactadas*. Departamento de Transportes - Núcleo de Infra-estruturas Rodoviárias e Aeroportuárias. LNEC, Lisboa.
- JJR. (2019). *Empreitada de Beneficiação*. Construções JJR e Filhos, S.A., Leiria.
- JJR. (2019). *Empreitada de Beneficiação. Estudo de Composição da Mistura Betuminosa a Quente - SMA8 surf PMB 45/80-65*. Construções JJR e Filhos, S.A., Leiria.
- JJR. (2019). *Empreitada de Beneficiação. Plano de Execução do Trecho Experimental da Mistura Betuminosa a Quente SMA8 surf PMB 45/80-65*. Construções JJR e Filhos, S.A., Leiria.
- JRS, J. Rettenmaier & Söhne. (2019). *J. Rettenmaier & Söhne GmbH + Co KG - JRS, Fibers Designed by Nature*. Retrieved from [https://www.jrs.eu/jrs\\_en/fiber-solutions/bu-road-construction/products/](https://www.jrs.eu/jrs_en/fiber-solutions/bu-road-construction/products/)
- Lavasani, M., Namin, M., & Fartash, H. (2015). *Experimental Investigation on Mineral and Organic Fibers Effect on Resilient Modulus and Dynamic Creep of Stone Matrix Asphalt and Continuous Graded Mixtures in Three Temperature Levels*. Construction and Building Materials (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.146>).
- Limón-Covarrubias, P., Cueva, D., Vidal, G., Ortiz, O., Hernández, R., & González, J. (2019). *Analysis of the Behavior of SMA Mixtures with Different Fillers Through the Semicircular Bend (SCB) Fracture Test*. Materials (doi: 10.3390/ma12020288).
- LNEC. (2018). *Estudo sobre uma Mistura Betuminosa do Tipo "Stone Mastic Asphalt" Incorporando Fibras "INNOCELL® FG3000", aplicada num trecho experimental*. LNEC, Lisboa.
- Lusasfal. (2019). *Certificado de Qualidade - Betume Modificado PMB 45/80-65*. Lusasfal - Derivados Asfálticos de Portugal, S.A., Vendas Novas.
- Marini-Ermont. (2019). *Marini-Ermont, Fayat Group*. Retrieved from <https://www.marini-ermont.fayat.com/>



- Martinho, F. (2014). *Misturas Betuminosas Temperadas com Incorporação de Subprodutos Industriais. Caracterização e Validação Tecnológica*. Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Martinho, F. (2015, Abril). *Soluções com Incorporação de Fibras Celulósicas - Misturas Betuminosas de Grande Durabilidade e Alto Desempenho: SMA (Stone Mastic Asphalt) e PA (Porous Asphalt)*. 4ª Edição das Jornadas Betumes CEPSA/CRP. Centro Cultural de Belém, Lisboa.
- Martinho, F., Lanchas, S., Nunez, R., Batista, F., & Miranda, H. (2013). *A Experiência Portuguesa em Misturas Betuminosas do Tipo SMA com Fibras Celulósicas*. Atas do 7º Congresso Rodoviário Português. LNEC, Lisboa.
- Melé, L., Quaresma, L., & Augusto, D. (2019). *Experiência em Misturas Betuminosas do tipo SMA com Fibras Revestidas a Ceras Poliolefinicas*. Atas do 9º Congresso Rodoviário Português. LNEC, Lisboa.
- Miranda, H. (2016). *Misturas Betuminosas de Alto Desempenho do Tipo Stone Mastic Asphalt – Formulação, Fabrico, Aplicação e Desempenho*. Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Mokhtari, A., & Nejad, F. (2012). *Mechanistic Approach for Fiber and Polymer Modified SMA Mixtures*. Construction and Building Materials (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.05.032>).
- Mourão, F. (2003). *Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- NCHRP. (2007). *Superpave Mix Design: Verifying Gyration Levels in the Ndesign Table*. Transportation Research Board, Washington D.C.
- NCHRP. (2015). *Fiber Additives in Asphalt Mixtures: A Synthesis of Highway Practice*. Transportation Research Board, Washington D.C.
- Neves, J. (2005). *Materiais de Construção - Guia de Utilização - Capítulo 2: Betumes, Ligantes e Misturas Betuminosas*. Loja da Imagem: Arquitectura e Vida, Engenharia e Vida (ISBN: 972-98882-3-X).

- Neves, J., & Correia, A. (2006). *Caracterização da Rigidez de Misturas Betuminosas em Ensaio de Tracção Indirecta por Compressão Diametral de Provetes Cilíndricos*. Universidade do Minho, Braga.
- Nguyen, H., & Tran, T. (2018). *Effects of Crumb Rubber Content and Curing Time on the Properties of Asphalt Concrete and Stone Mastic Asphalt Using Dry Process*. International Journal of Pavement Research and Technology (<https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.09.014>).
- Quaresma, L. (2018). *Apontamentos da Disciplina de Vias de Comunicação: Ligantes Betuminosos*. Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa.
- Ravago. (2018). *Ficha Técnica Fibras de Celulose Innocell FG3000*. Ravago Chemicals, S.A., Madrid.
- Ravago. (2018). *Produtos INOvadores para a Indústria Asfáltica*. Apresentação de Produtos Ruthmann. Ravago Chemicals, Madrid .
- Silva, A. (2014). *Formulação de Misturas Betuminosas a Quente: Análise Comparativa da Aplicação de Métodos Empíricos e Volumétricos*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.
- Silva, H. (2006). *Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique: Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas*. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho, Braga.
- TPF. (2015). *Empreitada de Beneficiação. Projeto de Execução. TOMO I - Estudo Rodoviário*. TPF Planege - Consultores de Engenharia e Gestão, S.A., Lisboa.
- Vale, A., Casagrande, M., & Soares, J. (2014). *A Study of Behavior of Natural Fiber in Stone Matrix Asphalt Mixtures Using Two Design Methods*. Journal of Materials in Civil Engineering (DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000815).
- Xavier, R., Martin, B., Babu, L., Jose, L., & Roy, L. (2018). *A Review on Fiber Modified Stone Matrix Asphalt*. International Research Journal of Engineering and Technology (e-ISSN: 2395-0056).

# REFERÊNCIAS NORMATIVAS

AASHTO: 1993, *Guide for Design of Pavement Structures, Appendix J – Analysis Unit Delineation by Cumulative Differences*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.

EN 12597: 2014, *Bitumen and bituminous binders – Terminology*. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-6: 2012, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens*. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-8: 2003, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-12: 2008, *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-18: 2004, *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 18: Binder drainage*. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-22: 2003, *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 22: Wheel-Tracking*. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-24: 2012, *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 24: Resistance to fatigue*. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-26: 2012, *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 26: Stiffness*. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-29: 2002, *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 29: Determination of the dimensions of a bituminous specimen*. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-34: 2004, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 34: Marshall test*. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 13108-5: 2006, *Bituminous mixtures – Material specifications. Part 5: Stone Mastic Asphalt*. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 13108-20: 2006, *Bituminous mixtures – Material specifications. Part 20: Type Testing*. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 13036-4: 2003, *Road and airfield surface characteristics – Test methods. Part 4: Method for measurement of slip/skid resistance of a surface: The pendulum test*. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

NP EN 1426: 2017, *Betumes e ligantes betuminosos – Determinação da penetração com agulha*. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa.

NP EN 1427: 2010, *Betumes e ligantes betuminosos – Determinação da temperatura de amolecimento – Método do anel e bola*. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa.

NP EN 13036-1: 2011, *Características superficiais de pavimentos de estradas e de aeroportos – Métodos de ensaio. Parte 1: Medição da profundidade de macrotextura da superfície do pavimento através da técnica volumétrica da mancha*. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa.

NP EN 13108-1: 2008, *Misturas betuminosas – Especificações dos materiais. Parte 1: Betão Betuminoso*. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa.

# ANEXOS

Nos pontos seguintes apresentam-se, de uma forma mais completa, os resultados obtidos nos ensaios realizados para controlo de qualidade das misturas SMA8\* aplicadas, para avaliação do desempenho das misturas SMA8\*, assim como os resultados obtidos na Caracterização Final do Pavimento.

## A.1. Sondagens à rotação

Quadro A.1 – Valores dos resultados das sondagens à rotação da mistura SMA8\* - V

Propriedades		SMA8* - V					
Localização	Km	3+983	4+483	4+983	3+983	4+483	4+983
	Lado	Dto.	Dto.	Dto.	Esq.	Esq.	Esq.
	Distância ao Eixo (m)	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90
	Condições da Rega	Boa	Boa	Boa	Boa	Boa	Boa
	Camada	Surf					
Espessura de Projeto (cm)		4,0					
Espessura Obtida (cm)		5,0	4,2	4,1	4,9	4,2	3,5
Baridade dos Carotes (kg/m <sup>3</sup> )		2471	2391	2364	2449	2456	2457
Baridade Máxima Teórica (kg/m <sup>3</sup> )		2537					
Porosidade (%)		2,6	5,7	6,8	3,4	3,2	3,1

Quadro A.2 – Valores dos resultados das sondagens à rotação da mistura SMA8\* - I

Propriedades		SMA8* - I	
Localização	km	5+383	5+383
	Lado	Dto.	Esq.
	Distância ao Eixo (m)	1,90	1,90
	Condições da Rega	Boa	Boa
	Camada	Surf	
Espessura de Projeto (cm)		4,0	
Espessura Obtida (cm)		3,6	4,3
Baridade dos Carotes (kg/m <sup>3</sup> )		2400	2474
Baridade Máxima Teórica (kg/m <sup>3</sup> )		2553	
Porosidade (%)		6,0	3,1

## A.2. Macrotextura – Mancha de Areia

Quadro A.3 – Valores de textura, MTD, obtidos pela técnica volumétrica da mancha de areia das misturas SMA8\* - V e SMA8\* - I

km	Volume de Areia (cm³)	Medições de Diâmetro (cm)				Valores Médios de Diâmetro (cm)	Textura, MTD (mm)
SMA8* - V							
3+987	25,90	17,0	17,0	18,0	16,5	16,1	1,3
		15,0	15,5	15,0	15,0		
4+187		16,5	16,5	16,5	16,0	15,6	1,4
		15,0	14,5	14,5	15,5		
4+387		18,0	17,5	18,0	17,0	16,4	1,2
		15,0	15,5	15,0	15,5		
4+587		18,0	17,5	17,0	17,5	16,6	1,2
		16,0	16,0	15,5	15,5		
4+787		17,5	18,0	17,0	17,5	17,1	1,1
		17,5	16,0	16,5	17,0		
4+987		16,5	16,0	15,5	15,5	15,8	1,3
		16,0	15,5	15,5	16,0		
SMA8* - I							
5+253	25,90	16,5	16,0	15,5	16,0	15,1	1,4
		14,5	14,5	14,0	14,0		

### A.3. Microtextura – Pêndulo Britânico

Quadro A.4 – Valores dos resultados de microtextura, PTV, das misturas SMA8\* -V e SMA8\* - I

<b>km</b>	<b>Temperatura de Ensaio (°C)</b>	<b>Valores Médios de Ensaio (PTV)</b>	<b>Correção da Temperatura</b>	<b>Valor Corrigido (PTV)</b>
<b>SMA8* - V</b>				
3+987	33	65	+2	67
4+187	31	65	+2	67
4+387	32	65	+2	67
4+587	34	65	+2	67
4+787	34	65	+2	67
4+987	32	65	+2	67
<b>SMA8* - I</b>				
5+253	40	65	+3	68



#### A.4. Resistência à deformação permanente

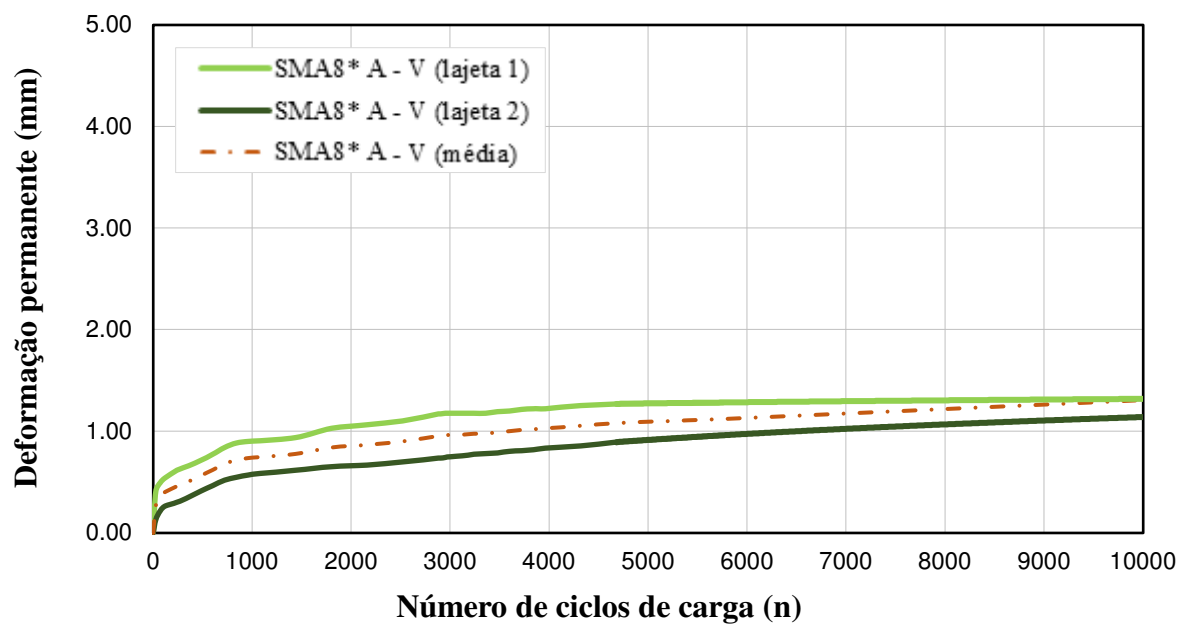


Figura A.1 - Resultados do comportamento à deformação permanente da mistura SMA8\* A - V

Quadro A.5 – Valores médios dos resultados de deformação permanente das misturas SMA8\* A - V

Mistura SMA8* A - V	$V_v$ (%)	Profundidade de rodeira, $RD_{AIR}$ (mm)	Taxa de deformação, $WTS_{AIR}$ (mm/ $10^3$ ciclos)	Percentagem de profundidade de rodeira, $PRD_{AIR}$ (%)
Lajeta 1	2,8	1,32	0,01	2,63
Lajeta 2	2,8	1,29	0,08	2,59
Média	2,8	1,31	0,04	2,61

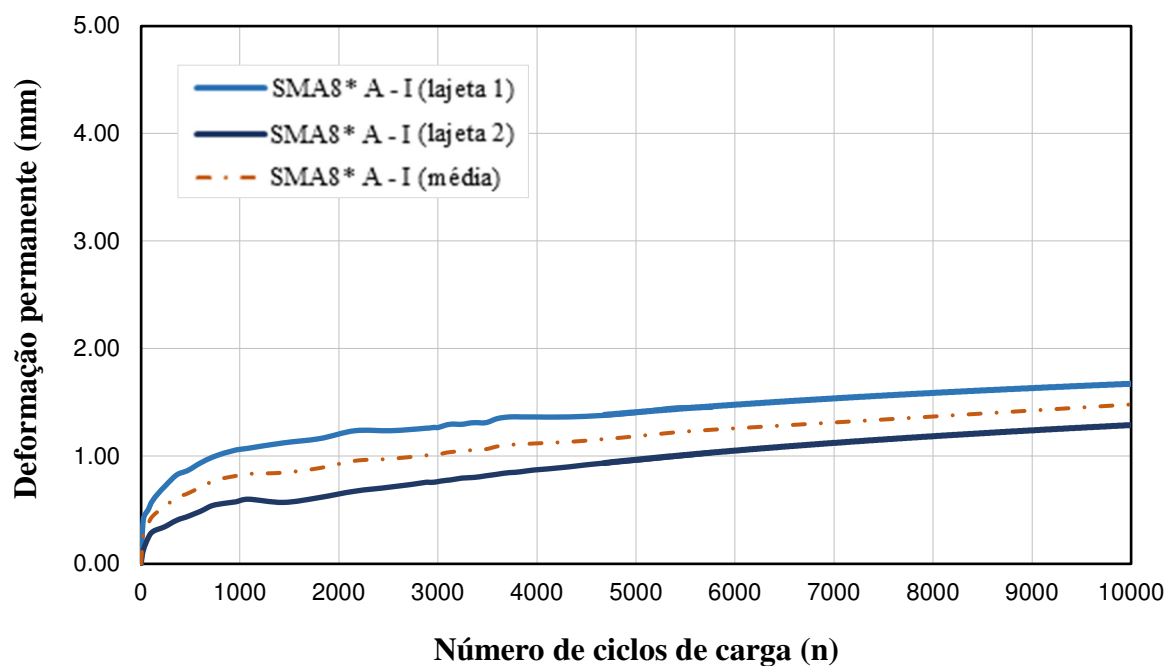


Figura A.2 - Resultados do comportamento à deformação permanente da mistura SMA8\* A - I

Quadro A.6 – Valores médios dos resultados de deformação permanente das misturas SMA8\* A – I

Mistura SMA8* A - I	$V_V$ (%)	Profundidade de rodeira, $RD_{AIR}$ (mm)	Taxa de deformação, $WTS_{AIR}$ (mm/ $10^3$ ciclos)	Percentagem de profundidade de rodeira, $PRD_{AIR}$ (%)
<b>Lajeta 1</b>	2,6	1,67	0,05	3,34
<b>Lajeta 2</b>	2,7	1,29	0,06	2,58
<b>Média</b>	2,7	1,48	0,06	2,96

## A.5. Módulo de rigidez e resistência à fadiga

Quadro A.7 – Valores relativos às dimensões e porosidades dos provetes, da mistura SMA8\* A – V, ensaiados para obtenção do módulo de rigidez e resistência à fadiga

Proвете	1	2	3	4	5	6	7	8
Altura (cm)	5,1	5,2	5,2	5,1	5,1	5,2	5,2	5,2
Largura (cm)	6,4	6,3	6,3	6,4	6,5	6,4	6,4	6,4
Comprimento (cm)	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,0	38,0	38,0
BMT (kg/m <sup>3</sup> )	2587							
$V_V$ (%)	2,7	2,2	2,1	2,4	2,9	2,4	2,5	2,6

Quadro A.8 – Valores relativos às dimensões e porosidades dos provetes, da mistura SMA8\* A – I, ensaiados para obtenção do módulo de rigidez e resistência à fadiga

Proвете	1	2	3	4	5	6	7	8
Altura (cm)	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,0
Largura (cm)	6,5	6,5	6,4	6,4	6,3	6,4	6,4	6,4
Comprimento (cm)	38,1	38,2	38,2	38,1	38,0	38,1	38,1	38,0
BMT (kg/m <sup>3</sup> )	2587							
$V_V$ (%)	2,6	2,3	2,6	2,9	2,1	2,2	2,2	2,5

Quadro A.9 – Valores de módulo de rigidez das misturas SMA8\* A – V

Provete	1	2	3	4	5	6	7	8
Frequência (Hz)	Módulo de Rigidez, $E$ (MPa) a 20°C							
0,1	2578	2350	2885	2746	2198		1836	1942
0,2	3509	3244	3865	3717	3033		2519	2668
0,5	5122	4821	5572	5403	4442		3820	3977
1,0	6714	6249	7099	6755	5905		5035	5194
2,0	8379	7860	8700	8537	7337		6788	6693
5,0	10680	10269	11088	10750	9596		8583	8824
8,0	11919	11505	12375	12162	10679		9675	9947
10,0	12484	12079	12951	12692	11161		10190	10389
0,1	2515	2300	2756	2708	2147		1819	1855

Quadro A.10 – Valores de módulo de rigidez das misturas SMA8\* A – I

Provete	1	2	3	4	5	6	7	8
Frequência (Hz)	Módulo de Rigidez, $E$ (MPa) a 20°C							
0,1	2491	2654	2423	2246	2241	2189	2338	2759
0,2	3335	3602	3348	3053	3128	2990	3252	3726
0,5	4805	5235	4877	4514	4679	4469	4877	5388
1,0	6241	6623	6201	5736	6077	5841	6195	6992
2,0	7811	8258	8200	7370	7761	7387	7948	7226
5,0	9961	10699	10266	9628	9942	9536	10428	10871
8,0	11187	11930	11363	10708	11275	10658	11522	12121
10,0	11713	12471	11976	11226	11841	11172	12032	12645
0,1	2413	2593	2426	2210	2240	2151	2300	2755

Quadro A.11 – Valores de ângulo de fase das misturas SMA8\* A – V

Provete	1	2	3	4	5	6	7	8
Frequência (Hz)	Ângulo de Fase, $\delta$ (°) a 20°C							
0,1	45	46	44	44	46		48	47
0,2	42	43	41	41	43		45	44
0,5	38	39	36	37	39		41	40
1,0	32	37	31	33	35		38	35
2,0	29	30	28	29	30		32	32
5,0	24	26	24	24	25		27	27
8,0	22	23	22	22	23		25	25
10,0	21	22	21	21	22		24	24
0,1	44	45	44	44	45		47	46

Quadro A.12 – Valores de ângulo de fase das misturas SMA8\* A – I

Provete	1	2	3	4	5	6	7	8
Frequência (Hz)	Ângulo de Fase, $\delta$ (°) a 20°C							
0,1	44	45	45	45	47	46	46	45
0,2	41	42	43	43	44	44	43	41
0,5	37	36	38	38	39	38	39	37
1,0	33	32	34	35	35	33	35	32
2,0	29	29	29	30	30	30	30	29
5,0	24	24	24	26	25	25	25	24
8,0	23	22	22	24	23	23	23	22
10,0	22	21	21	23	22	22	22	21
0,1	43	44	44	44	46	46	46	43

## A.6. Macrotextura – Texturómetro Laser

Quadro A.13 – Valores de textura, MPD, por troços de 100 m (sentido crescente), obtidos com recurso ao equipamento Texturómetro Laser

km de Ensaio		MPD (mm)
<b>SMA8* - V</b>		
4+000	4+100	1,2
4+100	4+200	1,3
4+200	4+300	1,4
4+300	4+400	1,3
4+400	4+500	1,3
4+500	4+600	1,2
4+600	4+700	1,2
4+700	4+800	1,1
4+800	4+900	1,0
4+900	5+000	1,3
5+000	5+100	1,0
<b>SMA8* - I</b>		
5+100	5+200	1,2
5+200	5+300	1,1
5+300	5+400	0,9

## A.7. Microtextura – SCRIM

Quadro A.14 – Valores médios de coeficiente de atrito, CAT, por troços de 100m (sentido crescente), obtidos com recurso ao equipamento SCRIM

km de Ensaio		Valores Médios (CAT)
<b>SMA8* - V</b>		
3+953	4+053	0,51
4+053	4+153	0,49
4+153	4+253	0,47
4+253	4+353	0,50
4+353	4+453	0,50
4+453	4+553	0,48
4+553	4+653	0,50
4+653	4+753	0,50
4+753	4+853	0,50
4+853	4+953	0,50
4+953	5+053	0,49
<b>SMA8* - I</b>		
5+153	5+253	0,53
5+253	5+353	0,51
5+353	5+453	0,50

## A.8. Irregularidade Longitudinal Superficial (IRI) – Perfilómetro Laser

Quadro A.15 – Valores médios de IRI, por troços de 100m (sentido crescente), obtidos com recurso ao equipamento Perfilómetro Laser

km de Ensaio		IRI (m/km)		
		Rodeira Esq.	Rodeira Dta.	Média
<b>SMA8* - V</b>				
4+000	4+100	0,7	0,8	0,8
4+100	4+200	0,6	0,6	0,6
4+200	4+300	0,7	0,6	0,7
4+300	4+400	0,7	0,6	0,6
4+400	4+500	0,6	0,7	0,7
4+500	4+600	0,6	0,6	0,6
4+600	4+700	0,7	0,6	0,6
4+700	4+800	0,7	0,6	0,6
4+800	4+900	0,6	0,7	0,7
4+900	5+000	0,6	0,7	0,6
5+000	5+100	0,7	0,7	0,7
<b>SMA8* - I</b>				
5+100	5+200	0,7	0,7	0,7
5+200	5+300	0,6	0,7	0,7
5+300	5+400	0,7	0,6	0,7



## A.9. Capacidade de carga do pavimento – Defletômetro de Impacto

Quadro A.16 – Deflexões normalizadas no sentido crescente, referentes aos trechos SMA8\* - V e SMA8\* - I

PK	Deflexões normalizadas para 65kN (µm)									Temperatura (°C)		Hora
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	Ar	Superfície	
SMA8* - V												
3+953	380	275	234	203	160	129	102	84	72	20,0	25,1	01:11
4+053	329	227	180	145	99	75	56	43	34	20,0	26,1	01:12
4+153	186	123	99	82	60	47	36	29	24	20,0	25,6	01:13
4+253	304	190	142	109	68	44	31	23	18	20,0	25,7	01:14
4+353	367	235	172	127	75	49	35	28	24	20,0	25,8	01:15
4+453	267	175	140	113	77	55	41	32	25	21,2	26,6	01:17
4+553	193	120	91	71	46	33	25	19	14	21,2	27,1	01:17
4+653	380	278	228	187	129	91	65	48	36	21,2	26,7	01:18
4+753	276	185	144	115	74	51	35	26	20	21,2	26,6	01:19
4+853	238	158	125	101	70	52	40	31	25	21,2	26,8	01:20
4+953	340	214	164	129	83	54	37	27	20	21,2	27,4	01:21
5+053	265	170	130	103	71	56	43	35	29	21,2	27,6	01:22
SMA8* - I												
5+153	220	129	94	74	51	41	33	28	24	21,2	27,5	01:23
5+253	369	242	186	144	89	59	42	32	26	21,2	27,3	01:24
5+353	215	129	95	71	47	35	27	22	19	21,2	26,9	01:25