



Estudo da Utilização de Fibras em Misturas Betuminosas

ANTÓNIO JOSÉ CHARNECA CARVALHO
(Bacharel em Engenharia Civil)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientadores:

Doutora Fátima Alexandra Barata Antunes Batista
Doutora Maria da Graça Alfaro Lopes

Júri:

Presidente:

Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos

Vogais:

Doutor Joel Ricardo Martins de Oliveira
Doutora Fátima Alexandra Barata Antunes Batista
Doutora Maria da Graça Alfaro Lopes

Estudo da Utilização de Fibras em Misturas Betuminosas

Nome: António José Charneca Carvalho

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientação: Fátima Alexandra Barata Antunes Batista

Maria da Graça Alfaro Lopes

Resumo

A presente dissertação tem como objectivo principal aprofundar os conhecimentos sobre a incorporação de fibras em misturas betuminosas, em particular, sobre as misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA). Para este tipo de mistura betuminosa existe uma norma de produto europeia, a EN 13108-5:2006. Os ensaios tipo iniciais para efeitos de certificação CE das misturas estão contemplados na norma portuguesa NP EN 13108-20:2008, onde também são estipuladas as condições de ensaio.

São descritos diversos tipos de fibras passíveis de serem utilizadas no fabrico da mistura betuminosa do tipo SMA, dando especial enfoque às misturas fabricadas com fibras celulósicas, uma vez que este tipo específico de mistura é frequentemente aplicado em camada de desgaste noutros países, com reconhecidas vantagens em termos de durabilidade e desempenho do pavimento.

As misturas do tipo SMA são descritas, analisando-se métodos de formulação e métodos para a sua caracterização. Posteriormente, são apresentados e discutidos os trabalhos experimentais levados a cabo para um caso concreto. Os ensaios realizados permitiram caracterizar a mistura quanto à sensibilidade à água, ao seu módulo de rigidez e resistência à deformação permanente.

Conclui-se que a mistura do tipo SMA com a incorporação de fibras analisada, apresenta bom comportamento à deformação permanente e boa resistência à acção da água, comparativamente às misturas betuminosas tradicionais aplicadas em camada de desgaste.

Palavras-chave

Pavimentos flexíveis; Misturas betuminosas; Fibras; Stone Mastic Asphalt; Desempenho

Study of Fiber in Bituminous Mixtures

Name: António José Charneca Carvalho

Dissertation for the degree of Master in Civil Engineering

Advisors: Fátima Alexandra Barata Antunes Batista

Maria da Graça Alfaro Lopes

Abstract

This dissertation mainly aims to increase the knowledge of the incorporation of fibers in bituminous mixtures, in particular, Stone Mastic Asphalt (SMA) mixtures. For this type of asphalt, there is an European standard product, EN 13108-5:2006. The initial type tests for CE certification are included in the Portuguese standard NP EN 13108-20:2008, where the test conditions are also stipulated.

Various types of fibers which can be used in the manufacture of SMA mixtures with particular focus on the cellulosic fibers, are described, since this particular type of mixture is often used to the surface layer in other countries, and the advantages in terms of durability and performance of pavement are well known.

The SMA mixtures are described, after analyzing formulation methods and characterization methods. Later on, experimental work carried out for a specific case, is presented and discussed. These tests allowed to characterize the mixture and its sensitivity to water, its modulus of rigidity and resistance to permanent deformation.

The conclusion is that the SMA mixture with the incorporation of fibers, shows a good performance to permanent deformation and good resistance to the action of water, compared to traditional bituminous mixtures applied in surface layer.

Keywords

Flexible pavements, bituminous mixtures, fibers, Stone Mastic Asphalt; Performance

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer às minhas orientadoras Doutora Fátima Alexandra Barata Antunes Batista, Investigadora Auxiliar no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e Doutora Maria da Graça Dias Alfaro Lopes, Professora Coordenadora com agregação do Departamento de Engenharia Civil (DEC) do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), pela disponibilidade, profissionalismo, paciência, atenção e amizade: o meu muito obrigado.

À Investigadora Auxiliar do LNEC, Doutora Ana Cristina Ferreira de Oliveira Rosado Freire, Chefe do Núcleo de Infra-estruturas Rodoviárias e Aeroportuárias (NIRA) do Departamento de Transportes do LNEC, pela disponibilização de meios e recursos, fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos técnicos do NIRA, em particular, ao José Reimão e Carlos Pimentel, com quem trabalhei directamente, por toda a disponibilidade demonstrada e conselhos úteis e fundamentais durante a realização dos ensaios.

Gostaria de agradecer em particular a algumas pessoas que me apoiaram durante a realização deste trabalho: à minha irmã Joana, pela amizade, motivação e conselhos sábios nos momentos difíceis e à Andreia pela amizade, amor, carinho e compreensão nos momentos em que tivemos de nos privar da companhia um do outro.

Por fim, aos meus pais, Ana e João, por todo o apoio, motivação e amor nos momentos chave ao longo do curso, assim como em todos os momentos difíceis da minha vida.

A todos aqueles que por lapso não mencionei, os meus sinceros agradecimentos.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do tema	1
1.2	Motivação e objectivos	2
1.3	Estrutura do trabalho	2
2	Aspectos Relacionados com a Utilização de Fibras em Misturas Betuminosas	5
2.1	Considerações iniciais	5
2.2	O pavimento rodoviário	6
2.3	Principais Degradações Associadas aos Pavimentos Flexíveis	9
2.4	Misturas Betuminosas com a incorporação de fibras	14
2.4.1	Descrição geral das misturas	14
2.4.2	Características das Misturas do tipo <i>Stone Mastic Asphalt</i>	21
2.4.2.1	Agregados	21
2.4.2.2	Betume	31
2.4.2.3	Fibras	37
2.4.3	Desempenho das Misturas do tipo <i>Stone Mastic Asphalt</i>	47
2.5	Considerações finais	51
3	Métodos de Caracterização em Laboratório de Misturas Betuminosas com a Utilização de Fibras	53
3.1	Considerações iniciais	53
3.2	Caracterização do módulo de rigidez e da resistência à fadiga	54
3.2.1	Generalidades	54
3.2.2	Ensaio de tracção indirecta ou compressão diametral	56
3.3	Caracterização da resistência à deformação permanente	59
3.3.1	Generalidades	59
3.3.2	Ensaio de compressão triaxial com aplicação de carga cíclica	61

3.4	Caracterização da resistência à acção da água	68
3.4.1	Generalidades	68
3.4.2	Ensaio de tracção indirecta segundo a Norma Europeia EN 12697-12:2008 – Método A	69
3.5	Caracterização do escorrimento do ligante	72
3.5.1	Generalidades	72
3.5.2	Método do cesto (<i>Basket method</i>)	73
3.5.3	Método de <i>Schellenberg</i>	76
3.6	Considerações finais	78
4	Estudo Experimental para Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas “<i>Stone Mastic Asphalt</i>”	81
4.1	Considerações iniciais	81
4.2	Determinação da baridade dos provetes	82
4.3	Determinação do módulo de rigidez da mistura em ensaio de tracção indirecta ou compressão diametral	83
4.4	Determinação da resistência à deformação permanente em ensaio de compressão triaxial com carga cíclica	86
4.5	Avaliação da sensibilidade à água em ensaio de tracção indirecta	90
4.6	Avaliação do escorrimento do ligante (<i>Binder Drainage</i>) segundo a norma EN 12697-18:2004	97
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	101
5.1	Conclusões	101
5.2	Trabalhos futuros	103
	Referências Bibliográficas	105

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Estrutura tipo de um pavimento flexível _____	7
Figura 2.2 – Representação esquemática das solicitações e do modo de funcionamento de um pavimento flexível (Silva, 2005; Branco <i>et al.</i> , 2006) _____	10
Figura 2.3 – Principais tipos de degradação de pavimentos flexíveis na Europa (adaptado de COST 333, 1999) _____	10
Figura 2.4 – Esquema das deformações permanentes do pavimento, associadas ao aparecimento de rodeiras (adaptado de Gardete, 2006) _____	12
Figura 2.5 – Esquema simplificado da constituição do <i>Stone Mastic Asphalt</i> (adaptado de Mourão, 2003) _____	14
Figura 2.6 – Estrutura de misturas betuminosas: 1- SMA; 2- BB _____	15
Figura 2.7 – Exemplo de curvas granulométricas preconizadas no CETO para misturas betuminosas destinadas a camada de desgaste. _____	16
Figura 2.8 – Curvas granulométricas de misturas betuminosas em camada de desgaste (BB; SMA; BBd) (adaptado de Mourão, 2003) _____	17
Figura 2.9 – Comparação entre o fuso granulométrico previsto no CETO para a mistura AC 14 Surf (BBr) com a curva da mistura SMA 12 definida no estudo de Mourão (2003) _____	18
Figura 2.10 – Comparação entre o fuso granulométrico previsto no CETO para a mistura PA 12 (BBd) com a curva da mistura SMA 12 definida no estudo de Mourão (2003) _____	18
Figura 2.11 – Interacção agregado-agregado _____	19
Figura 2.12 – Comparação da granulometria dos agregados da mistura tipo SMA com a mistura tipo AC (BB) (Bernucci <i>et al.</i> , 2008) _____	23

Figura 2.13 – Comparação entre o fuso granulométrico da mistura AC 10 Surf (mBBr) previsto no CETO (2011) e o fuso granulométrico do SMA 0/8S utilizado na Alemanha	27
Figura 2.14 – Comparação entre o fuso granulométrico da mistura AC 14 Surf (BBr) previsto no CETO (2011) e o fuso granulométrico do SMA 12,5 utilizado nos EUA	28
Figura 2.15 – Comparação entre o fuso granulométrico da mistura PA 12 (BBd) previsto no CETO (2011) e o fuso granulométrico do SMA 16 utilizado na China	28
Figura 2.16 – Esquematização do processo de obtenção do betume (adaptado de IME, 2011)	32
Figura 2.17 – Variação do envelhecimento do betume ao longo do tempo (adaptado de Shell, 2003)	35
Figura 2.18 – Mistura betuminosa sem adição de fibras (Betunel, 2008; Lanchas, 2011)	37
Figura 2.19 – Comparação do escorrimento em diversos tipos de aditivo estabilizador (Brown <i>et al.</i> , 1997a)	38
Figura 2.20 – (a) Fibras de celulose; (b) Fibras de celulose impregnadas com betume (Lanchas, 2011)	40
Figura 2.21 – Fibras de celulose com adição de ceras (Lanchas, 2011)	41
Figura 2.22 – Variação da temperatura em função da tecnologia de fabrico (Farrar, 2008)	42
Figura 2.23 – Redução de combustível (<i>fuel</i>) para diferentes tecnologias de mistura (adaptado de Zaumanis, 2010)	43
Figura 2.24 - Variação da viscosidade do betume em função da temperatura (Zaumanis, 2010)	44
Figura 2.25 – Processo de fabrico da mistura betuminosa com a adição de fibras (adaptado de Branco <i>et al.</i> , 2006)	47
Figura 2.26 – Macrotextura do SMA (Betunel, 2008)	48

Figura 2.27 – Durabilidade da camada de desgaste, considerando estradas principais, auto-estradas e estradas de tráfego intenso (EAPA, 2007)	49
Figura 2.28 – Evolução do estado do pavimento ao longo do tempo (Batista, 2004)	50
Figura 3.1 – Ensaio de tracção indirecta ou compressão diametral (LNEC)	56
Figura 3.2 – Representação esquemática do equipamento para realização do ensaio de tracção indirecta ou compressão diametral (adaptado da EN 12697-26:2006)	57
Figura 3.3 – Princípio de carregamento e deformação do provete no ensaio de tracção indirecta (Neves e Correia, 2006)	58
Figura 3.4 – Relação entre a extensão permanente vertical e o número de ciclos da carga (adaptado de Batista, 2004)	60
Figura 3.5 – Representação esquemática do acréscimo de tensões devido à acção de carga rolante (adaptado da norma EN 12697-25:2006)	61
Figura 3.6 – <i>Nottingham Asphalt Tester</i> , sistema de introdução e recolha de dados (LNEC)	62
Figura 3.7 – Equipamento para a realização do ensaio de compressão triaxial (LNEC)	63
Figura 3.8 – Representação das tensões exercidas no provete com aplicação de cargas cíclicas do tipo “onda rectangular” (adaptado de EN 12697-25:2006)	64
Figura 3.9 – Zonas climáticas em Portugal Continental (Baptista, 1999; Branco <i>et al.</i> , 2006)	65
Figura 3.10 – Tipo de rotura (adaptado da norma EN 12697-23:2003)	71
Figura 3.11 – Características do cesto utilizado no ensaio (EN 12697-18:2004)	74
Figura 3.12 – Cesto utilizado para determinação do valor do escorrimento do ligante, de acordo com a norma americana AASHTO T-305/97 (Souza, 2007).	74

Figura 4.1 – Valores dos módulos de rigidez dos provetes_____	85
Figura 4.2 – Curvas de deformação obtidas no ensaio de compressão triaxial __	87
Figura 4.3 – Sistema de aplicação do vácuo (Picnómetro e bomba de vácuo)___	92
Figura 4.4 – a) Provetes “imersos”; b) Provetes “a seco” _____	93
Figura 4.5 – Ensaio de tracção indirecta_____	93
Figura 4.6 – Resultados obtidos no ensaio de sensibilidade à água _____	94
Figura 4.7 – Ensaio de escorrimento segundo a norma europeia EN 12697-18:2004 – “Método do Cesto” (Batista e Miranda, 2010) _____	98

Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Designação de misturas betuminosas utilizadas em camada de desgaste (CETO, 2011)	8
Quadro 2.2 – Limites do fuso granulométrico de misturas tipo SMA (EN 13108-5:2006)	25
Quadro 2.3 – Intervalo entre valores máximos e mínimos de material passado nos peneiros seleccionados (EN 13108-5:2006)	26
Quadro 2.4 – Fusos granulométricos de misturas do tipo SMA aplicadas em camada de desgaste (adaptado de Brown <i>et al</i> , 2009)	27
Quadro 2.5 – Requisitos/propriedades do betume (CETO, 2011)	33
Quadro 2.6 – Características das misturas betuminosas com a adição de diferentes tipos de fibras	52
Quadro 3.1 – Principias tipos de ensaio de avaliação do módulo de rigidez (EN 12697-26:2006)	55
Quadro 3.2 – Categorias previstas na norma EN 13108-5:2006 para a resistência conservada em tracção indirecta (ITSR)	71
Quadro 3.3 – Percentagem de fibras na mistura SMA (PANK,1995)	73
Quadro 3.4 – Categorias previstas na norma EN 13108-5:2006 para o escorrimento do ligante (D)	73
Quadro 4.1 – Baridade dos provetes ensaiados	83
Quadro 4.2 – Resumo dos valores de entrada (<i>input</i>) para o ensaio de tracção indirecta ou compressão diametral	84
Quadro 4.3 – Módulo de rigidez dos provetes	85
Quadro 4.4 – Condições do ensaio de compressão triaxial	87
Quadro 4.5 – Características dos provetes ensaiados	87
Quadro 4.6 – Resultados do ensaio de compressão triaxial, segundo a norma EN 12697-25	88

Quadro 4.7 – Características dos grupos de provetes submetidos ao ensaio de determinação da resistência conservada em tracção indirecta	91
Quadro 4.8 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água, segundo a norma EN 12697-12 (2008), á temperatura de 15 °C	94
Quadro 4.9 – Tipo de rotura dos provetes ensaiados	96
Quadro 4.10 – Resultados do ensaio de escorrimento do ligante segundo EN 12697-18:2004 – “Método do Cesto”	98
Quadro 4.11 – Ensaio de escorrimento segundo a norma americana AASHTO T-305/97 (Vale <i>et al.</i> , 2006)	99

Lista de Símbolos e Abreviaturas

Símbolos

Alfabeto Latino

Símbolo	Significado
A_1	Ordenada da origem da recta de regressão
B_1	Declive da recta de regressão
D	Abertura do peneiro superior ou escorrimento do ligante
F	Força vertical
f_c	Taxa de fluência
h	Altura do provete
m_1	Massa do provete seco
m_2	Massa do provete saturado dentro de água
m_3	Massa do provete saturado com a superfície seca
P_{ITS}	Resistência máxima (força de rotura) em tracção indirecta
VMA	Vazios na mistura de agregado
W	Peso do provete, em função das condições de ensaio

Alfabeto Grego

Símbolo	Significado
Φ	Diâmetro do provete
$\epsilon_{1000, calc}$	Deformação do provete após 1000 ciclos
$\rho_{b,SSD}$	Baridade determinada pelo método hidrostático

Abreviaturas

Abreviatura	Significado
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
AC	Asphalt Concrete
BB	Betão Betuminoso
BBd	Betão Betuminoso Drenante
BBr	Betão Betuminoso Rugoso
CETO	Caderno de Encargos Tipo da Obra
COST	European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DT	Departamento de Transportes
EN	Norma Europeia
E.P.	Estradas de Portugal
HMA	Hot Mix Asphalt
INE	Instituto Nacional de Estatística
InIR	Instituto Nacional de Infra-estruturas Rodoviárias
ISEL	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
ITS _w	Resistência em tracção indirecta dos provetes “imersos”
ITS _d	Resistência em tracção indirecta dos provetes “a seco”
ITSR	Resistência conservada em tracção indirecta
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
mBBr	Micro Betão Betuminoso Rugoso
MBA-BBA	Mistura betuminosa aberta com betume modificado com alta percentagem de borracha
MBA-BBM	Mistura betuminosa aberta com betume modificado com média percentagem de borracha
MBR-BBA	Mistura betuminosa rugosa com betume modificado com alta percentagem de borracha
MBR-BBM	Mistura betuminosa rugosa com betume modificado com média percentagem de borracha
NIRA	Núcleo de Infra-Estruturas Rodoviárias e Aeroportuárias

NP	Norma Portuguesa
NAT	Nothigham Asphalt Tester
PA	Pourous Asphalt
PMB	Betume Modificado com Polímeros
SMA	Stone Mastic Asphalt / Stone Matrix Asphalt
U.S.	United States
WMA	Warm Mix Asphalt

1 Introdução

1.1 Enquadramento do tema

Uma política sustentável em matéria dos transportes assenta no princípio de um desenvolvimento com garantia da preservação e não comprometimento futuro dos aspectos sociais, económicos e ambientais.

A rede rodoviária constitui a infra-estrutura de transportes mais importante para o desenvolvimento global de qualquer país, pelo grau de liberdade que lhe está implicitamente associado. Ela pode-se desenvolver por vias de importância progressivamente menor de forma a cobrir todo o território.

Nas últimas décadas, o crescente desenvolvimento do transporte rodoviário de passageiros (colectivo e individual) e de mercadorias, tem contribuído para a aceleração da degradação dos pavimentos rodoviários. Assim, têm-se estudado novos materiais de pavimentação, quer para melhorar a qualidade dos pavimentos existentes quer para aplicação em novos pavimentos. A utilização de materiais alternativos no fabrico de misturas betuminosas, nos quais se incluem as fibras, tem permitido não só aumentar a sua durabilidade, como melhorar o seu desempenho, em particular da camada de desgaste, que para além de estar directamente sujeita à acção do tráfego, está também mais vulnerável aos agentes atmosféricos.

Uma solução que se julga ser particularmente interessante, é a utilização de fibras no fabrico de misturas do tipo "*Stone Mastic Asphalt*" (SMA) para camadas de desgaste. Esta mistura foi desenvolvida na Alemanha em finais da década 60 (NAPA, 2002), sendo frequentemente utilizada em camadas de desgaste de pavimentos nos diversos países da Europa, principalmente em pavimentos que estão sujeitos a cargas elevadas.

De uma forma geral, em Portugal, o conhecimento sobre o comportamento de misturas betuminosas com a utilização de fibras é relativamente reduzido, proveniente de haver ainda pouca experiência na sua aplicação quer em pavimentos rodoviários, quer em pavimentos aeroportuários.

1.2 Motivação e objectivos

Factores como o aumento do volume de tráfego e das cargas transportadas, as maiores exigências de qualidade dos utentes, as restrições orçamentais e as crescentes preocupações ambientais, têm conduzido ao aparecimento de soluções tecnológicas de pavimentação inovadoras, em particular, aquelas em que se utilizam novos materiais.

Actualmente, em Portugal, começa a ser frequente utilizar no fabrico de misturas betuminosas materiais alternativos, como sejam, materiais recuperados de pavimentos antigos degradados (por ex. materiais fresados de misturas betuminosas), borracha reciclada de pneus, entre outros. Nalguns países, existem também aplicações importantes de misturas betuminosas com fibras em camadas de desgaste. No caso específico do nosso país, apesar de existirem experiências pontuais de aplicação deste material, considera-se que os conhecimentos existentes sobre o mesmo não são ainda suficientes.

Esta dissertação visa contribuir para um melhor conhecimento da utilização de fibras em misturas betuminosas, de modo a que esta solução de pavimentação possa ser igualmente considerada e equacionada na fase de decisão quanto à solução a adoptar aquando da construção ou reabilitação de uma estrada.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos distintos:

Capítulo 1: *“Introdução”*. Neste capítulo faz-se referência ao enquadramento do tema e descrevem-se os objectivos e estrutura do trabalho.

Capítulo 2: *“Aspectos relacionados com a utilização de fibras em misturas betuminosas”*. Este capítulo é composto pela revisão bibliográfica que serve de suporte à temática em estudo.

Capítulo 3: *“Métodos de caracterização em laboratório de misturas betuminosas com a utilização de fibras”*. Neste capítulo é feita uma abordagem aos métodos de ensaios laboratoriais, usualmente utilizados para avaliação do desempenho de misturas betuminosas com a utilização de fibras.

Capítulo 4: *“Trabalho experimental para avaliação do desempenho de misturas betuminosas “Stone Mastic Asphalt”*. Este capítulo apresenta o trabalho experimental realizado no âmbito deste estudo, nomeadamente a caracterização da mistura quanto ao seu módulo de rigidez, resistência à deformação permanente e sensibilidade à água, assim como a análise dos resultados obtidos.

Capítulo 5: *“Conclusões e trabalhos futuros”*. Neste capítulo faz-se referência às principais conclusões retiradas deste estudo, com especial ênfase para trabalhos futuros que possam ser desenvolvidos sobre idêntica temática.

2 Aspectos Relacionados com a Utilização de Fibras em Misturas Betuminosas

2.1 Considerações iniciais

A evolução das técnicas de construção ao longo dos anos têm provocado um aumento do interesse no estudo de novos materiais, surgindo novas misturas betuminosas para a melhoria das condições dos pavimentos betuminosos, e consequente diminuição de problemas estruturais.

Os principais factores que influenciam a degradação dos pavimentos são o tráfego e as condições climáticas. A alteração nas condições de circulação do tráfego (aumento do número de veículos, aumento das cargas e diminuição do número de eixos), associada à constante variação das condições climáticas, têm vindo a acelerar o processo de degradação dos pavimentos betuminosos.

A pesquisa das causas de degradação desdobra-se na procura de novas soluções para as colmatar, sendo uma delas o *Stone Mastic Asphalt* (SMA).

O *Stone Mastic Asphalt* é uma mistura betuminosa onde predomina uma fracção elevada de agregados grossos, alto teor de ligante e um aditivo estabilizador, geralmente, fibras, conferindo excelentes propriedades de resposta ao tráfego pesado, nomeadamente em situações aeroportuárias.

A utilização de fibras como aditivo estabilizador nas misturas betuminosas, aplicadas em camada de desgaste, não influencia, geralmente, o desempenho da mistura após a compactação, permitindo no entanto a utilização de maior percentagem de ligante, contribuindo para o aumento da resistência ao desgaste no pavimento (Neves *et al.*, 2004).

Assim, é imprescindível o conhecimento das características de misturas betuminosas com a utilização de fibras, de forma a produzir-se um pavimento com

desempenho equilibrado e funcional, face às solicita es do tráfego e às exigências dos utilizadores.

2.2 O pavimento rodoviário

O pavimento   parte da estrada, rua ou pista que suporta directamente o tráfego e transmite as respectivas solicita es   infra-estrutura: terreno, obras de arte, etc. (LNEC,1973).

A fun o essencial de um pavimento rodoviário   assegurar uma superfície de rolamento que permita a circula o dos veículos com comodidade e segurança, durante um determinado período, denominado de vida útil, sob ac o das ac es do tráfego, e nas diversas condi es climáticas que ocorram (Branco *et al.*, 2006).

O pavimento deve possuir determinadas características estruturarias e funcionais, para que desempenhe correctamente as fun es para o qual foi construído, tendo sempre em considera o o seu período de vida útil.

A nível estrutural deve apresentar as seguintes características:

- Capacidade para resistir às cargas impostas pela passagem dos veículos;
- Resistência das camadas ligadas (com ligante)   fadiga e   deforma o permanente, devido às solicita es repetidas provocadas pelas ac es do tráfego;
- Resistência das camadas não ligadas   deforma o permanente provocada pelas ac es do tráfego.

Funcionalmente, o pavimento deve responder às exigências dos utentes, relacionadas com o conforto e segurança de circula o.

Refere-se que a nível de tipologia existem três tipos de pavimentos: flexíveis, semi-rígidos e rígidos. Para efeitos de desenvolvimento deste trabalho, serão apenas considerados os dois primeiros (flexíveis e semi-rígidos), visto que são os únicos que apresentam na sua constitui o camadas em misturas betuminosas.

Os pavimentos flexíveis são constituídos por camadas superiores formadas por misturas betuminosas compostas por agregados e um ligante (betume asfáltico), seguidas inferiormente por camadas constituídas por materiais granulares, normalmente materiais britados (agregados). Os pavimentos semi-rígidos, à semelhança dos pavimentos flexíveis apresentam camadas superiores compostas por misturas betuminosa sendo, no entanto, estas seguidas de uma camada constituída por agregado estabilizado com um ligante hidráulico.

Na figura 2.1, apresenta-se uma estrutura tipo de um pavimento flexível.

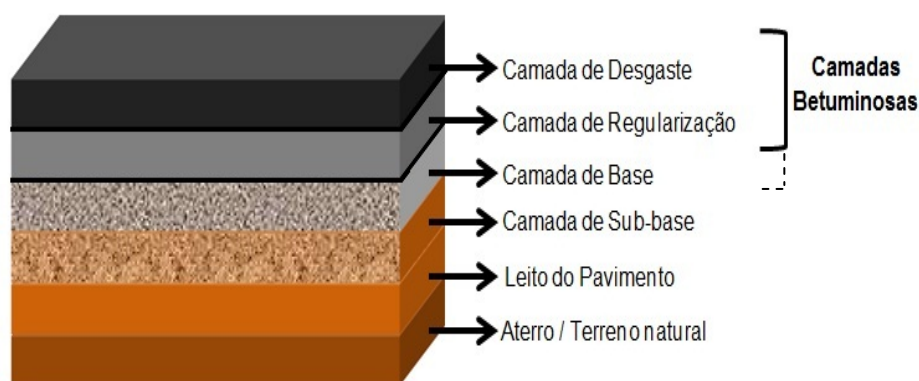


Figura 2.1 – Estrutura tipo de um pavimento flexível

As camadas de um pavimento podem distinguir-se pelas funções que desempenham na estrutura. No caso específico deste estudo, a camada de maior interesse será a camada de desgaste, visto ser a aplicação principal de misturas betuminosas com utilização de fibras. Assim, em termos de características funcionais, a camada de desgaste deve contribuir para uma circulação com conforto e segurança. No caso das misturas com a utilização de fibras, as fibras tem a função de aditivo estabilizador da mistura, permitindo a utilização de maiores percentagens de betume e de agregados grossos, sendo estes últimos responsáveis pela macrotextura existente na superfície da camada de desgaste, que irá assegurar as características funcionais descritas anteriormente. Relativamente ao seu desempenho estrutural, assegura funções relacionadas com

a impermeabiliza o do pavimento, evitando a entrada de água para as camadas inferiores.

Acresce que, com a utiliza o de misturas betuminosas com granulometria descontínua, recorrendo a uma granulometria composta maioritariamente por agregados grossos, está-se a promover um maior imbricamento dos agregados, contribuindo para um acréscimo da resistência estrutural do pavimento face as cargas provocadas pelas ac oes do tráfego.

No quadro 2.1, apresentam-se as novas designa es de misturas betuminosas, previstas para utiliza o em camada de desgaste, e de acordo com o Caderno de Encargos Tipo da Obra (CETO) da Estradas de Portugal (EP).

Quadro 2.1 – Designa o de misturas betuminosas utilizadas em camada de desgaste (CETO, 2011)

Camada	Designa�o anterior	Designa�o actual
Desgaste	Betão Betuminoso	AC 14 surf ligante (BB)
	Betão Betuminoso Rugoso	AC 14 surf ligante (BBr)
	(micro) Betão Betuminoso Rugoso	AC 10 surf ligante (mBBr)
	Betão Betuminoso Drenante	PA 12 ligante (BBd)

AC – designa o do produto em inglês “*Asphalt Concrete*”;
 PA – designa o do produto em inglês “*Porous Asphalt*”
 ligante – classe a definir;
 surf – referente   camada de desgaste, cujo termo em inglês   “*surface course*”.

No Quadro 2.1, faz-se uma referência a três tipos de misturas pertencentes ao grupo “Betão Betuminoso” (AC): o primeiro refere-se ao betão betuminoso convencional (BB), de granulometria contínua; o segundo e o terceiro tipo de mistura referem-se a misturas rugosas, de granulometria descontínua. Apresenta-se também neste quadro, o Betão Betuminoso Drenante, designado na terminologia inglesa por *Porous Asphalt* (PA). Esta mistura, tal como as mencionadas anteriormente,   fabricada a quente, mas apresenta uma curva granulométrica aberta. As normas europeias de produto para as misturas betuminosas do grupo “Betão Betuminoso” e das “Misturas Drenantes” são, respectivamente, a EN 13108-1:2006 e EN 13108-7:2006. A designa o deste

último tipo de mistura inclui as siglas relativas ao tipo de mistura (PA) em inglês, a abertura do peneiro superior do agregado na mistura, em mm (D) e a designação do betume utilizado (ligante). Para além do referido, acrescenta-se ainda a designação da mistura em Português: betão betuminoso drenante (BBd). Assim, quando se refere um tipo desta mistura, a nova designação, por exemplo, para uma mistura com D= 12,5 mm e betume 50/70 será: PA 12 50/70 (BBd).

Para além das misturas referidas no Quadro 2.1, estão também previstas no CETO da EP, misturas betuminosas rugosas e abertas produzidas com betume modificado com borracha.

Refere-se que o Caderno de Encargos Tipo da EP ainda não contempla a utilização de misturas com a adição de fibras em trabalhos de pavimentação em Portugal, nomeadamente a utilização de misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt*, especificada na norma europeia EN 13108-5:2006.

2.3 Principais Degradações Associadas aos Pavimentos Flexíveis

Os pavimentos estão sujeitos a solicitações que originam a sua progressiva degradação, ao longo da sua vida útil (Figura 2.2). As solicitações dos pavimentos são, essencialmente, provenientes das seguintes acções (Silva, 2005; Branco *et al.*, 2006):

- Acção do tráfego, que consiste fundamentalmente numa força vertical repetida e numa força tangencial proveniente do contacto entre o pneu e o pavimento. A acção da força vertical origina esforços de compressão e tracção nas camadas betuminosas e esforços de compressão nas camadas granulares. A acção do tráfego provoca ainda esforços de corte em ambas as camadas;
- Acção dos agentes atmosféricos, que é, essencialmente, constituída pela acção da água e pela acção da temperatura. A acção da água origina, por exemplo, a diminuição da capacidade de carga das camadas granulares e do solo de fundação, enquanto a acção da temperatura é responsável pelo

envelhecimento do betume, propício ao surgimento de deforma es permanentes e fendilhamento.

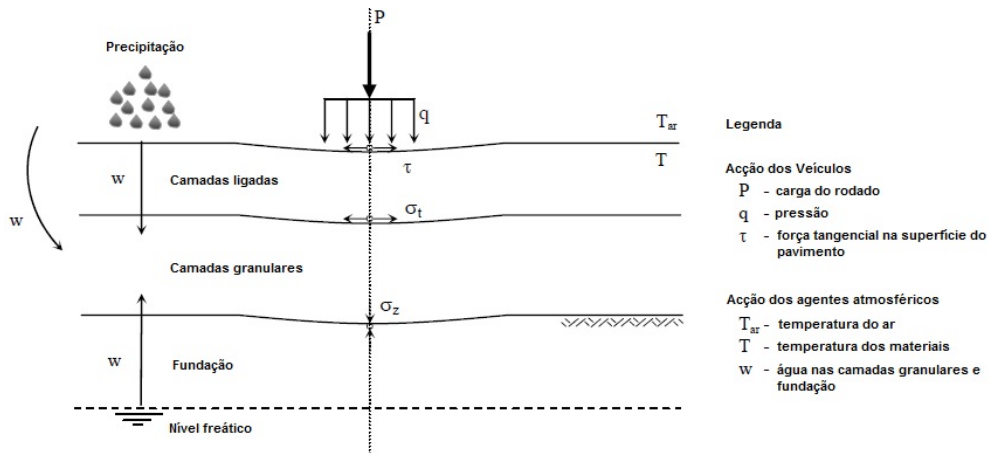


Figura 2.2 – Representa o esquemática das solicita es e do modo de funcionamento de um pavimento flexível (Silva, 2005; Branco et al., 2006)

De acordo com um estudo levado a cabo no âmbito da ac o COST 333 (1999), entre os mecanismos de degrada o mais frequentes dos pavimentos flexíveis em países europeus, estão a deforma o permanente nas camadas betuminosas e o fendilhamento com origem   superfície (Figura 2.3). Pode-se também verificar que, a perda de aderência (pneu-pavimento), que pode ser causada pelo polimento dos agregados   superfície,   também um dos tipos de degrada es com maior expressão dos pavimentos analisados.

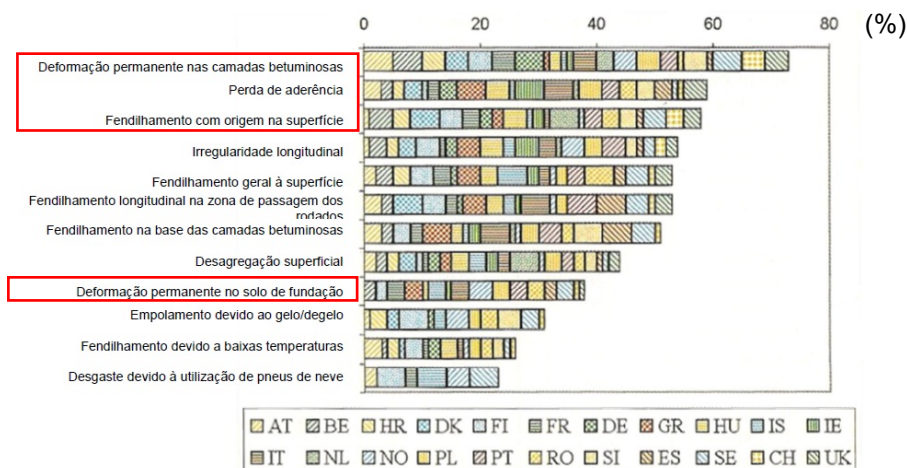


Figura 2.3 – Principais tipos de degrada o de pavimentos flexíveis na Europa (adaptado de COST 333, 1999)

Na análise das conclusões da acção COST 333 (1999), para o caso de Portugal, verifica-se que o principal tipo de degradação dos pavimentos assenta no fendilhamento longitudinal das camadas betuminosas na zona de passagem dos rodados, o que é bastante interessante, porque o tipo de mistura em estudo neste trabalho é caracterizado por apresentar maior percentagem de betume, contribuindo, aparentemente, para um bom comportamento na resistência ao fendilhamento por fadiga.

Já a nível europeu, se verifica também, da observação da Figura 2.3, que a deformação permanente no solo de fundação, para a qual são habitualmente dimensionados os pavimentos, não está entre as primeiras causas de degradação dos pavimentos na Europa, sendo a deformação do pavimento afectada, sobretudo, pela deformação permanente nas camadas betuminosas, como já referido.

De acordo com a Figura 2.2, o esquema de esforços para o qual, de uma forma geral, se analisam estruturalmente os pavimentos não está concebido para responder ao fenómeno da deformação permanente com origem nas camadas betuminosas, visto que, nas camadas ligadas apenas se consideram esforços horizontais de tracção (σ_t) que estão associados ao fendilhamento por fadiga dessas camadas.

De facto, são dois os critérios de ruína que são habitualmente considerados no dimensionamento de pavimentos flexíveis:

- fendilhamento por fadiga com origem na base das camadas betuminosas;
- deformações permanentes excessivas no topo do solo de fundação.

Segundo a experiência anteriormente existente (Branco *et al.*, 2006), é habitual considerar-se que:

- apesar de todas as camadas contribuírem para a formação de assentamento à superfície do pavimento no local de passagem dos rodados

(rodeiras), devido   acumula o de deforma es permanentes nessas camadas,   o solo de funda o que mais contribui para este fen meno;

- a contribui o das camadas betuminosas, quando bem formuladas,   relativamente reduzida.

Relativamente ao fendilhamento por fadiga com origem na base das camadas betuminosas, verifica-se que para este tipo de misturas (SMA), não são preconizados ensaios de caracteriza o do desempenho das misturas betuminosas na norma EN 13108-5:2006. Este facto deve-se ao comportamento das misturas betuminosas ao fendilhamento por fadiga estar relacionado com o conteúdo de betume existente na mistura, sendo que misturas betuminosas com maior percentagem de betume (por exemplo: o SMA), normalmente, apresentam bom comportamento na resistência   fadiga. Por outro lado, as misturas SMA, devido as suas características específicas, são igualmente aplicadas em camada de desgaste, sobre outras camadas betuminosas.

Conforme referido, as deforma es permanentes   superfície do pavimento podem ter origem nas camadas ligadas ou nas camadas não ligadas. A figura 2.4 apresenta um esquema das possíveis origens das deforma es permanentes associadas às rodeiras.

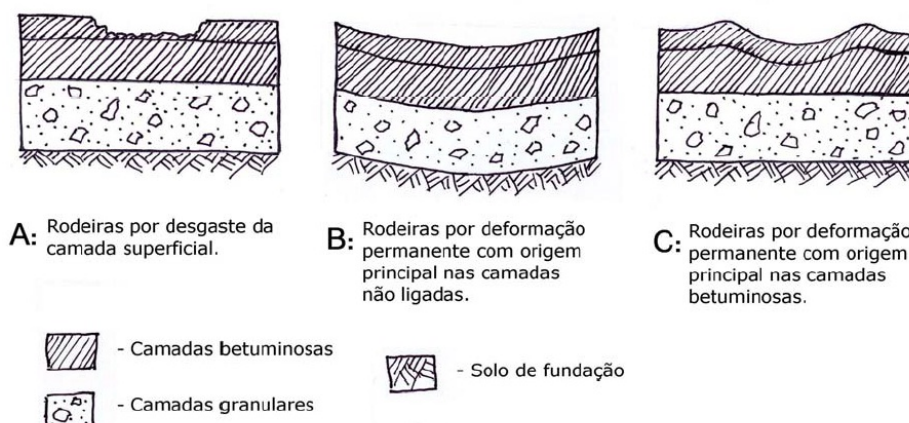


Figura 2.4 – Esquema das deforma es permanentes do pavimento, associadas ao aparecimento de rodeiras (adaptado de Gardete, 2006)

Assim, ao nível do presente estudo será pertinente analisar o caso C, sendo que este é directamente influenciado pelo desempenho das camadas ligadas e de acordo com o referido, tradicionalmente considerava-se que a contribuição das camadas em misturas betuminosas, correctamente formuladas, seria muito reduzida.

Analisando o esquema representativo do caso C, o cavado de rodeiras é causado pela deformação permanente das camadas betuminosas. Este tipo de rodeiras é caracterizado por possuir um raio pequeno e pela formação de pequenas elevações laterais ao logo do pavimento. Para esta situação contribui, essencialmente, a camada de desgaste (Freire, 2002), que é a zona sujeita às cargas da acção do tráfego e às condições climáticas adversas, sendo mais preocupante em países com temperaturas quentes.

A causa da presença das degradações referidas anteriormente nos pavimentos betuminosos (Figura 2.3) está, principalmente, relacionada com o aumento do tráfego de veículos pesados, a substituição de eixos duplos por simples, a elevada pressão de enchimento dos pneus e o aumento das cargas por eixo e com as frequentes alterações climáticas.

A junção de factores relacionados com tráfego aos factores relacionados com a composição da mistura betuminosa, poderá proporcionar uma diminuição na vida útil do pavimento.

As misturas betuminosas com adição de fibras, possuem, em relação às misturas tradicionais, maior conteúdo de betume, contribuindo para o aumento da resistência ao fendilhamento por à fadiga.

A principal preocupação do seu inventor, Dr. Zichner, engenheiro Alemão, foi responder a problemas causados pelo desgaste dos pavimentos betuminosos, nomeadamente deformações permanentes e polimento dos agregados (Blazejowski, 2010).

2.4 Misturas Betuminosas com a incorpora o de fibras

2.4.1 Descri o geral das misturas

As fibras são um elemento fundamental no fabrico de misturas betuminosas de alto desempenho do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA). Este tipo de mistura betuminosa com fibras foi utilizado pela primeira vez na constru o de pavimentos rodoviários na Alemanha.

De acordo com NAPA (2002), o *Stone Mastic Asphalt*   uma mistura flexível, estável e bastante resistente   rotura.

A mistura betuminosa SMA   uma mistura fabricada a quente, de granulometria descontínua, caracterizada por apresentar uma elevada percentagem de agregados grossos, semelhante ao betão betuminoso drenante (PA). No entanto, o esqueleto pétreo formado por agregados grossos   preenchido por um mástique betuminoso, ao qual são adicionados fibras para fornecer estabilidade durante o transporte e compacta o (Neves *et al.*, 2004).

A Figura 2.5 esquematiza, simplificadamente, a constitui o do *Stone Mastic Asphalt*.

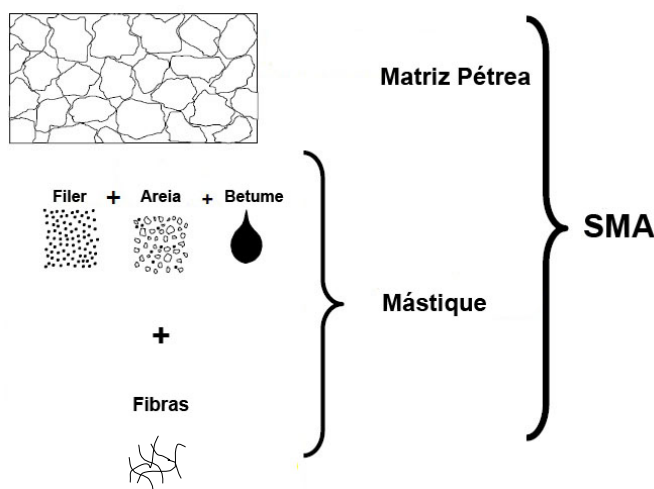


Figura 2.5 – Esquema simplificado da constitui o do *Stone Mastic Asphalt* (adaptado de Mourão, 2003)

O masticado formado pelo filler, agregados finos, fibras e um relativamente elevado conteúdo em betume contribui para o baixo volume de vazios da mistura, aproximadamente 4% (Neves *et al*, 2004), impedindo a passagem da água para as camadas inferiores. Na impermeabilidade da mistura (mistura fechada) e na percentagem em betume do Stone Mastic Asphalt residem as principais diferenças em relação ao *Porous Asphalt* (BBd).

O elevado conteúdo de masticado betuminoso, também é responsável pela coesão da mistura, garantindo o envolvimento total dos agregados e diminuição do índice de vazios, retardando o processo de oxidação da mistura e, conseqüentemente, o seu envelhecimento (Mourão, 2003).

A Figura 2.6 representa duas amostras distintas de estruturas de misturas betuminosas: uma do tipo SMA e outra do tipo betão betuminoso. É facilmente visível a elevada percentagem de agregados grossos na amostra da mistura SMA, bem como o esqueleto pétreo formado.

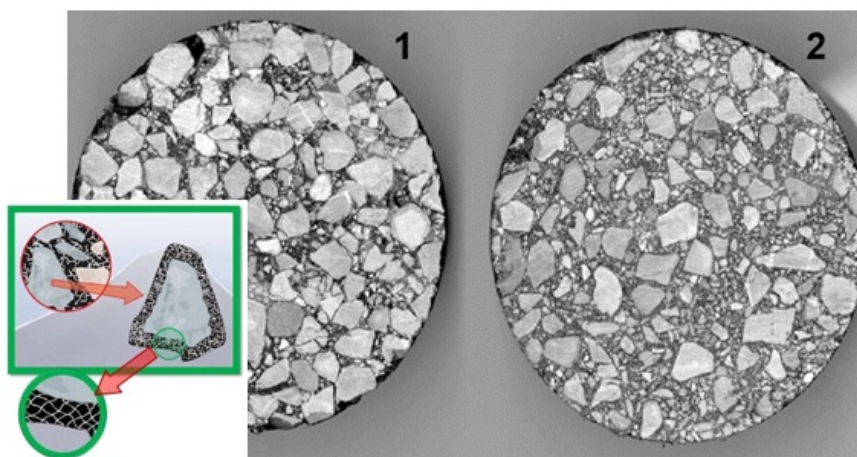


Figura 2.6 – Estrutura de misturas betuminosas: 1- SMA; 2- BB

Como referido anteriormente, o CETO (2011) não refere requisitos de fusos granulométricos para misturas betuminosas do tipo SMA. Na Figura 2.7

apresentam-se exemplos de curvas granulométricas, tendo em consideração os fusos granulométricos definidos no CETO (2011) para misturas destinadas à aplicação em camada de desgaste (ver Quadro 2.1), que correspondem a curvas “médias” para os fusos especificados.

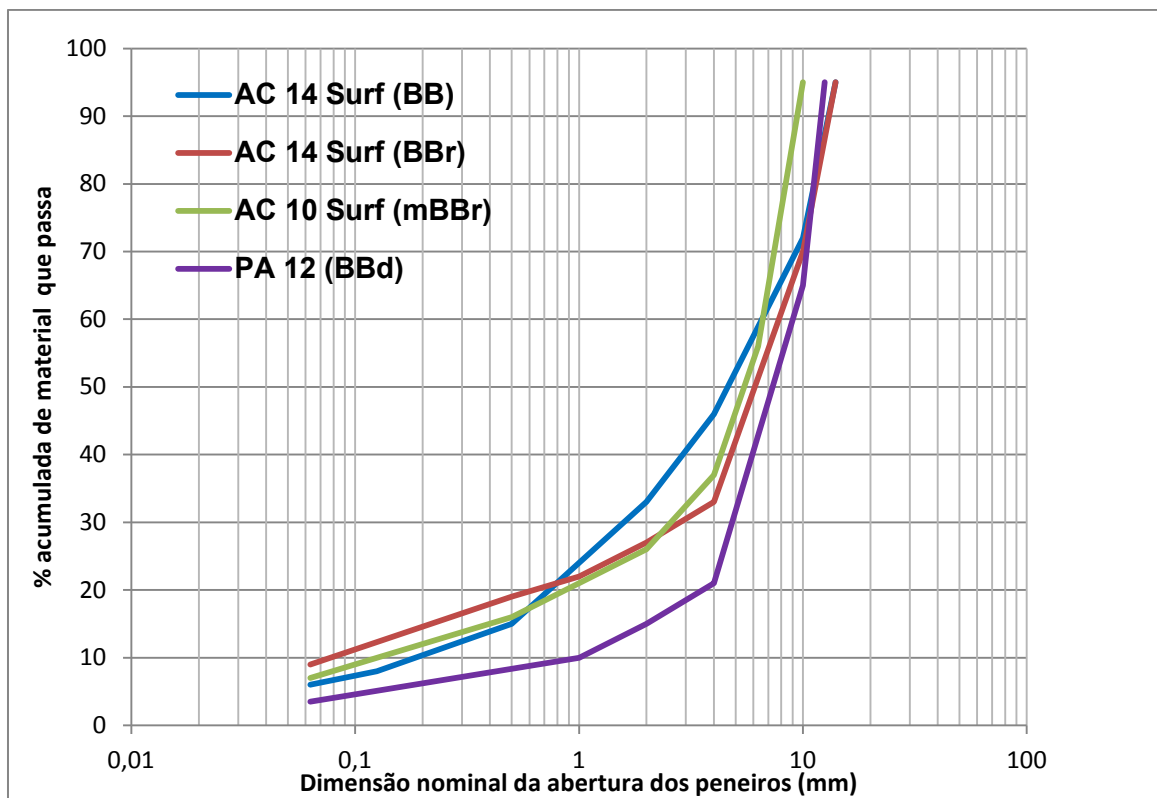


Figura 2.7 – Exemplo de curvas granulométricas preconizadas no CETO para misturas betuminosas destinadas a camada de desgaste.

Analisando as curvas ilustradas na Figura 2.7, é espectável que a curva granulométrica do SMA (nomeadamente o SMA 12) se insira entre a curva granulométrica do AC 14 Surf (BBr) e do PA 12 (BBd), com maior proximidade à primeira, visto que a segunda apresenta pouco material retido no peneiro 0,063 mm.

Num estudo de Mourão (2003), comparam-se curvas granulométricas de três misturas betuminosas: betão betuminoso tradicional, de granulometria contínua; mistura tipo SMA, de granulometria descontínua; betão betuminoso drenante, de granulometria aberta (Figura 2.8).

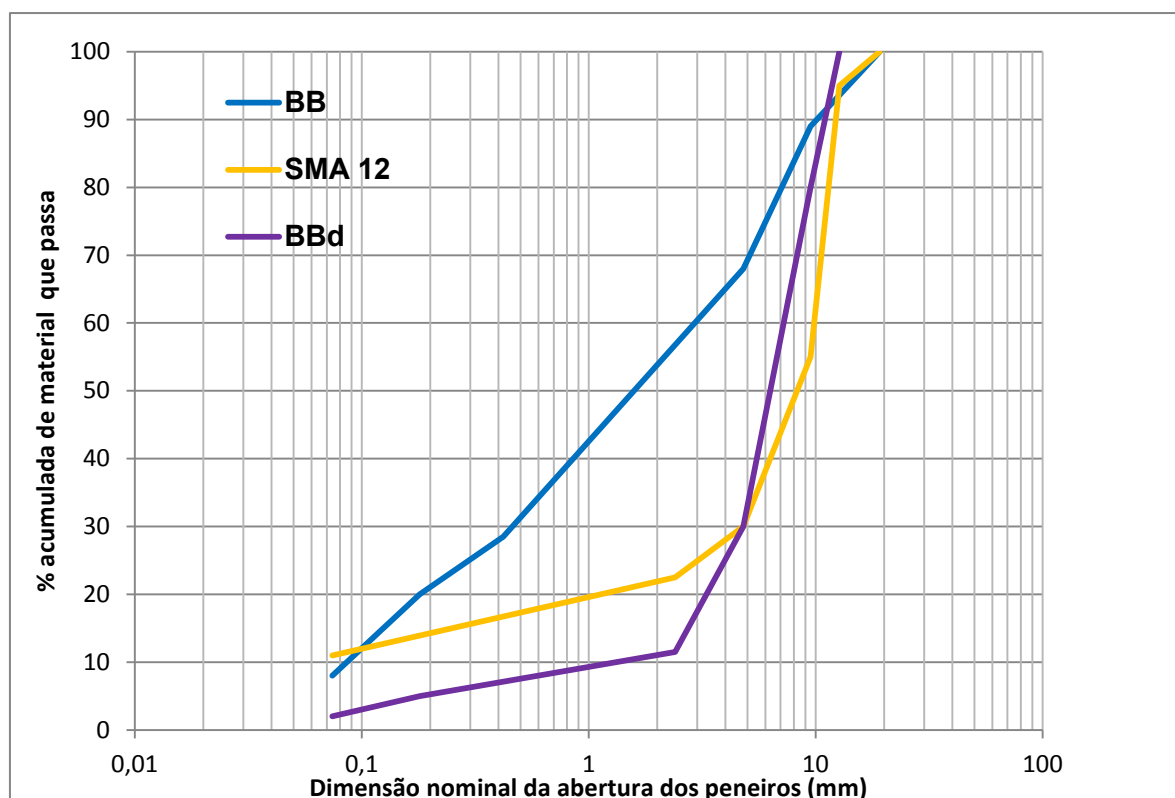


Figura 2.8 – Curvas granulométricas de misturas betuminosas em camada de desgaste (BB; SMA; BBd) (adaptado de Mourão, 2003)

Da observação da Figura 2.8, onde estão representadas as curvas granulométricas referidas, verifica-se que a curva caracterizante da mistura SMA apresenta uma percentagem relativamente elevada quer de filer, quer de agregado grosso. É essencialmente este tipo de granulometria que caracteriza as misturas SMA, proporcionando a este tipo de mistura um excelente comportamento mecânico (Neves *et al.*, 2004).

As Figuras 2.9 e 2.10 representam uma análise comparativa da curva granulométrica da mistura SMA (SMA 12) utilizada no estudo de Mourão (2003), com os fusos granulométricos preconizados no CETO (2011) para misturas betuminosas passíveis de utilização em camada de desgaste.

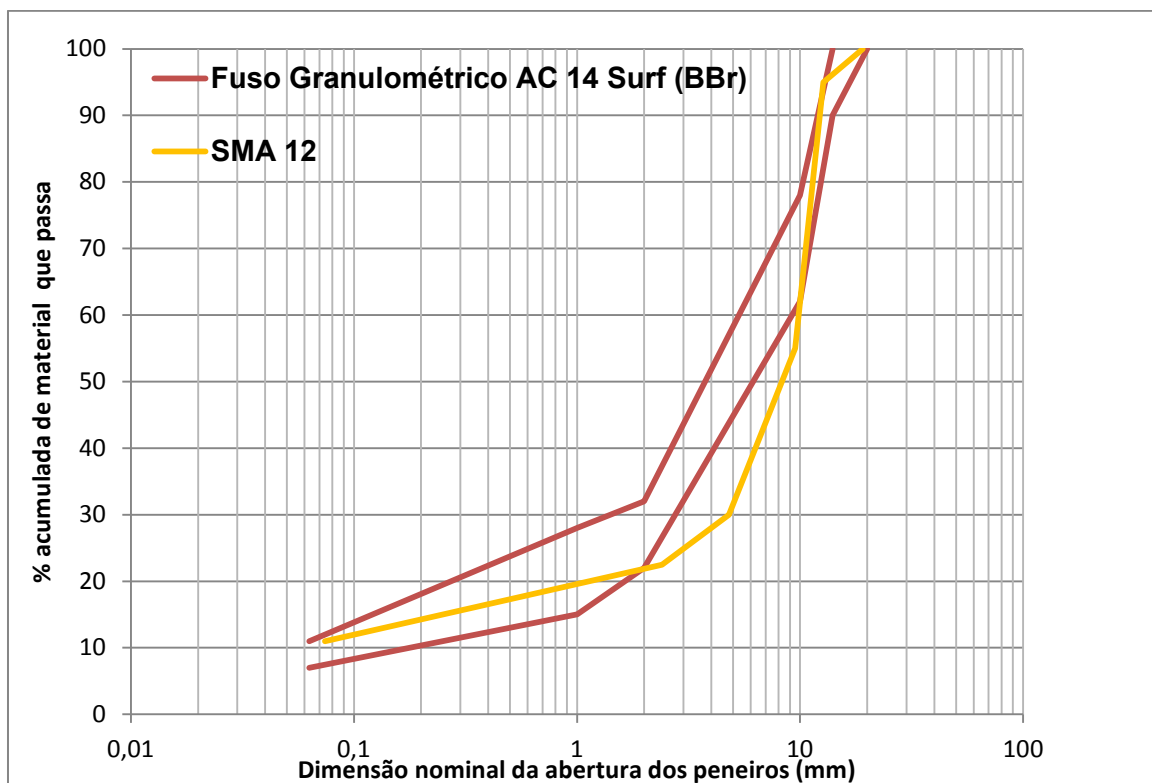


Figura 2.9 – Compara o entre o fuso granulométrico previsto no CETO para a mistura AC 14 Surf (BBr) com a curva da mistura SMA 12 definida no estudo de Mourão (2003)

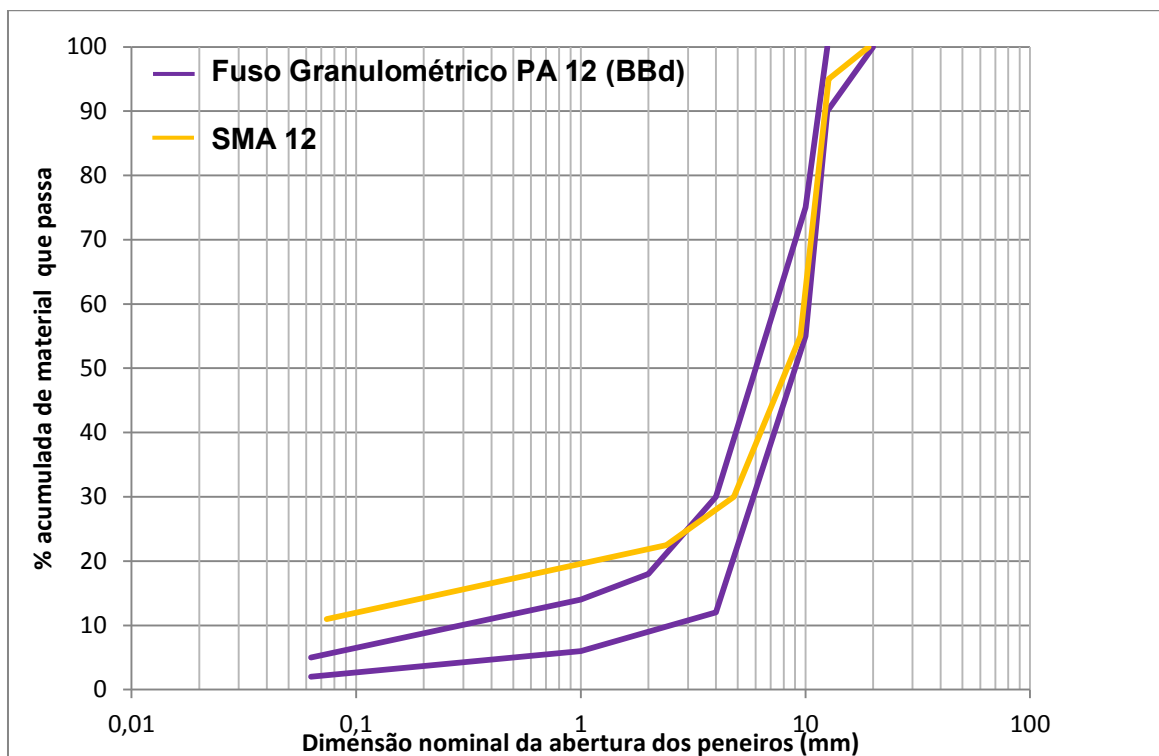


Figura 2.10 – Compara o entre o fuso granulométrico previsto no CETO para a mistura PA 12 (BBd) com a curva da mistura SMA 12 definida no estudo de Mourão (2003)

Como se pode verificar da análise das Figuras 2.9 e 2.10, a curva granulométrica da mistura SMA 12 utilizada no estudo de Mourão (2003), enquadra-se numa zona intermédia entre os fusos granulométricos previstos no CETO (20011) para as misturas AC 14 Surf (BBr) e PA 12 (BBd). Verifica-se, também, que a fracção de material fino da curva da mistura SMA 12 “encaixa-se” no fuso da mistura rugosa, enquanto que grande percentagem da fracção material grosso insere-se no fuso da mistura drenante.

A análise das curvas granulométricas das misturas betuminosas é sempre um aspecto importante para caracterização da mistura, principalmente nas misturas SMA, visto que esta é concebida para maximizar o contacto entre os agregados grossos, aumentando a interacção entre as partículas (Batista e Miranda, 2010). Esta interacção (Figura 2.11) é fundamental para proporcionar uma resistência e durabilidade adequada à mistura (NAPA, 2002).

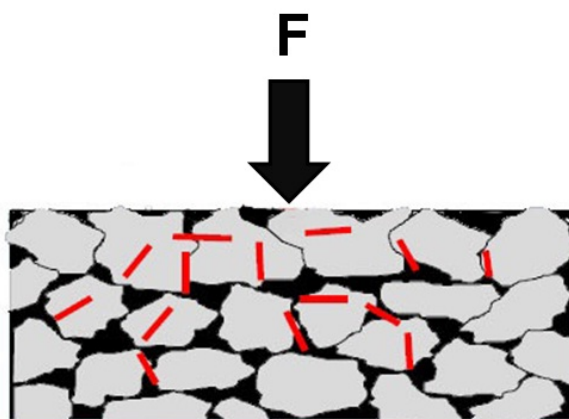


Figura 2.11 – Interação agregado-agregado

Baseando-se no conceito do contacto entre os agregados grossos, Brown e Mallick (1995), desenvolveram um método para avaliar se a mistura apresenta contacto entre agregados grossos. Este método consiste na relação entre os vazios na mistura de agregado (VMA) na mistura SMA e a percentagem de agregado fino presente na mistura (material que passa no peneiro com abertura

de 4,75 mm). Compactando uma série de misturas contendo 15% a 50% de agregados finos e calculando o VMA para essas misturas, Brown e Mallick (1995) concluíram que,   medida que a percentagem de agregados finos diminui o valor de VMA também diminui, existindo uma linearidade aproximada entre os dois valores. Essa linearidade aproximada mantem-se até percentagens de agregados finos na ordem dos 30%, sendo que neste ponto o VMA torna-se, praticamente, constante. O instante em que o VMA tende a diminuir (através da diminui o da percentagem de agregados finos)   interpretado por Brown e Mallick (1995) como o ponto em que o contacto agregado-agregado (imbricamento) existe.

Em termos de aplica o, a mistura SMA,   geralmente utilizada em camada de desgaste numa espessura que varia entre 1,5 cm e 6,0 cm (Antunes, 2010), em fun o do diâmetro máximo do agregado.

De acordo com as especifica es da norma europeia EN 13108-5:2006, a designa o da mistura SMA   feita com base nos seguintes pressupostos: dimensão máxima do agregado e tipo de betume utilizado. Portanto, para uma mistura com dimensão máxima de agregado 12 (12,5) mm e com um betume 50/70, ter-se-ia uma designa o: SMA Surf 12 50/70.

Conforme referido anteriormente, a espessura do SMA varia entre 1,5 cm e 6,0 cm. A utiliza o de espessuras superiores pode originar o risco de deforma es permanentes, ou seja incrementa a probabilidade de forma o de rodeiras. Nos Estados Unidos, 90% dos pavimentos efectuados com SMA apresentam deforma es sob forma de rodeiras na ordem dos 4,0 mm. No entanto, muitos destes problemas estão associados a problemas de constru o (Cooley e Hurley, 2004).

Existem registos de insucessos deste tipo de mistura, geralmente ligados a problemas de segrega o e exsuda o, sendo esta caracterizada pela altera o da composi o da camada de desgaste devido   migra o para a superfície de um excesso de ligante, com consequências a nível do envolvimento dos agregados e da redu o da macrotextura superficial. Estes riscos podem ser

controlados se existir uma boa selecção de agregados, dosagem apropriada de ligante e de fibras, controlo da temperatura de fabrico e compactação (Mourão, 2003).

A deficiente formulação da camada de desgaste (principalmente o excesso de ligante e a utilização de ligantes de reduzida viscosidade), associada a acções severas do tráfego (tráfego pesado e lento) e a acções climáticas desfavoráveis (temperaturas elevadas), estão na origem da exsudação (Branco *et al*, 2006). A exsudação do ligante em misturas do tipo SMA também pode ocorrer pela falta ou distribuição não homogénea das fibras.

Por esta razão, neste tipo de misturas é essencial a utilização de fibra. Conforme será descrito em 2.4.2.3, existem actualmente no mercado diversos tipos de fibras, como sejam, as fibras de celulose, fibras têxteis, fibras de carbono, fibras de vidro, etc..

Devido à facilidade de obtenção e ao seu comportamento como aditivo estabilizador, as fibras de celulose são as mais utilizadas no fabrico de misturas betuminosas tipo SMA (Campbell, 1999).

2.4.2 Características das Misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt*

2.4.2.1 Agregados

A denominação “agregado” está associada a material pétreo, sendo especificado consoante a sua granulometria do mesmo.

A percentagem de agregados presentes na composição de misturas betuminosas representa, geralmente, 90 a 95 % do peso da mistura e 75 a 85% do seu volume (Mahmoud, 2005). A utilização de agregados em misturas betuminosas tem como principal objectivo a formação de um esqueleto pétreo que resista às acções do tráfego (Branco *et al.*, 2006).

O desempenho de uma mistura betuminosa está relacionado com a sua distribui o granulométrica. A granulometria afecta, basicamente, todas as propriedades da mistura betuminosa, nomeadamente, a durabilidade, a permeabilidade, a estabilidade, a trabalhabilidade e a resistência   deforma o permanente. Devido ao enumerado, a utiliza o de uma granulometria correcta e adequada   mistura que se pretende fabricar   essencial para o seu bom desempenho durante a sua vida útil (Motta e Leite, 2006).

Uma mistura betuminosa  , geralmente, composta por agregados de três dimensões diferentes: agregado grosso, agregado fino e por filer (CETO, 2011):

- Os agregados grossos têm a fun o de garantir a resistência mecânica da mistura, aumentar a estabilidade e assegurar rugosidade superficial suficiente para a circula o dos veículos;
- Os agregados finos têm a fun o de dar estabilidade e compacidade   mistura;
- O filer tem a fun o de dar compacidade e impermeabilidade.

A qualidade e estrutura dos agregados são factores de extrema importância numa mistura betuminosa (principalmente do tipo SMA devido   maximiza o do contacto agregado-agregado), influenciando directamente o seu comportamento a nível de resistência às ac o es do trafego (Gatchalian, 2006).

Deve ser garantido que as características do agregado sejam as mais adequadas para o desempenho e funcionalidade do tipo mistura betuminosa fabricada. De acordo com Branco *et al.* (2006), as principais características dos agregados que influenciam o comportamento das misturas betuminosas são:

- Granulometria;
- Resistência mecânica;
- Forma;
- Limpeza.

▪ **Granulometria e Fuso granulométrico**

Os agregados, quando incorporados como elementos estruturantes numa mistura betuminosa, deverão obedecer a um fuso granulométrico pré-estabelecido para a respectiva mistura betuminosa. No caso da Rede Rodoviária Nacional, as especificações técnicas são as constantes do CETO (2011). Tal como referido anteriormente, este documento não prevê, ainda, fusos granulométricos para misturas do tipo SMA. No entanto entende-se que, tendo em conta as curvas granulométricas utilizadas em outros países, as percentagens de agregado grosso e de filler são relativamente elevadas, sendo a percentagem de agregado fino muito reduzida, representando, consoante o tipo de SMA, cerca de 20 a 30 % do volume total de agregados.

Na Figura 2.12, é possível visualizar duas amostras de agregados utilizados na composição de misturas betuminosas (Bernucci *et al.*, 2008).

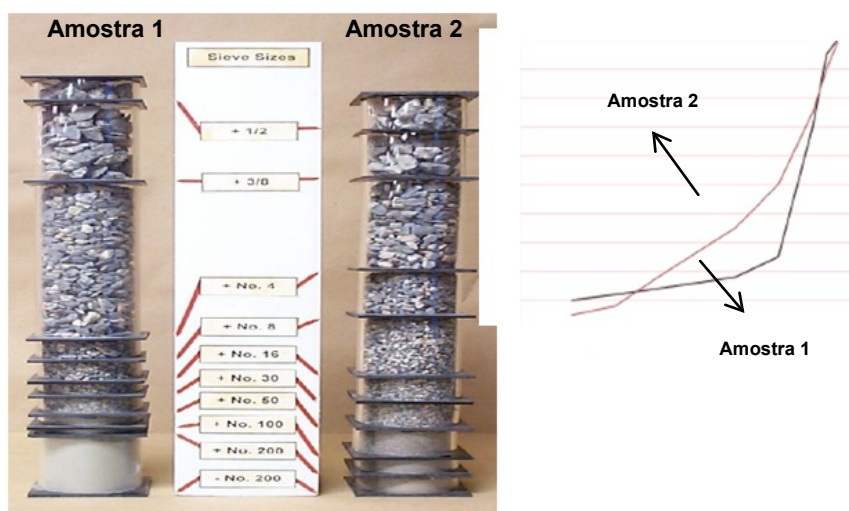


Figura 2.12 – Comparação da granulometria dos agregados da mistura tipo SMA com a mistura tipo AC (BB) (Bernucci *et al.*, 2008)

A amostra 1 corresponde à granulometria de agregados utilizados numa mistura do tipo SMA e a amostra 2 corresponde à granulometria dos agregados utilizados numa mistura tipo betão betuminoso (AC). Comparando as duas amostras,

verifica-se facilmente que a percentagem de agregados grossos, utilizados na mistura do tipo SMA é superior à percentagem existente na mistura betuminosa convencional, conferindo uma melhor resposta às solicitações do tráfego (principalmente do tráfego pesado). Salienta-se, também, que a percentagem de material retido no peneiro de 0,075 mm (considerando a série de peneiros ASTM) é, grosseiramente, mais elevada.

As características da curva granulométrica definem a denominação dada à mistura. Uma curva granulométrica contínua origina uma mistura fechada ou densa, enquanto que uma curva granulométrica aberta dá origem a uma mistura aberta ou drenante. Conforme ficou patente nas Figura 2.9 e 2.10, a mistura do tipo SMA enquadra-se entre estas duas, caracterizando-se por apresentar uma granulometria descontínua, que geralmente dá origem a misturas rugosas. De facto, a sua elevada percentagem de agregados grossos origina uma macrotextura na superfície de rodagem relativamente elevada, permitindo um rápido escoamento das águas. Este factor é importante para misturas betuminosas aplicadas em camada de desgaste.

Como referido anteriormente, o filer também tem o seu papel no fabrico e aplicação de misturas betuminosas. Normalmente, serve de material para preenchimento de vazios entre os agregados grossos, contribuindo para a resistência à água e para a melhoria da trabalhabilidade da mistura, principalmente durante a sua aplicação e compactação.

O filer representa a percentagem de pó que passa no peneiro de 0,063 mm ou no peneiro n.º 200 (0,074 mm), respectivamente, segundo as séries de peneiros europeus (NP EN 933-2:1999 e NP EN 13043:2004) e segundo a série de peneiros ASTM e é proveniente da erosão e fractura de agregados grossos e finos (Santana, 1995 citado por Mourão, 2003).

Segundo o CETO (2011), o filer utilizado no fabrico de misturas betuminosas pode ser comercial ou recuperado. São considerados fileres comerciais, materiais como o pó calcário, a cal hidráulica e o cimento Portland que são produzidos em

instalações industriais segundo um processo controlado (CETO, 2011; Campbell, 1999). São considerados fileres recuperados, os que resultam do processo de fabrico da mistura betuminosa, por recuperação dos finos por meio de sistemas adequados.

A utilização de filer com granulometrias distintas, influencia as características da mistura, nomeadamente a sua rigidez. Se por um lado, com um filer de partículas pequenas consegue-se uma maior incorporação no ligante, aumentando a sua resistência à deformação permanente, por outro lado está a diminuir-se a sua resistência à fadiga devido à menor flexibilidade da mistura (Motta e Leite, 2000).

A Norma Europeia EN 13108-5:2006 define os requisitos para a classificação da curva granulométrica de misturas tipo SMA, considerando as duas séries de peneiros, transcritos pela norma EN 13043:2002. Assim, o fuso granulométrico das misturas é delimitado por valores máximos e mínimos, tendo em consideração a percentagem de material que passa nos peneiros 1,4 D, D (em que D caracteriza o tipo de mistura SMA, em particular, no que concerne à dimensão máxima do agregado), 2 mm e 0,063 mm (Quadro 2.2).

Quadro 2.2 – Limites do fuso granulométrico de misturas tipo SMA (EN 13108-5:2006)

D	4	6(6,3)	8	10	12(12,5)	14	16	20
Peneiro (mm)	% de material passado							
1,4 D ^a	100	100	100	100	100	100	100	100
D	90-100	90-100	90-100	90-100	90-100	90-100	90-100	90-100
2	25-45	20-40	20-40	20-35	20-35	15-30	15-30	15-30
0,063	5,0-14	5,0-14	5,0-14	5,0-13	5,0-13	5,0-12	5,0-12	5,0-12

^a Quando o peneiro calculado em 1,4 D não é um número exacto ma série ISSO 565/R20, deve adoptar-se o peneiro mais próximo do valor obtido.

Conforme se pode verificar da observação do Quadro 2.2, a norma europeia, relativa a misturas do tipo SMA, preconiza uma grande diversidade de dimensão máxima do agregado (oito valores de D diferentes), numa gama que vai desde D=4 mm, para camadas mais finas, até D=20 mm, para camadas de maior espessura.

A norma EN 13108-5:2006 preconiza ainda restrições à diferença entre valores máximos e mínimos do material passado em alguns peneiros (Quadro 2.3).

Quadro 2.3 – Intervalo entre valores máximos e mínimos de material passado nos peneiros seleccionados (EN 13108-5:2006)

Peneiro (mm)	Limites (% de material)	
	Limite inferior	Limite superior
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

Cumprindo os valores dos fusos granulométricos referidos nos quadros anteriores, para os diferentes tipos de misturas, pode-se determinar ou verificar a conformidade das granulometrias geralmente utilizadas no fabrico de misturas do tipo SMA. No Quadro 2.4 e nas Figuras 2.13 a 2.15, apresentam-se exemplos de fusos granulométricos utilizados em estudos com misturas do tipo SMA noutros países. Nas Figuras 2.13 a 2.15, apresentam-se ainda graficamente, os limites estabelecidos pela norma EN 13108-5:2006, para o tipo de mistura SMA em análise com a mesma dimensão máxima do agregado (D).

Quadro 2.4 – Fusos granulométricos de misturas do tipo SMA aplicadas em camada de desgaste (adaptado de Brown *et al*, 2009)

Peneiros (mm)	Percentagem acumulada do material passado		
	Alemanha SMA 0/8S	Estados Unidos da América SMA 12,5	China SMA 16
19	-	100	100
16	-	-	90 – 100
13,2	-	-	60 – 80
12,5	-	90 – 100	-
11,2	100	-	-
9,5	-	50 – 80	40 – 60
8,0	90 – 100	-	-
5,0	30 – 45	-	-
4,75	-	20 – 35	20 – 32
2,36	-	16 – 24	18 – 27
2,0	20 – 27	-	-
1,18	-	-	14 – 22
0,60	-	-	12 – 19
0,30	-	-	10 – 16
0,15	-	-	9 – 14
0,09	10 -13	-	-
0,075	-	8 – 11	8 – 12

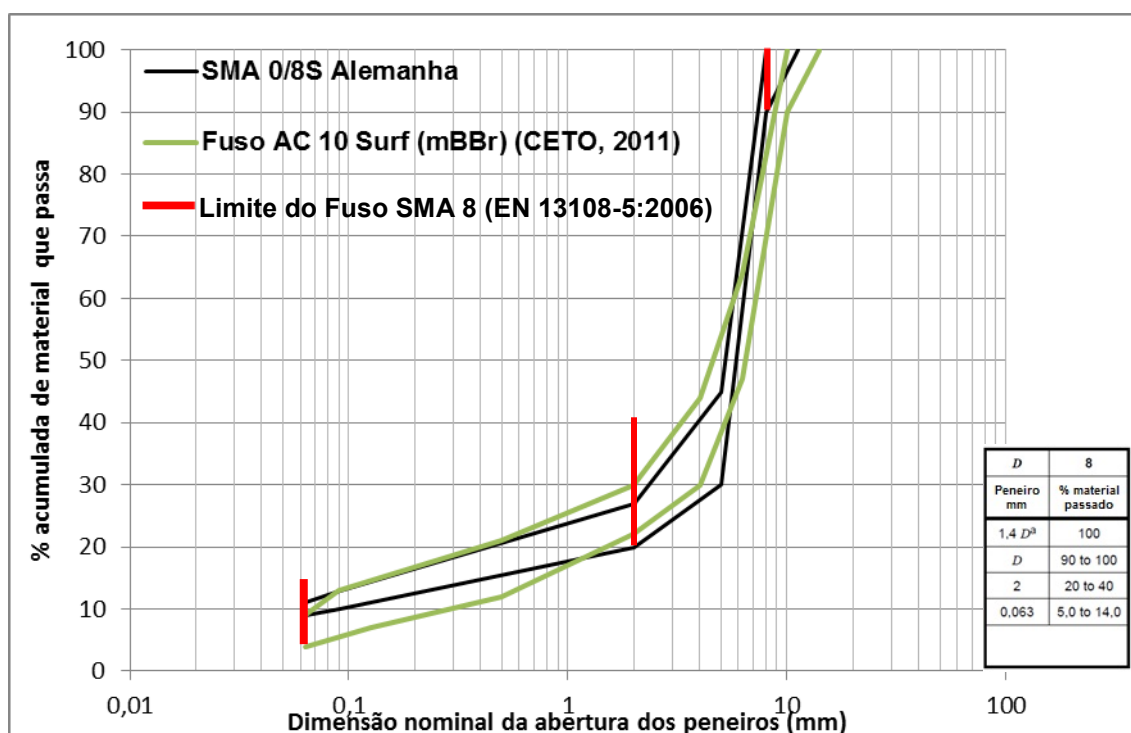


Figura 2.13 – Comparação entre o fuso granulométrico da mistura AC 10 Surf (mBBR) previsto no CETO (2011) e o fuso granulométrico do SMA 0/8S utilizado na Alemanha

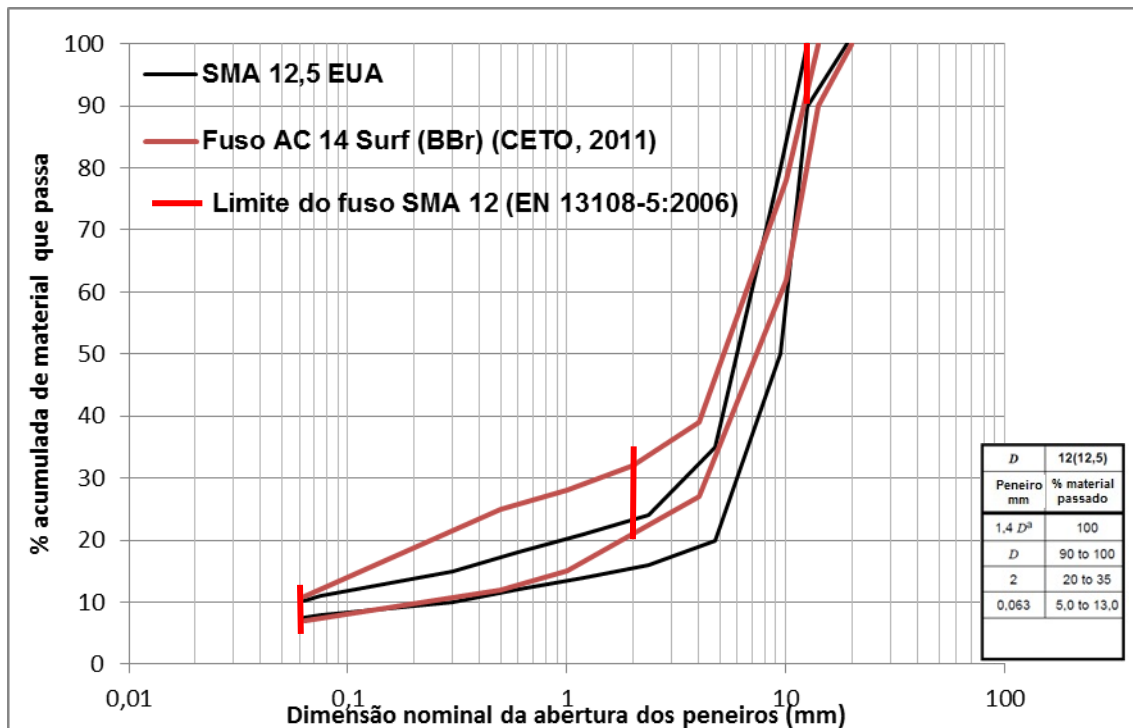


Figura 2.14 – Compara o entre o fuso granulométrico da mistura AC 14 Surf (BBr) previsto no CETO (2011) e o fuso granulométrico do SMA 12,5 utilizado nos EUA

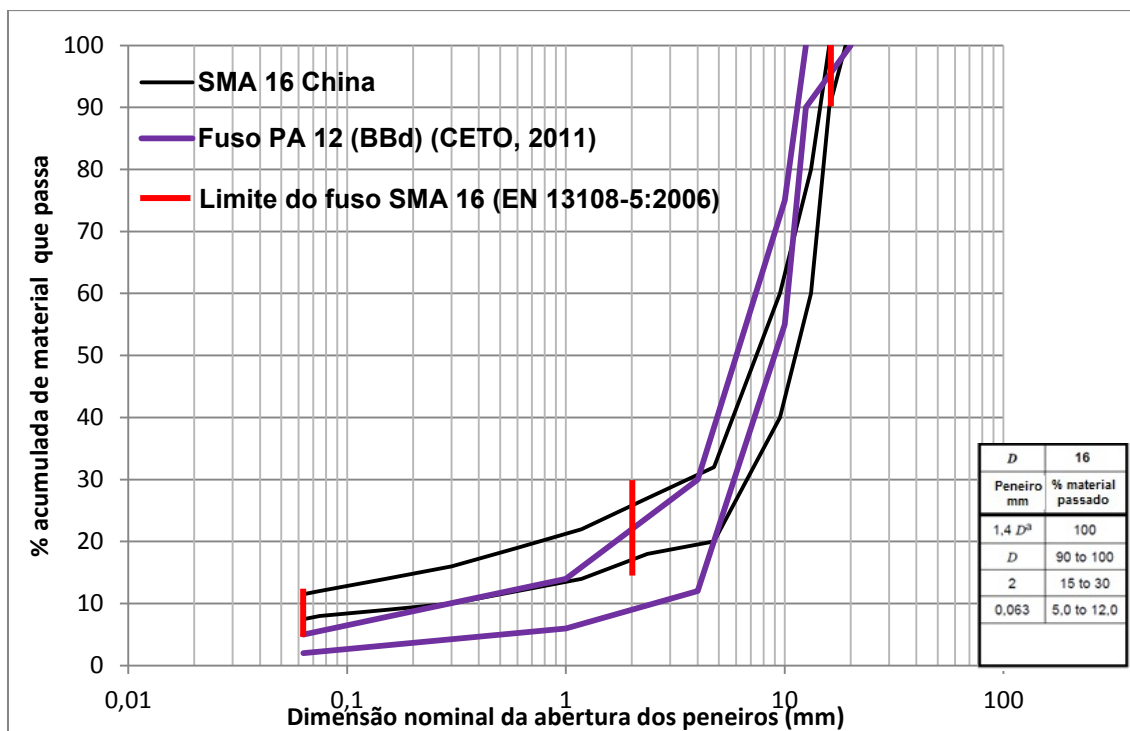


Figura 2.15 – Compara o entre o fuso granulométrico da mistura PA 12 (BBd) previsto no CETO (2011) e o fuso granulométrico do SMA 16 utilizado na China

Tendo em atenção os limites do fuso exigido pela norma EN13108-5:2006 para diferentes tipos de granulometria das misturas *Stone Mastic Asphalt*, nomeadamente SMA 8, SMA 12 e SMA 16, pode verificar-se, nas Figuras 2.13, 2.14 e 2.15, que o fuso granulométrico utilizado na Alemanha para o SMA 0/8S e o fuso utilizado na China para o SMA 16, enquadram-se nas exigências da norma europeia. No entanto, o fuso utilizado nos Estados Unidos da América (EUA), para uma mistura SMA12,5 necessita de ajustes para cumprir os requisitos da norma, nomeadamente no limite inferior do fuso, uma vez que apresenta menor fracção de agregados finos. De facto, o fuso granulométrico da mistura SMA 12 (EUA), sendo mais aberto, parece assemelhar-se ao fuso de uma mistura drenante.

Por outro lado, numa análise comparativa dos fusos granulométricos previstos no CETO (2011), para algumas misturas betuminosas de aplicação em camada de desgaste, com os fusos granulométricos apresentados nas Figuras 2.13, 2.14 e 2.15 permite observar o seguinte:

- No primeiro caso, verifica-se que a granulometria das misturas AC 10 Surf (mBBr) quase que se “encaixa” no fuso definido para o SMA 0/8S na Alemanha, sendo apenas necessário alguns “ajustes” na fracção mais grossa dos agregados;
- No segundo caso, observa-se que a curva granulometria da mistura AC 14 Surf (BBr) é mais fechada, não se ajustando ao fuso do SMA 12 (12,5) definido nos EUA, nomeadamente na fracção intermédia dos agregados;
- No último caso, verifica-se que a curva granulométrica da mistura PA 12 (BBd) é aberta (característica geral de misturas drenantes), não se ajustando ao fuso da mistura SMA 16 utilizado na China.

No entanto, salienta-se a proximidade dos fusos granulométricos das misturas contempladas no CETO (2011), concretamente as misturas AC 10 Surf (mBBr), AC 14 Surf (BBr) com os fusos granulométricos previstos na norma EN 13108-5:2006 para as misturas SMA 8, SMA 12, respectivamente.

▪ **Resistência mecânica**

Durante a fase de constru o o agregado está sujeito a fortes solicita es, devido às temperaturas elevadas e ac es mecânicas no fabrico e aplica o das misturas. Depois de entrar ao serviço continua a ser bastante solicitado, principalmente, pela ac o do tráfego. Devido a estas considera es torna-se necessário avaliar a resistência   fragmenta o dos agregados.

De uma forma geral, em Portugal, a resistência   fragmenta o dos agregados, nomeadamente do agregado grosso,   avaliada através do ensaio de Los Angeles, segundo a norma NP EN 1097-2:2002.

Uma boa resistência   fragmenta o consiste na utiliza o de materiais duros, resistentes ao choque e ao atrito, entre as suas próprias partículas e ao desgaste produzido pelo tráfego na superfície do pavimento (Branco et al., 2006).

Conforme referido anteriormente, a mistura betuminosa estudada neste trabalho  , basicamente, utilizada em camada de desgaste sendo necessário avaliar, também, a resistência ao desgaste por atrito dos agregados. Esta avalia o   realizada através do ensaio de micro-Deval, de acordo com a norma NP EN 1091-1:2011.

▪ **Forma e Limpeza**

A selec o incorrecta dos agregados quanto   sua forma geométrica poderá originar a sua fragmenta o. A forma das partículas de agregado deverá ser aproximadamente cúbica, não sendo aconselhável a utiliza o de partículas lamelares ou alongadas, que são mais frágeis.

Actualmente, os ensaios mais utilizados para avaliar a forma do agregado são o  ndice de forma e o  ndice de achatamento.

Em relação à limpeza, esta representa um factor importante na avaliação da sensibilidade à água uma vez que se o agregado possuir argila, matéria orgânica, ou outras substâncias não desejadas, pode reduzir o atrito entre os grãos, haver variações volumétricas pela presença de água ou dificultar o envolvimento pelo betume. Regularmente, são utilizados ensaios de equivalente de areia e de azul-de-metileno para determinar a limpeza do agregado.

Tratando-se de misturas essencialmente com características de desgaste, a textura dos agregados é, também, uma característica importante, sendo que esta representa um papel relevante no atrito resultante do contacto pneu-pavimento.

2.4.2.2 Betume

A palavra "asfalto" (termo utilizado frequentemente para definir betume asfáltico noutros países) teve origem do antigo acádico "*asphaltu*" ou "*sphallo*" que significa espalhar. Posteriormente, devido à sua utilização como material aglutinante, passou a significar firme, estável, seguro. Ao longo do tempo, tem sido usado para colar, revestir e impermeabilizar (IME, 2011).

O betume asfáltico é o ligante mais usado em trabalhos de pavimentação rodoviária. O betume é um aglutinante de cor castanha ou preta, obtido a partir da destilação do petróleo bruto (Figura 2.16), formado por uma mistura complexa de hidrocarbonetos e apresentando boas qualidades adesivas.

Este produto tem grande interesse no domínio da engenharia, porque é um ligante forte, prontamente aderente, altamente impermeabilizante, com grande durabilidade e que confere flexibilidade às misturas fabricadas com agregado mineral ou com misturas recicladas.

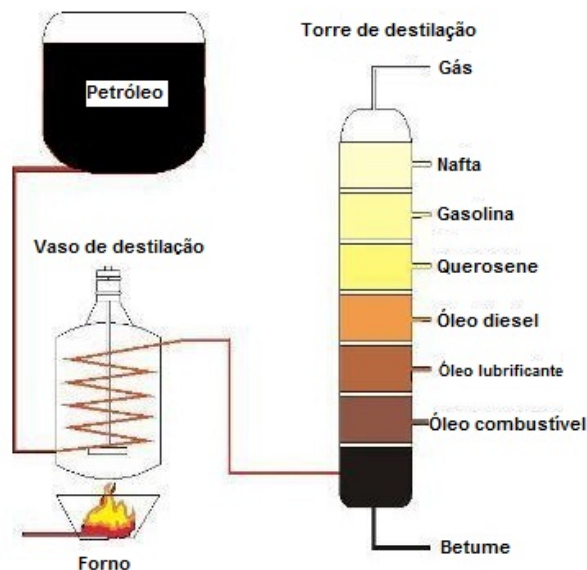


Figura 2.16 – Esquemata do processo de obten o do betume (adaptado de IME, 2011)

A sua composi o química   muito complexa, variando com a origem do petróleo bruto e com o tratamento exercido durante a sua produ o. No entanto, podem-se identificar dois grupos químicos principais: os asfaltenos e os maltenos. De uma forma geral, os asfaltenos são responsáveis pela rigidez do betume e os maltenos pela viscosidade. Em termos de percentagem os asfaltenos representam, usualmente, cerca de 5 a 25 % da composi o do betume, enquanto que os maltenos apresentam percentagens iguais ou superiores a 75 % da sua composi o.

Os betumes devem apresentar características que cumpram os critérios estabelecidos nas especifica es aplicáveis, como o Caderno de Encargos Tipo de Obra da EP. Assim, de acordo com o documento referido o betume deve apresentar os requisitos e propriedades indicadas no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Requisitos/propriedades do betume (CETO, 2011)

Requisitos	Propriedades
Consistência a temperatura de serviço intermédia	Penetração a 25 °C
Consistência a temperatura de serviço elevada	Temperatura de amolecimento
Durabilidade, resistência ao envelhecimento (RTFOT) a 163 °C	Variação da massa máxima Penetração retida a 25 °C Aumento da temperatura de amolecimento
Outros requisitos	Viscosidade Cinemática (135 °C) Ponto de fragilidade de Fraass Ponto de inflamação Teor em parafinas Solubilidade

As duas primeiras propriedades referidas no Quadro 2.5 (penetração e temperatura de amolecimento), estão entre as mais importantes na caracterização de um betume (Branco *et al*, 2006), relacionando-se com a sua consistência.

A nível Europeu o ensaio de penetração realiza-se de acordo com a norma EN 1426:2007 e define, de uma maneira geral, a designação atribuída ao tipo de betume. Por exemplo, para um betume 35/50, o valor 35 representa o valor mínimo de penetração (35×10^{-1} mm) e o valor 50 o valor máximo de penetração (50×10^{-1} mm), no ensaio feito nas condições normalizadas (temperatura de 25° C, agulha de penetração com 100g de massa e 25 s de penetração da agulha). Em Portugal, os betumes de pavimentação mais utilizados no fabrico de misturas betuminosas convencionais são os do tipo 35/50 e o 50/70 (INIR, 2011).

A determinação da temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola é efectuada segundo a norma EN 1427:2007 e consiste em colocar uma esfera de aço, de peso especificado, sobre uma amostra de betume contida num anel de

latão. Este conjunto por sua vez   colocado sobre um vaso de vidro com água (com 2,5 centímetros de altura) que vai sendo aquecido   razão de 5  C por minuto. Com o aumento da temperatura o betume vai amolecendo, e a esfera vai deformando a amostra, provocado o escoamento do provete através do anel. No instante em que o betume e a esfera tocam na base do suporte met lico (depois de percorrer 2, 5 centímetros), regista-se a temperatura da  gua.

Outra da propriedade relevante do betume   a sua viscosidade, sendo que esta quantifica a consistência do ligante em fun o da varia o da temperatura, permitindo avaliar o intervalo de temperatura em que   possível trabalhar o ligante em boas condi es. A viscosidade dinâmica pode ser determinada através do procedimento descrito na norma EN 13302:2010, para várias temperaturas, e a viscosidade cinemática a 135  C   determinada de acordo com a norma EN 12595:2007. No caso particular de Portugal, o CETO (2011) define valores mínimos para a viscosidade cinemática a 135  C, para os betumes de paviment o 25/50 e 50/70, de 370 mm²/s e 296 mm²/s, respectivamente.

Conforme referido anteriormente, um dos constituintes do betume são os maltenos. A exposi o destes aos agentes climatéricos resulta na perda das suas características de viscosidade, através de processos de volatiliza o e oxida o, submissão a radia o solar e temperatura, contribuindo gravemente para o envelhecimento do betume. Dos processos referidos, a oxida o assume um papel de maior relevância devido ao volume de vazios existentes nas misturas.

No caso das misturas do tipo SMA, a maior percentagem de betume, face às misturas tradicionais, contribui para um melhor preenchimento dos vazios da mistura de agregados, reduzindo o efeito de oxida o da mistura, assegurando uma maior durabilidade e maior vida   fadiga do pavimento. No entanto,   pertinente avaliar a influência do envelhecimento do betume no desempenho das misturas betuminosas do tipo SMA.

De acordo com o exposto, um factor importante no desempenho das misturas betuminosas   o envelhecimento do betume. Este influencia significativamente o

comportamento do betume, aumentando a sua rigidez e viscosidade, e reduzindo a ductilidade e adesividade entre o betume e o agregado (Pellinen *et al.*, 2008). Associado a este fenómeno, a flexibilidade da mistura diminui, tornando-se mais resistente às deformações, mas mais passível de fendilhamento.

A Figura 2.17, representa a curva do envelhecimento do betume desde do início da sua utilização e ao longo do tempo de serviço.

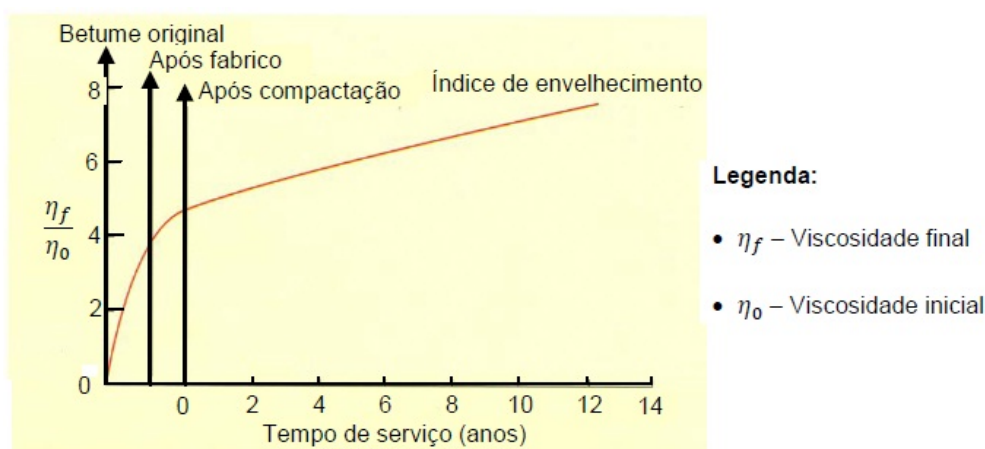


Figura 2.17 – Variação do envelhecimento do betume ao longo do tempo (adaptado de Shell, 2003)

Efectuada uma breve análise à figura, conclui-se facilmente que o betume sofre grande parte do seu envelhecimento durante os processos de fabrico, transporte e compactação. O processo de envelhecimento prossegue após conclusão dos trabalhos de aplicação da mistura betuminosa, essencialmente devido as acções climáticas (radiação solar e consequente temperatura).

Atendendo à necessidade de optimização das misturas betuminosas, conferindo melhores propriedades de resposta às solicitações do pavimento, é frequente recorrer-se à utilização de betumes modificados no fabrico de misturas betuminosas. Estes betumes conferem às misturas betuminosas uma maior resposta às acções do tráfego, maior resistência ao envelhecimento durante a utilização, aumento da eficácia na drenagem superficial e redução do ruído provocado pelo rolamento (Branco *et al.*, 2006).

Os betumes modificados são fundamentalmente uma mistura de betume com aditivos, entre os quais os mais utilizados são (Shell, 1990):

- Elastómeros, tipo SBS (estireno-butadieno-estireno);
- Plastómeros, tipo EVA (etileno-acetato de vinilo);
- Enxofre;
- Fibras orgânicas ou inorgânicas;
- Resinas e endurecedores.

Actualmente em Portugal, é também utilizada borracha de pneus reciclados.

Em Portugal, um dos tipos de betumes modificados mais utilizados é aquele em que o aditivo é um elastómetro, sendo regularmente aplicado no fabrico de misturas betuminosas porosas destinadas à camada de desgaste (Branco *et al.*, 2006).

O betume modificado deve apresentar o aditivo e o betume “entrelaçados” entre si, formando duas fases contínuas. Caso a mistura seja realizada de forma inadequada, ou exista incompatibilidade química entre o aditivo e o betume, podem formar-se duas fases distintas, uma com predominância de betume e outra com predominância de aditivo. Em ambas as situações, as características do betume não serão as mais indicadas para a sua utilização (Mourão, 2003).

Como referido anteriormente, um dos betumes modificado mais utilizado no fabrico de misturas betuminosas flexíveis é o betume com adição de elastómetro SBS. Esta solução permite um aumento do ponto de amolecimento anel e bola do betume e uma redução da penetração a 25 °C, favorecendo a flexibilidade e ductilidade a baixas temperaturas, uma vez que estamos perante um betume mais flexível. Numa mistura betuminosa com a adição de polímero SBS, uma das principais funções do aditivo é aumentar sua resistência à deformação permanente (Branco *et al.*, 2006). Além disso, a utilização deste aditivo irá permitir obter um novo padrão na viscosidade do ligante em função da variação da

temperatura, obtendo-se maior viscosidade (Mourão, 2003), contribuindo para uma maior adesividade, durante o processo de fabrico, e melhor compactação da mistura betuminosa (Miranda, 2008).

Nas misturas betuminosas do tipo SMA são utilizados como ligante o betume asfáltico (betumes de pavimentação, de acordo com a terminologia das normas europeias) e o betume modificado. A utilização de betume modificado apresenta 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.

2.4.2.3 Fibras

As fibras são utilizadas como aditivo estabilizador para evitar o escorrimento de parte da mistura (rica em betume de pavimentação ou modificado e agregado grosso) quer durante o processo de fabrico, transporte e aplicação da mistura SMA, quer durante a sua vida útil em serviço. Se não forem adicionadas fibras, ou se forem adicionadas em doses inadequadas, provavelmente irão ser observados pontos de exsudação e de segregação no pavimento (Vale *et al*, 2006).

A Figura 2.18 demonstra o aspecto geral de uma mistura do tipo SMA sem a adição de fibras, sendo possível verificar o escorrimento do ligante betuminoso.



Figura 2.18 – Mistura betuminosa sem adição de fibras (Betunel, 2008; Lanchas, 2011)

Tal como será referido no Capítulo 3, a norma europeia EN 12697-18:2006 estabelece dois métodos de ensaio para avalia o do escorrimento do ligante de uma mistura betuminosa: o método do cesto e o método de *Schellenberg*.

Em termos de proveniência, as fibras podem ser de origem orgânica, inorgânica ou material mineral, sendo as mais utilizadas as de origem orgânica, nomeadamente as fibras de celulose. As fibras são quimicamente inertes, de forma que não provocam reac es no ligante (Vale *et al*, 2006).

Considera-se que, geralmente, as fibras não têm influencia sobre o desempenho da mistura depois da compacta o, embora possibilitem um maior conteúdo em ligante, o que gera uma película mais espessa em torno do agregado, retardando a oxida o e a separa o dos agregados. Estas vantagens servem para aumentar a resistência ao desgaste da mistura betuminosa (Bernucci *et al*, 2008). No entanto, para um correcto desempenho da mistura   muito importante o tipo de aditivo seleccionado.

Num estudo realizado por Brown *et al.* (1997a), para avaliar o efeito do tipo de estabilizador seleccionado (Figura 2.19), foram submetidas a um ensaio de escorrimento cinco misturas equivalentes (excepto no tipo de estabilizador utilizado).

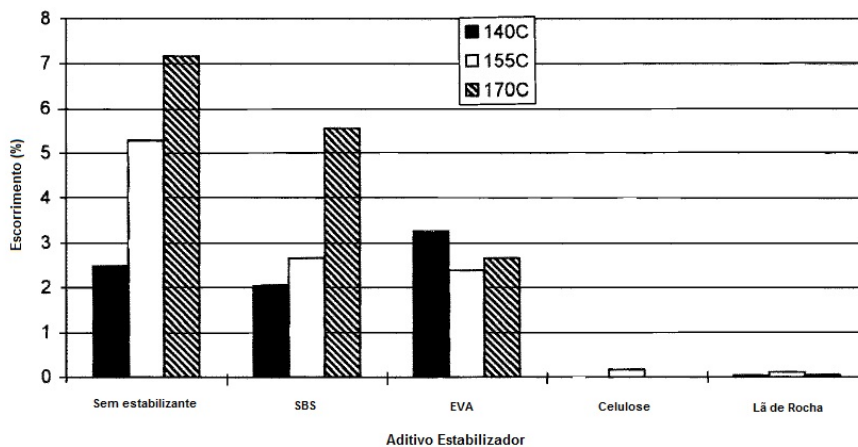


Figura 2.19 – Compara o do escorrimento em diversos tipos de aditivo estabilizador (Brown *et al.*, 1997a)

A Figura 2.19 mostra os resultados do ensaio de escorrimento a temperaturas diferentes, sendo visível que as fibras de celulose, a par da lã de rocha, apresentam o melhor comportamento como estabilizador das misturas betuminosas. Denote-se ainda que as fibras apresentam resultados mais satisfatórios do que os polímeros.

▪ Fibras de celulose

A fibra de celulose tem a vantagem de ser mais económica, visto ser obtida com grande facilidade e de uma fonte renovável.

A celulose é obtida industrialmente da madeira das árvores e está presente no nosso dia-a-dia em objectos como livros, caixas de cartão, produtos farmacêuticos e alimentares, misturas betuminosas, *etc.*. Essas fibras podem ser em forma de granulado (*pellet*), onde parte deste é composto por fibra e parte por betume, ou separadas do betume. As fibras quando não estão impregnadas com ligante não se conseguem dispersar adequadamente na mistura, devido às mesmas serem fortemente unidas, formando grânulos durante o processo de mistura, aumentando o tempo de mistura. Quando estão impregnadas com ligante apresentam as seguintes vantagens (Mourão, 2003):

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

Embora sejam definidas características físicas para as fibras, verifica-se que a sua dimensão pode condicionar a trabalhabilidade e homogeneidade da mistura. Na Figura 2.20, verifica-se a diferença entre as fibras impregnadas com betume (figura à direita) e as fibras que não contém betume (figura à esquerda), sendo perceptível a forte ligação entre estas últimas, o que vai dificultar o seu

revestimento com betume durante o processo de fabrico, contribu  do para a heterogeneidade da mistura.

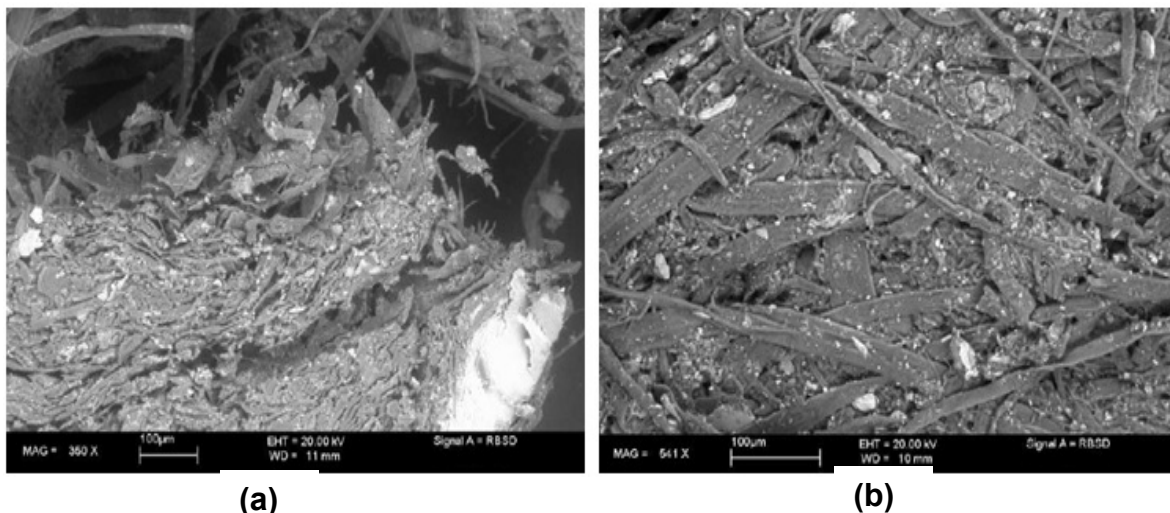


Figura 2.20 – (a) Fibras de celulose; (b) Fibras de celulose impregnadas com betume (Lanchas, 2011)

Segundo Bernucci *et al.* (2008), a determinação do teor de fibras de celulose na mistura betuminosa baseia-se principalmente na experi  ncia, encontrando-se v arias publicações que sugerem os valores de 0,3% a 0,5%. Contudo, existem ensaios para verificar se as fibras são suficientes para inibir o escorrimento do ligante, como os utilizados, por exemplo, na Holanda e na Alemanha (*Schellenbergtest*, que est a contemplado na norma EN 12697-18:2006) e nos EUA (AASHTO T-305/97 – *Draindown Sensitivity*) (Bernucci *et al.*, 2008).   imprescindível o desenvolvimento destes testes, porque a dosagem do teor de fibras tem como objectivo a redução dos custos da produção da mistura, otimizando uma quantidade mínima para impedir o escorrimento.

▪ **Fibras de celulose com ceras**

A incorporação, em misturas betuminosas com elevado conteúdo de betume, de fibras de celulose com ceras, assenta num duplo objectivo:

- por um lado, garantir a estabilidade da mistura e a inexistência de escorrimento do ligante, o que de acordo com o referido anteriormente é conseguido com a adição de fibras de celulose;
- por outro lado, influenciar a viscosidade do ligante, através da adição das ceras.

Na Figura 2.21 apresenta-se um diagrama simplificado da composição deste tipo de fibras, nomeadamente, a junção de fibras de celulose virgens com ceras especiais sob forma de granulado (*pellets*).

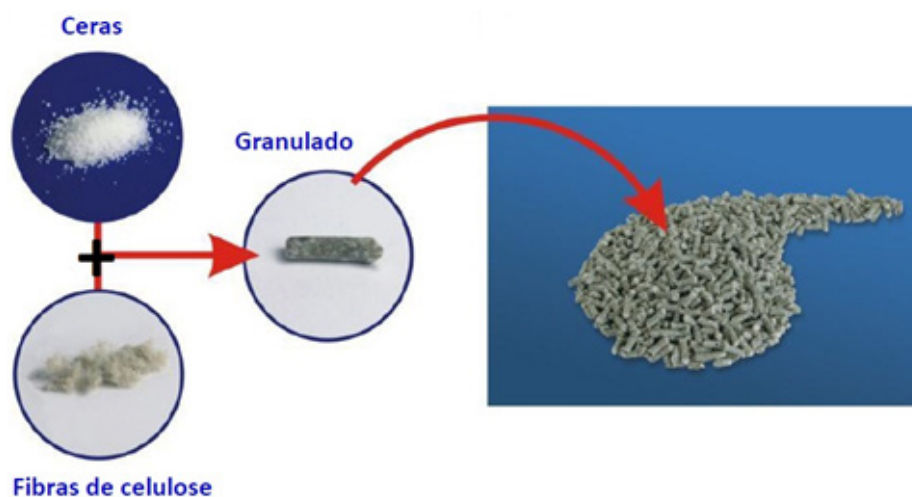


Figura 2.21 – Fibras de celulose com adição de ceras (Lanchas, 2011)

A integração das ceras na mistura betuminosa altera a tecnologia de fabrico da mistura. Ao contrário das misturas apenas com a adição de fibras de celulose consideradas “misturas betuminosas fabricadas a quente” designadas na terminologia inglesa por “*Hot Mix Asphalt*” (HMA), quando existe a incorporação de ceras, as misturas assim fabricadas serão do tipo “misturas betuminosas temperadas”, designadas por “*Warm Mix Asphalt*” (WMA). Para além destas últimas, existem, também, as “misturas betuminosas semi-temperadas” e as “misturas betuminosas fabricada a frio”, designadas, respectivamente, “*Half-Warm Mix Asphalt*” e “*Cold Mix Asphalt*”. Assim, considerando a incorporação de fibras e ceras na mistura SMA, ter-se-á uma mistura do tipo SMA temperada.

Misturas Betuminosas Temperadas (*Warm Mix Asphalt*)

As ceras utilizadas são um aditivo orgânico, sendo as mais conhecidas as ceras comercializados com o nome Sasobit[®] e Asphaltan B[®]. As mais utilizadas são as ceras Sasobit[®] que   um produto Fischer-Tropsch (F-T) ou cera sint tica produzida pelo aquecimento de carvão ou gás natural com vapor de água, na presença de um catalisador (Sasol, 2008 citado por Ferreira, 2009).

A utiliza o deste tipo de produto potência a diminui o da viscosidade do ligante   temperatura de pavimenta o, contribuindo para uma redu o da temperatura de fabrico e compacta o da mistura na ordem dos 10 a 30  C (Farrar, 2008; Ferreira, 2009).

Na Figura 2.22, ilustra-se a temperatura de fabrico e compacta o em fun o da tecnologia de fabrico da mistura betuminosa (temperatura de fabrico e compacta o).

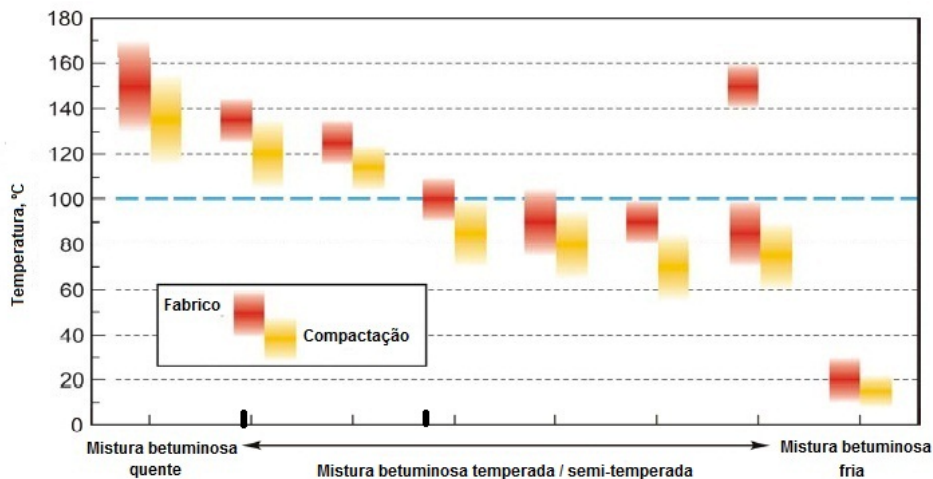


Figura 2.22 – Varia o da temperatura em fun o da tecnologia de fabrico (Farrar, 2008)

Analisando a Figura 2.22, verifica-se que para as misturas betuminosas temperadas e semi-temperadas são necessárias temperaturas de fabrico inferiores, em compara o com a temperatura necessária para obter-se uma mistura betuminosa fabricada a quente.

Com a redução da temperatura de fabrico, recorrendo a misturas betuminosas temperadas, consegue-se a redução das emissões gasosas para a atmosfera, benéfica para a saúde do trabalhador, a para pessoas situadas em áreas vizinhas de produção e em locais de pavimentação. Esta redução depende principalmente da taxa de redução de temperatura, resultante na diminuição dos gases de efeito estufa (CO_2 , N_2O e CH_4), que são reduzidos na mesma proporção do ganho de energia, como é ilustrado na Figura 2.26 (Zaumanis, 2010).

A Figura 2.23 representa, esquematicamente, uma relação entre o combustível necessário para o fabrico de misturas betuminosas (semi-temperadas, temperadas e a quente) e a emissão de dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera.

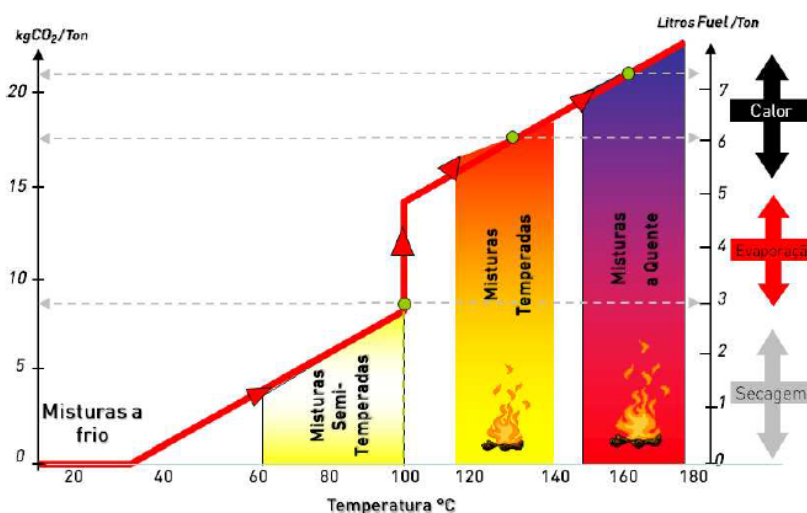


Figura 2.23 – Redução de combustível (*fuel*) para diferentes tecnologias de mistura (adaptado de Zaumanis, 2010)

Da análise da Figura 2.23, conclui-se que para o fabrico de misturas betuminosas temperadas e semi-temperadas, são necessários menos litros de combustível, traduzindo-se nas reduções do consumo de recursos naturais e das emissões poluentes para a atmosfera.

A adição de ceras influencia, directamente, a viscosidade do ligante durante o processo de fabrico (temperaturas entre os 140 e 100 °C) e durante o tempo de serviço (temperaturas entre 25 e 100 °C) (Farrar, 2008; Zaumanis, 2010).

Em rigor, para temperaturas próximas do ponto de amolecimento o ligante modificado tem um incremento substancial do seu módulo e viscosidade dinâmica (Ferreira, 2009).

Na Figura 2.24 representa-se esquematicamente a influencia da temperatura na viscosidade de um betume de pavimenta o convencional e de um betume com ceras.

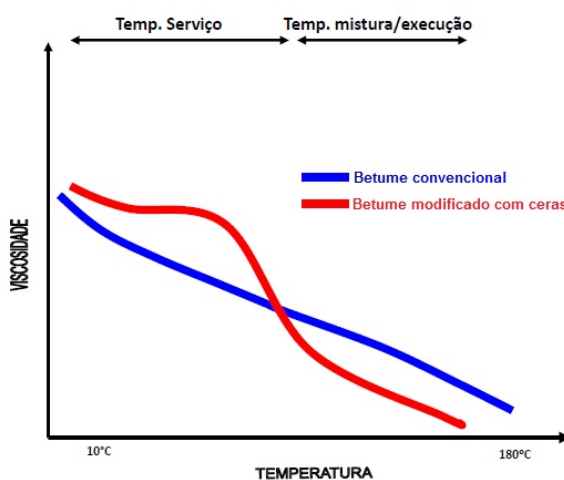


Figura 2.24 - Varia o da viscosidade do betume em fun o da temperatura (Zaumanis, 2010)

Analisando a curva da viscosidade do ligante betuminoso (betume com ceras), essencialmente, utilizado no fabrico de misturas temperadas, verifica-se que para temperaturas relativamente elevadas a viscosidade da mistura, conferida pelo ligante,   mais baixa do que nos tradicionais, o que resulta na melhoria da adesividade do ligante, contribuindo para a homogeneidade da mistura.

Para além do referido, a utiliza o de ceras nas misturas do tipo SMA vem permitir o armazenamento das mesmas, por algumas horas, conservando características de trabalhabilidade, permitindo o espalhamento e compacta o a temperaturas mais baixas (Lanchas, 2011). Esta característica   bastante importante em obras com prazos de execu o reduzidos e grandes quantidades de misturas betuminosas a aplicar, nomeadamente em aeroportos.

Assim este tipo de solução apresenta as seguintes vantagens (Lanchas, 2011):

- Aumento da plasticidade da mistura e melhoria da compactação;
- Melhoria da trabalhabilidade a temperaturas baixas (vantajoso para o transporte a grandes distâncias);
- Redução de emissões poluentes durante o processo de fabrico;
- Possibilidade de abertura mais rápida ao trânsito.

▪ **Fibras Têxteis**

Um dos tipos de fibras têxteis comercializado em Portugal para aplicação em misturas betuminosas denominam-se *Asphalt +*, sendo um produto comercializado pela Fisipe. Estas fibras assumem um efeito ligante na mistura através da formação de uma rede coesiva tridimensional, que melhora as propriedades mecânicas e durabilidade dos pavimentos (Fisipe, 2011).

As fibras acima referidas permitem uma temperatura de exposição até 220 °C (para curta duração) e são aconselhadas em proporções de dosagem na ordem dos 0,10 a 0,15% para aplicação em camadas drenantes e dos 0,15 a 0,30% para outras aplicações.

Verifica-se que as misturas SMA com a adição de fibras de acrílico (na proporção de 0,3% do peso total da misturas) destinadas a camada de desgaste no pavimento, apresentam elevada resistência ao fendilhamento e à deformação permanente, permitindo ainda uma redução de 70% na espessura da camada face ao betão betuminoso convencional (Silva, 2010).

▪ **Fibras de Carbono**

As fibras de carbono também são passíveis de utilização em misturas betuminosas do tipo SMA. Tal como referido para os outros tipos de fibras, as fibras de carbono conferem ao pavimento uma melhor resistência ao fendilhamento e deformação permanente com origem em camadas betuminosas.

Num estudo efectuado por Jahromi (2008), conclui-se que uma percentagem de 0,4% de fibras de carbono (em fun o da massa da mistura) origina um melhor desempenho da mistura em termos de rigidez, resistência   deforma o permanente e   fadiga. No entanto, verifica-se que a dimensão das fibras (comprimento) penaliza a sua distribui o uniforme durante o processo de fabrico, comprometendo seriamente o desempenho funcional da mistura.

▪ **Fibras de Vidro**

O recurso   utiliza o de fibras de vidro nas misturas betuminosas apresenta resultados satisfatórios ao nível da resistência   fadiga e   deforma o permanente. Considera-se uma soluço viável e com resultados laboratoriais consistentes ao nível da resistência estrutural, face às cargas transmitidas pelo tráfego para o pavimento. No entanto, as fibras de vidro alteram as propriedades da mistura betuminosa, podendo eventualmente diminuir a estabilidade e aumentar o volume de vazios (Karim *et al.*, 2010).

De acordo com PANK (1995), recomenda-se percentagens de 0,40% a 0,60% de fibras de vidro para obten o de resultados satisfatórios do escoamento do ligante na mistura. No entanto, num estudo efectuado por Karim *et al.* (2010), com um teor óptimo de ligante e 0,2% de fibras de vidro consegue-se uma mistura de elevado desempenho em termos de rigidez, resistência   deforma o permanente e resistência   fadiga.

▪ **Fibras de Coco**

Existem vários estudos no Brasil acerca da utiliza o de fibras de coco (orgânicas) como aditivo estabilizador nas misturas betuminosas. Devido   abundância desta m teria-prima em determinadas regiões, a sua utiliza o poderá permitir uma diminui o do custo de produ o. Num estudo efectuado por Vale (2007) referente   aplicabilidade das fibras de coco em misturas do tipo SMA, onde foram utilizadas percentagens de fibra de coco na ordem dos 0,50% a 0,70%, verificou-se que o desempenho destas fibras, a nível do escoamento do ligante, apresenta valores

equivalentes ao desempenho das fibras de celulose. Denote-se que no estudo referido, as fibras de coco são bastante penalizadas no campo da trabalhabilidade devido ao comprimento que estas apresentam.

▪ **Processo de dosagem**

A dosagem das fibras durante o processo de fabrico da mistura pode ser manual ou automática. Na dosagem manual as fibras são fornecidas em sacos pré-pesados e adicionadas manualmente na torre de mistura. Na dosagem automática as fibras são fornecidas a granel e depositadas em mecanismos de dosagem gravimétrica. Estes mecanismos são controlados por comandos que efectuem pesagens automáticas, depositando as doses de fibras no interior da torre de mistura. A Figura 2.25 representa um esquema do processo de fabrico de uma mistura betuminosa com a adição de fibras recorrendo a um mecanismo de dosagem automática, numa central descontinua.

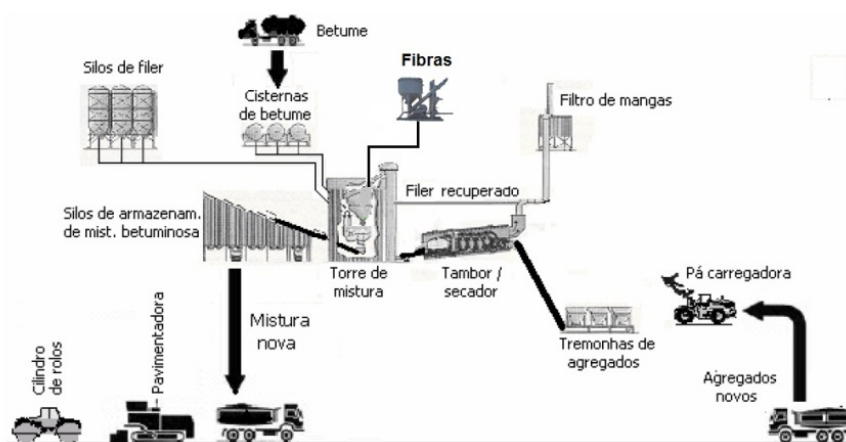


Figura 2.25 – Processo de fabrico da mistura betuminosa com a adição de fibras (adaptado de Branco *et al*, 2006)

2.4.3 Desempenho das Misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt*

Um pavimento rodoviário efectuado com recurso a uma mistura betuminosa tipo SMA bem formulada e fabricada, cumprindo correctamente os procedimentos de construção e aplicação “*in situ*”, apresenta as seguintes características (NAPA, 2002; Drüschner e Schäfer, 2000):

- Elevada resistência ao desgaste;
- Boa resistência   deforma o permanente;
- Elevada resistência ao fendilhamento causado pelas agressões do tráfego;
- Boa aderência no contacto pneu-pavimento;
- Redu o do efeito “spray” e fen meno da hidroplanagem;
- Redu o do nível do ruído.

Dado tratar-se de uma mistura composta por elevada percentagem de agregados grossos, estes irão originar uma macrotextura na superfície da camada de desgaste (Figura 2.26).



Figura 2.26 – Macrotextura do SMA (Betunel, 2008)

A macrotextura existente na camada de desgaste proporciona um rápido escoamento das águas pluviais, reduzindo o efeito de hidroplanagem e aumentando a segurança para os utilizadores.

Existem também alguns estudos referindo os benefícios da utiliza o da mistura betuminosa SMA a nível da redu o do ruído. De acordo com NAPA (2002), a utiliza o destas misturas reduz, consideravelmente, a emissão do ruído proveniente do rolamento dos pneus. Num estudo efectuado em Itália, foi comparada uma mistura betuminosa do tipo SMA com uma mistura betuminosa tradicional. Apurou-se que, com características semelhantes de composi o de agregados, a redu o do ruído foi na ordem dos 7,0 dB (Mourão, 2003).

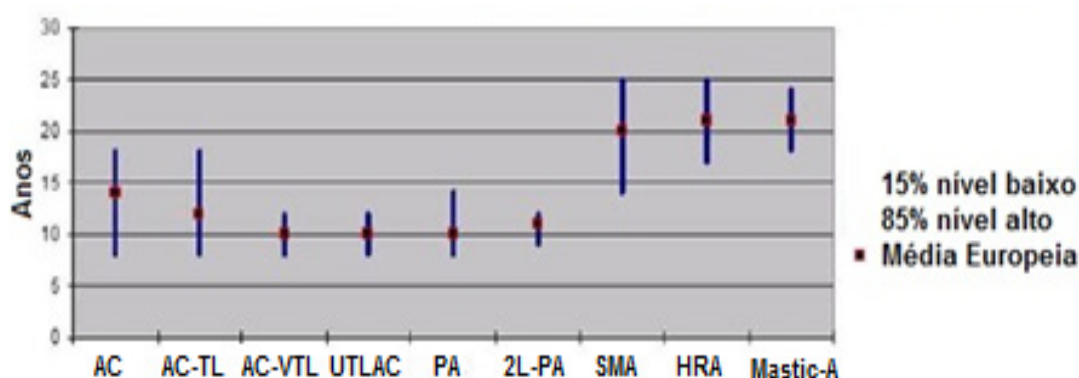
As misturas betuminosas de alto desempenho com a adição de fibras são geralmente utilizadas nas seguintes circunstâncias:

- Vias com elevado tráfego de pesados;
- Zonas de intersecções e cruzamentos;
- Aeroportos;
- Autódromos;
- Zonas com elevada afluência de veículos pesados (zonas de carga e descarga).

Em Portugal a utilização deste tipo de mistura ainda não é frequente, possivelmente, por ainda constituir uma técnica inovadora (não sendo, por exemplo, uma mistura contemplada no CETO (2011)), bem como devido ao seu custo inicial de construção. No entanto, podem encontrar-se pavimentos rodoviários com utilização de misturas do tipo SMA com fibras nos seguintes locais:

- Avenida do Brasil, Lisboa;
- Autódromo do Algarve, Portimão.

A Figura 2.27 representa os resultados de um estudo efectuado pela EAPA (2007), onde foram analisadas as durabilidades de vários tipos de misturas betuminosas utilizadas em camada de desgaste.



Legenda: AC (Asphalt Concrete) – Betão betuminoso; AC-TL (Asphalt Concrete Thin Layer) – Betão betuminoso (camada fina); AC-VTL (Asphalt Concrete Very Thin Layer); UTLAC (Ultra-Thin Layer Asphalt Concrete); PA (Porous Asphalt) – Betão betuminoso drenante; 2L-PA (Two Layer's Porous Asphalt) – Betão betuminoso drenante (duas camadas); SMA (Stone Mastic Asphalt); HRA (Hot Rolled Asphalt); Mastic-A (Mastic Asphalt) – Mastique betuminoso

Figura 2.27 – Durabilidade da camada de desgaste, considerando estradas principais, auto-estradas e estradas de tráfego intenso (EAPA, 2007)

Analisando a Figura 2.27 e considerando as boas práticas de execu o de pavimentos rodoviários, verifica-se que as misturas do tipo SMA estão na gama de misturas com maior durabilidade, a par das misturas “Hot Rolled Asphalt” e de m stiques betuminosos. Em rela o   mistura drenante (PA), e mesmo às misturas convencionais (AC) verifica-se, igualmente que o tempo de serviço de uma camada de desgaste constituída por SMA   superior, reduzindo o número de interven es de manuten o.

O aumento da durabilidade dos pavimentos com misturas betuminosas tipo SMA, resulta na redu o do número de interven es durante o seu ciclo de vida, reflectindo-se numa redu o de custo para os seguintes intervenientes:

- concessionária - diminui o de custo de conserva o/reabilita o;
- utentes - diminui o das interrup es na via, provocando menos paragens, maiores velocidades e segurança, assim como maior comodidade;
- sociedade – menos congestionamento e conseqüente diminui o dos atrasos, menor consumo de combustível e emissão de gases poluentes.

Na Figura 2.28 pretende-se representar graficamente a evolu o do estado do pavimento ao longo do tempo e os efeitos resultantes da adop o de medidas de conserva o e/ou reabilita o.

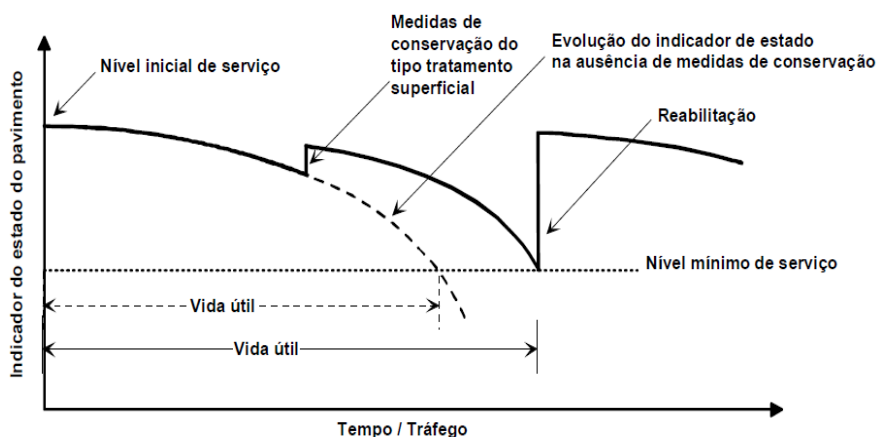


Figura 2.28 – Evolu o do estado do pavimento ao longo do tempo (Batista, 2004)

Observando a Figura 2.27, percebe-se que um pavimento rodoviário tem no início da sua “vida” um determinado “nível de serviço”, traduzido pelas condições de segurança, conforto e economia que proporciona ao utente. No entanto, sob a acção do tráfego e dos agentes atmosféricos, o pavimento vai-se degradando ao longo do tempo, até atingir um estado que já não satisfaz a critérios mínimos de funcionalidade e/ou estruturais (período de vida útil), sendo necessário proceder à sua reabilitação, por forma a restabelecerem-se as desejadas características funcionais e estruturais do pavimento.

Como indicado na Figura 2.27, os pavimentos com recurso a misturas betuminosas SMA apresentam maior durabilidade do que as misturas betuminosas convencionais (AC e PA). Assim, na a Figura 2.28 uma mistura SMA implicaria uma pequena translação da curva em função do aumento da vida útil do pavimento, retardando as intervenções no pavimento, nomeadamente intervenções de reabilitação.

2.5 Considerações finais

Ao longo deste capítulo percepção-se que as misturas do tipo SMA constituem uma solução frequentemente adoptada para pavimentos sujeitos a cargas elevadas provenientes de tráfego pesado e aeroportuário.

Na produção deste tipo de mistura é, geralmente, imprescindível a utilização de aditivos estabilizadores, necessários para controlar a incrementação de betume provocada pelo maior volume de vazios resultantes da elevada percentagem de agregados grossos.

Na grande maioria dos casos, os aditivos utilizados para estabilizar a mistura são fibras, sendo as provenientes de celulose as mais utilizadas. As fibras podem ter diversas origens e têm como principal objectivo garantir a estabilidade e

trabalhabilidade da mistura, mesmo a temperaturas reduzidas, com importante contributo para a inexistência de escorrimento de ligante.

Embora as fibras, geralmente utilizadas, não interfiram quimicamente com a composi o do betume, esclareceu-se, em diversos estudos, que a sua percentagem pode influenciar o desempenho da mistura.

De acordo com o referido em 2.4.2.3, as fibras de celulose são, em grande maioria, as mais utilizadas em todos os países. Tal factor, deve-se não são   maior facilidade de obten o, em geral, deste tipo de fibras, como também   maior experiência com a sua utiliza o como aditivo estabilizador. Por outro lado, às fibras celulos icas são, geralmente, reconhecido um melhor comportamento (Mourão, 2003; Bernucci *et al.*, 2008).

No Quadro 2.6, sintetiza-se algumas características apresentadas pelas misturas betuminosas face   adi o dos diferentes tipos de fibras (PANK, 1995; Lanchas, 2011; Fisipe, 2011; Jahromi, 2008; Vale, 2007).

Quadro 2.6 – Características das misturas betuminosas com a adi o de diferentes tipos de fibras

Tipo de fibra	Processo de mistura (Homogeneidade)	Processo de Espalhamento e compacta�o (Trabalhabilidade)	Rigidez e resistência (Desempenho)	Dosagem aconselhada (%)
Celulose	+ (<i>Granulado</i>) - (naturais)	+	+	0,30 – 0,50
Celulose com ceras	+	+	+	s/r
Têxteis	s/r	s/r	+	0,15 – 0,30
Carbono	-	s/r	+	0,40
Vidro	-	s/r	+	0,40 – 0,60
Coco	-	-	+	0,50 – 0,70

Legenda: (+) Bom; (-) Fraco; (s/r) sem referência

3 Métodos de Caracterização em Laboratório de Misturas Betuminosas com a Utilização de Fibras

3.1 Considerações iniciais

Este capítulo aborda os processos e métodos de ensaio em laboratório para caracterização de misturas betuminosas com a utilização de fibras, concretamente misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA).

Os ensaios de caracterização que devem ser realizados, consoante o tipo de mistura utilizada, são descritos na norma portuguesa NP EN 13108-20:2008. Esta norma especifica o procedimento dos ensaios de tipo a utilizar para efeitos de certificação CE de misturas betuminosas destinadas a estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.

É importante referir que a norma acima mencionada faz parte de uma série de normas de produto, compostas por várias partes, entre elas a norma EN 13108-5:2006 que especifica os requerimentos para misturas do grupo *Stone Mastic Asphalt* destinadas a estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.

Entre os ensaios de tipo requeridos pela norma NP EN 13108-20:2008, realçam-se os ensaios relacionados com o desempenho da mistura, nomeadamente o ensaio de escorrimento do ligante (EN 12697-18:2006), o ensaio de sensibilidade à água (EN 12697-12:2008) e o ensaio de resistência à deformação permanente (EN 12697-22:2006).

Analisando os ensaios acima referidos, verifica-se que os dois últimos são ensaios correntes na caracterização e avaliação do desempenho de misturas betuminosas convencionais. No entanto, o ensaio de escorrimento do ligante é um ensaio específico para misturas betuminosas de granulometria descontínua ou aberta, nomeadamente misturas do tipo SMA e PA (BBd).

No âmbito do presente estudo, efectuaram-se ensaios para determinação do módulo de rigidez, de acordo com a norma EN 12697-26, tal como se descrever  em 3.2.

Para avaliar o desempenho da mistura betuminosa   deformação permanente foram realizados ensaios de compressão triaxial, em conformidade com a norma EN 12697-25:2006, tal como se descreve em 3.3.

Devido a condicionantes de tempo e de materiais não foi possível, no desenvolvimento deste trabalho, realizar ensaios de escorrimento de acordo com a norma EN 12697-18:2006. No entanto, para avaliação do escorrimento, apresentar-se- o, no Capítulo 4, resultados de um estudo levado a cabo no LNEC para uma mistura idêntica   mistura utilizada no presente trabalho. Nesse estudo, teve-se em consideração os requisitos explícitos na norma EN 12697-18:2006 para a realização dos ensaios de escorrimento, os quais serão descritos em 3.4.

3.2 Caracterização do módulo de rigidez e da resistência   fadiga

3.2.1 Generalidades

A caracterização de misturas betuminosas quanto ao módulo de rigidez e   resistência   fadiga  , geralmente, efectuada com base no mesmo tipo de ensaios laboratoriais (Batista, 2004). O módulo de rigidez das misturas betuminosas depende da temperatura a que as mesmas se encontram, da frequência de carregamento, das características dos materiais que as constituem e da sua própria composição (Branco *et al.*, 2006).



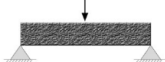
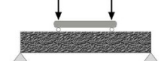

Para a determinação do módulo de rigidez podem realizar-se ensaios com cargas est ticas ou repetidas, sendo as últimas as mais indicadas pela facto de simularem melhor o efeito do tráfego nas misturas betuminosas, instalando nos provetes estados de tensão idênticos aos verificados “*in situ*”, possibilitando ainda a avaliação do comportamento das misturas   fadiga.

Os ensaios utilizados para avaliação das características de rigidez e de resistência são, geralmente, os ensaios de flexão, ensaios de tracção ou compressão (Baptista, 2006).

As normas europeias EN 12697-26:2006 e EN 12697-24:2006, descrevem os principais tipos de ensaios, respectivamente para determinação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga, os quais se encontram resumidos no Quadro 3.1.

Neste estudo não será efectuada a determinação da resistência à fadiga, visto tratar-se de uma mistura do tipo SMA, com maior conteúdo de betume (parâmetro que influencia, preponderante, no comportamento da misturas à fadiga) e não sendo um ensaio requerido na norma para efeitos de certificação CE (NP EN 13108-20:2008). No entanto, para efeitos de caracterização em laboratório é pertinente determinar a resistência à fadiga, para comparação do desempenho da mistura do tipo SMA face às misturas convencionais.

Quadro 3.1 – Principias tipos de ensaio de avaliação do módulo de rigidez (EN 12697-26:2006)

Tipo de Ensaio	Características do provete	Designação do ensaio	Esquema de ensaio
Flexão	Trapezoidal	Flexão (dois pontos)	
	Prismático		
	Prismático	Flexão (três pontos)	
	Prismático	Flexão (quatro pontos)	
Tracção ou compressão	Cilíndrico	Tracção indirecta ou compressão diametral	

Dadas as características dos provetes utilizados no âmbito do presente estudo (provetes cilíndricos), para o seu desenvolvimento apenas será considerado o ensaio de trac o indirecta ou de compressão diametral para determina o do módulo de rigidez da mistura betuminosa em estudo.

3.2.2 Ensaio de trac o indirecta ou compressão diametral

Na Figura 3.1, apresenta-se um dos equipamentos que   frequentemente utilizado na realiza o deste tipo de ensaios, em particular o equipamento *Nothingham Asphalt Tester* (NAT) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Os principais componentes deste equipamento, representados na Figura 3.2, são um sistema de aplica o de cargas com funcionamento pneumático, uma câmara climatizada com controlo de temperatura, uma célula de carga, que efectua a medi o da força aplicada segundo uma das geratrizes do provete cilíndrico, e transdutores de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*), localizados no plano horizontal, perpendicularmente aos eixo da carga. Acoplado ao equipamento referido encontra-se um sistema de interface digital de entrada e saída de dados, ligado a um computador.

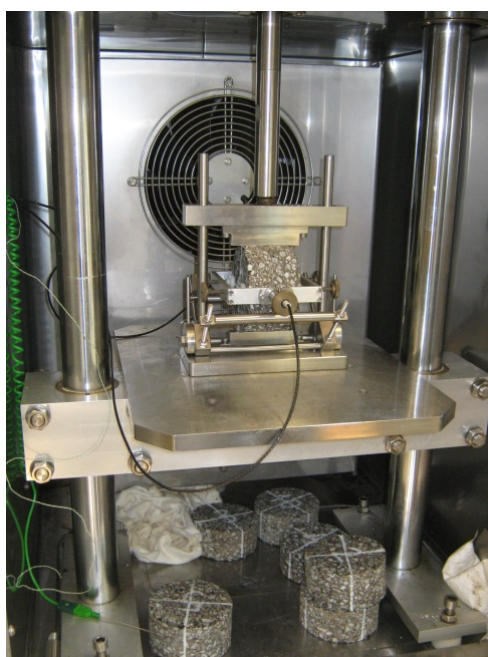


Figura 3.1 – Ensaio de trac o indirecta ou compressão diametral (LNEC)

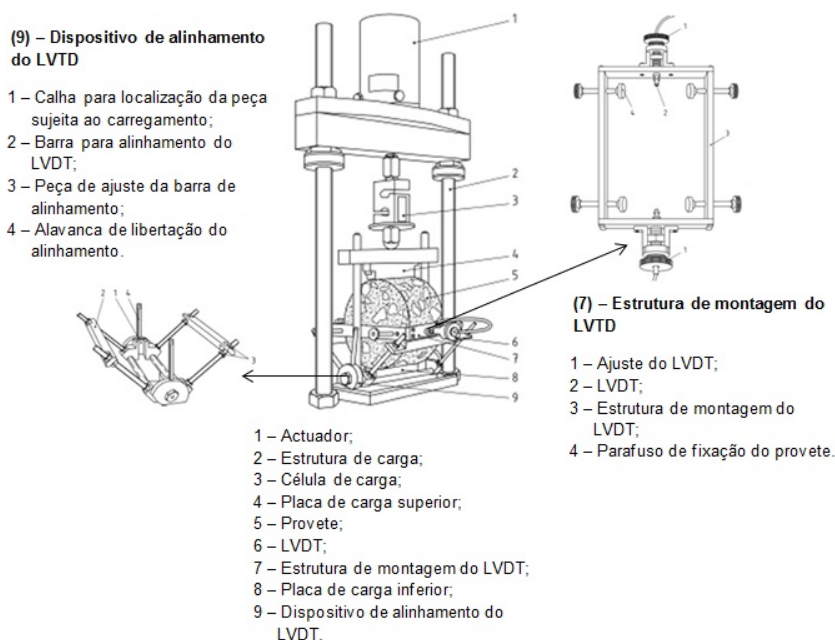


Figura 3.2 – Representação esquemática do equipamento para realização do ensaio de tração indirecta ou compressão diametral (adaptado da EN 12697-26:2006)

Na realização deste ensaio, a norma EN 12697-26:2006 preconiza que sejam utilizados provetes cilíndricos com espessuras entre 35 mm e 75 mm e diâmetros de 80 mm, 100 mm, 120 mm, 150 mm ou 200 mm.

De uma forma sintetizada, este ensaio consiste na aplicação de uma força vertical de compressão (F) durante um determinado período de crescimento (RT – *rise time*) que irá provocar um estado de deformação no provete (cilíndrico), reflectindo uma tracção no plano perpendicular à direcção do carregamento. Considera-se período de crescimento da força (*rise time*), o tempo decorrido entre o início da aplicação força até ao momento em que se regista o valor máximo (Figura 3.3). A norma EN 12697-26:2006 refere, para a realização do ensaio, os valores de 124 ± 4 milissegundos para o tempo de crescimento da força, de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ para a temperatura e de 0,35 para o coeficiente de Poisson.

Quando da realização do ensaio são introduzidos dados relativos às características dos provetes, concretamente o diâmetro, a espessura e a baridade.

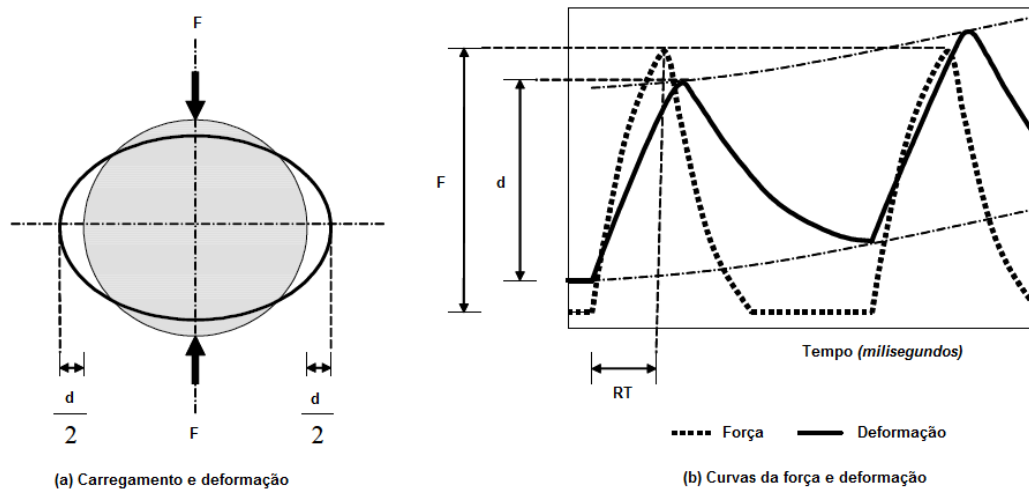


Figura 3.3 – Princípio de carregamento e deforma o do provete no ensaio de traço indirecta (Neves e Correia, 2006)

Previamente   realiza o do ensaio, o NAT efectua um determinado número de aplica es de carga para ajustar/calibrar o equipamento. A norma de ensaio (EN 12697-26:2006) indica que número de aplica es de carga para esse efeito deve ser de, pelo menos, 10 aplica es. Assim, de acordo com o procedimento de ensaio e face ao equipamento utilizado para a realiza o do ensaio, considera-se a aplica o de 30 ciclos de repeti o de carga para ajustar e estabilizar as condi es de ensaio, e seguidamente mais 5 ciclos de repeti o de carga. A deforma o horizontal (perpendicular ao eixo da carga), durante a aplica o desses 5 ciclos,   medida pelos LVDT's e os registos são efectuados automaticamente por um *software* do equipamento, que permite determinar também o módulo de rigidez do provete.

Após efectuado o primeiro cáculo do módulo de rigidez do provete, este deverá ser rodado $90 \pm 1^\circ$ e repetido o procedimento do ensaio, considerando-se um segundo ensaio. Apenas serão considerados os valores que cumpram as seguintes condi es: o resultado obtido no segundo ensaio deverá encontrar-se no intervalo compreendido entre o módulo obtido no primeiro ensaio menos 20 % e o valor do módulo obtido no primeiro ensaio mais 10 %. Caso se verifiquem as

condições acima referidas, o valor do módulo de rigidez do provete será calculado determinando-se a média dos dois valores obtidos.

O valor do módulo de rigidez da mistura, obtido no processo anteriormente descrito, é um parâmetro fundamental para o dimensionamento dos pavimentos rodoviários.

3.3 Caracterização da resistência à deformação permanente

3.3.1 Generalidades

Conforme referido em 2.3, 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 surgimento de depressões longitudinais (cavados de rodeira) na zona de passagem dos rodados e, por vezes, de elevações laterais contíguas (Batista, 2004).

Existem diversos tipos de ensaios para avaliação da resistência à deformação permanente e misturas betuminosas, sendo os mais comuns, em laboratório, os realizados através do ensaio de simulação em pista (*Wheel-Tracking*) ou através de ensaios de compressão. Estes últimos podem dividir-se em ensaios de compressão uniaxial e ensaios de compressão triaxial.

A realização deste tipo de ensaios origina uma curva tipo que representa a extensão acumulada em função do número de ciclos (Figura 3.4). Essa curva é, normalmente, composta por três fases distintas (Kuhn e Mitchell, 1993 citado por Batista, 2004):

- Fase primária (ou fase inicial) – existe uma rápida deformação do provete, que diminui com o aumento do número de ciclos, originado uma diminuição da velocidade de deformação;
- Fase secundária (ou fase intermédia) – nesta fase a velocidade de deformação permanece constante;

- Fase terciária (ou última fase) – ocorre uma rápida deforma o do provete, aumentando a velocidade de deforma o, originando a rotura do provete.

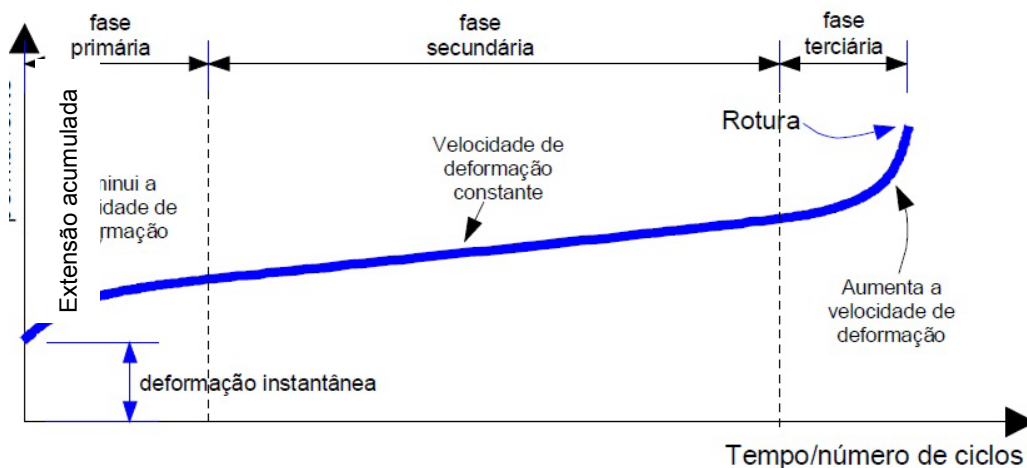


Figura 3.4 – Rela o entre a extensão permanente vertical e o número de ciclos da carga (adaptado de Batista, 2004)

Pode considerar-se que o comportamento descrito na Figura 3.4 está directamente relacionado com a forma o de cavados de rodeira nos pavimentos flexíveis (Freire, 2002).

Segundo a norma que descreve os métodos e condi es para a realiza o dos ensaios de compressão, a EN 12697-25:2006, deverá ser considerado o ensaio de compressão triaxial para a avalia o e desenvolvimento de novos tipos de misturas betuminosas. Assim, neste estudo foi considerado o ensaio de compressão triaxial para a avalia o da resistência   deforma o permanente.

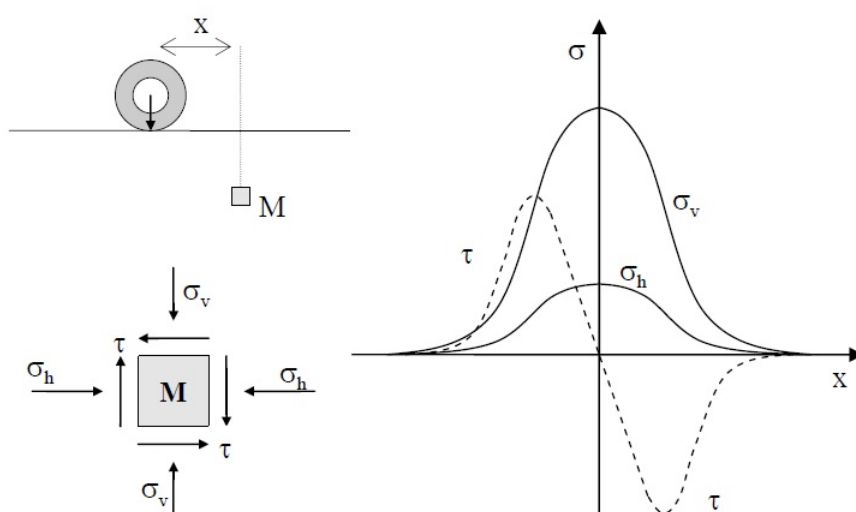
Os ensaios de compressão triaxial são semelhantes aos ensaios de compressão uniaxial, mas, no entanto, os provetes são submetidos a uma tensão de confinamento durante o ensaio. Desta forma   possível realizar ensaios triaxiais est ticos ou com aplica o de cargas repetidas (cíclicos). Como se considera que os ensaios cíclicos são aqueles que melhor simulam a realidade, tal como se descrever  seguidamente, a avalia o da resistência   deforma o permanente

da mistura betuminosa estudada neste trabalho, foi efectuada através da realização de ensaios de compressão triaxiais com aplicação de cargas repetidas.

3.3.2 Ensaio de compressão triaxial com aplicação de carga cíclica

Como referido anteriormente, a avaliação em laboratório da resistência à deformação permanente de misturas betuminosas, pode ser realizada através do ensaio de simulação em pista (*Wheel-Tracking*) ou através de ensaios de compressão. No âmbito deste trabalho, foram realizados ensaios de compressão triaxiais com aplicação de cargas repetidas.

Os ensaios com aplicação de cargas repetidas tendem a simular melhor o estado de tensão que ocorre num pavimento devido à acção das cargas rolantes (tráfego), que se caracteriza por um acréscimo de tensões (verticais, horizontais, e tangenciais) com o andamento qualitativo indicado na Figura 3.5.



Legenda: σ_h – tensões horizontais; σ_v – tensões verticais; τ – tensões tangenciais;
 x – distância horizontal entre o eixo vertical da carga aplicada e eixo vertical do corpo M

Figura 3.5 – Representação esquemática do acréscimo de tensões devido à acção de carga rolante (adaptado da norma EN 12697-25:2006)

O ensaio de compressão triaxial   realizado de acordo com a norma EN 12697-25:2006 e consiste na aplica o de cargas axiais a provetes de forma cilíndrica, sujeitos a tensões de confinamento lateral, de forma a simular a existência de mistura betuminosa nas laterais do provete. Estes ensaios permitem a quantifica o das propriedades dinâmicas dos materiais, em fun o da temperatura e da frequência de aplica o das cargas (Freire, 2002).

Para a realiza o deste ensaio utilizou-se o *Nothingham Asphalt Tester* (NAT) do LNEC, apresentado na Figura 3.6. Como referido anteriormente, este equipamento   composto por um sistema pneumático que possibilita a aplica o de cargas verticais repetidas actuando na direc o do eixo do provete cilíndrico, um sistema de registo da extensão vertical acumulada (dois transdutores de deslocamento) e um câmara equipada com termóstato para garantir a manuten o e controlo da temperatura durante a realiza o do ensaio.



Figura 3.6 – *Nothingham Asphalt Tester*, sistema de introdu o e recolha de dados (LNEC)

A norma EN 12697-25:2006, preconiza três solu es distintas para a aplica o da pressão de confinamento durante realiza o do ensaio:

- Tipo 1 – a tensão de confinamento é assegurada com água. As placas de carregamento estão dentro da câmara, permitindo que a pressão de confinamento seja aplicada a todo o provete;
- Tipo 2 – a tensão de confinamento é também assegurada pela água estando, no entanto, as placas de carregamento no limite da câmara, possibilitando a aplicação da pressão de confinamento apenas nas partes laterais do provete;
- Tipo 3 – a tensão de confinamento é obtida através de um vácuo criado no interior do provete que se encontra selado lateralmente por uma membrana de borracha e pelas placas de carregamento.

Neste estudo, a aplicação da pressão de confinamento foi efectuada segundo o tipo 3 (Figura 3.7).



Figura 3.7 – Equipamento para a realização do ensaio de compressão triaxial (LNEC)

É também referido na norma europeia EN 12697-25:2006 que devem ser utilizados, pelo menos, dois provetes cilíndricos com dimensões em função da granulometria máxima do agregado utilizado na mistura betuminosa. Assim, para granulometria igual ou inferior a 16 mm o provete deverá ter diâmetro mínimo e

altura m ınima de 50 mm e para granulometria superior a 16 mm, o di ametro e a altura deverão ter valores m ınimos de 75 mm. A norma aconselha a que a razão entre a altura (h) e o di ametro (ϕ) seja de 0,5, o que proporciona a utilização de provetes menores, facilitando a execução do ensaio.

As cargas podem ser aplicadas seguindo um desenvolvimento ou tipo “onda rectangular” ou “haversinusoidal”, sendo que no primeiro tipo utilizam-se tempos de repouso da carga. Neste trabalho será utilizado o carregamento do tipo “onda rectangular” (Figura 3.8).

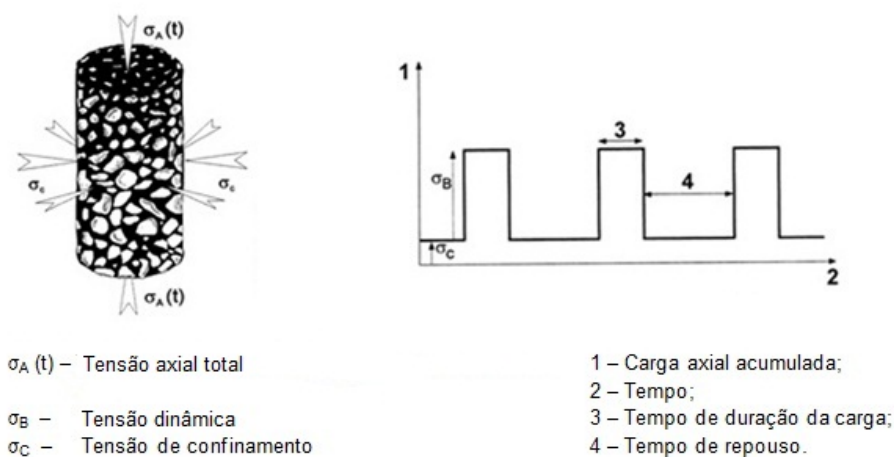


Figura 3.8 – Representação das tensões exercidas no provete com aplicação de cargas cíclicas do tipo “onda rectangular” (adaptado de EN 12697-25:2006)

De acordo com a norma, para a realização deste ensaio considera-se uma pré-carga aplicada durante 120 ± 6 s, com um valor obtido através da expressão 3.1:

$$0,02 \times (\sigma_B + \sigma_C) \quad (3.1)$$

onde,

σ_B – tensão dinâmica;

σ_C – tensão de confinamento.

Imediatamente a seguir   aplicação da pré-carga, inicia-se a aplicação da tensão de confinamento, com um valor m ınimo de 25 kPa, recomendando-se um valor

No presente estudo, foi utilizada uma temperatura de ensaio de 50  C, recomendada para zonas quentes, por ser a mais desfavorável.

Em consonância com a norma EN 12697-25:2006, o ensaio de compressão triaxial deve dar-se por concluído quando forem atingidos no mínimo 10000 ciclos de carga ou nos casos em que a deformação do provete possa originar danos no equipamento.

São utilizados dois LVDT's, colocados diametralmente opostos entre si, para registar a evolução da deformação permanente dos provetes. As leituras são efectuadas automaticamente pelo equipamento, através de um *software* próprio para o efeito.

Como referido anteriormente, o resultado do ensaio de compressão triaxial   uma curva (Figura 3.4) que relaciona a deformação axial do provete com o número de ciclos de repetição da carga (número de ciclos de carregamento).

Através da análise do referido gráfico e dos resultados do ensaio, podem ser calculados diversos parâmetros que determinam o comportamento da mistura betuminosa.

Relativamente ao método de cáculo desses parâmetros, a norma EN 12697-25:2006 descreve que a extensão axial permanente acumulada, ϵ_N ,   calculada pela expressão 3.2:

$$\epsilon_n = \frac{h_0 - h_n}{h_0} \times 100 \quad (3.2)$$

onde,

ϵ_N – extensão axial permanente acumulada no ciclo n, expressa em %;

h_0 – altura inicial do provete, expressa em mm;

h_n – altura do provete no ciclo n, expressa em mm.

De acordo com a norma, a resistência à deformação permanente da mistura pode ser determinada interpretando a curva de fluência e calculando os parâmetros, segundo um dos seguintes métodos:

- Determinação da taxa de fluência, f_c , ou velocidade de deformação;
- Determinação dos parâmetros B e $\epsilon_{1000, calc}$.

O método para a determinação da taxa de fluência, f_c , ou velocidade de deformação consiste nos seguintes passos:

Utilização de uma regressão linear para determinar a equação da recta correspondente à deformação ocorrida na segunda fase do carregamento (fase quase linear), com base na expressão 3.3:

$$\epsilon_n = A_1 + B_1 \times n \quad (3.3)$$

Determinação da taxa de fluência, f_c , ou velocidade de deformação através da expressão 3.4 (que é o valor de B_1 expresso em $\mu\text{extensão/ciclo de carga}$)

$$f_c = B_1 \times 10^4 \quad (3.4)$$

Este é um método simples, mas tem a desvantagem de considerar apenas a parte quase linear da curva de fluência. Além disso a inclinação da curva depende muito do intervalo escolhido, porque, geralmente, não existe nenhuma zona da curva com declive “realmente” constante. Assim, torna-se impreterível a escolha de um intervalo que contenha apenas a fase linear da curva, não devendo ser considerados ciclos da fase 1 ou da fase 3 da curva de fluência, sob consequência de obter-se resultados enviesados (Gardete, 2006).

O segundo método consiste na determinação dos parâmetros B e $\epsilon_{1000, calc}$, (deformação do provete após 1000 ciclos). A equação da curva de fluência pode ser obtida pela expressão 3,5:

$$\varepsilon_n = A \times n^B \quad (3.5)$$

Linearizando a equação 3.5, tem-se a equação 3.6:

$$\log \varepsilon_n = \log A + B \times \log n \quad (3.6)$$

Assim, a deformação permanente ap os 1000 ciclos, $\varepsilon_{1000, calc}$, em percentagem, pode ser determinada atrav es da equação (3.7):

$$\varepsilon_{1000, calc} = A \times 1000^B \quad (3.7)$$

3.4 Caracterização da resistência   acção da  gua

3.4.1 Generalidades

A resistência das misturas betuminosas   acção da água   uma característica importante no desempenho e durabilidade deste tipo de materiais, em especial, dos aplicados em camada de desgaste.

Geralmente, a avaliação da sensibilidade   água de misturas betuminosas   efectuada atrav es da determinação da resistência conservada entre dois grupos de provetes previamente submetidos a diferentes condicionamentos em  gua (Airey e Choi, 2002; Batista *et al.*, 2011).

Em Portugal, os valores de referência existentes para a sensibilidade   água de misturas betuminosas foram estabelecidos de acordo com a norma de ensaio militar americana MIL-STD-620A – método A. No entanto, no actual contexto das normas europeias, em particular da norma EN 12697-12:2008, torna-se pertinente avaliar a sensibilidade   água de misturas betuminosas segundo os ensaios descritos na referida norma.

Num estudo efectuado por Batista *et al.* (2011) para a avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas, segundo as duas normas referidas, constatou-se que a aplicação da norma europeia conduz, de forma geral, a valores de resistência conservada inferiores aos obtidos com a norma militar e permite diferenciar melhor os comportamentos de diferentes misturas.

Com base no exposto, neste estudo, foi considerada a norma europeia EN 12697-12:2008 para a avaliação da sensibilidade à água da mistura betuminosa. Esta norma preconiza três métodos para a determinação da resistência conservada: o método A, o método B e o método C.

O método A baseia-se na tracção indirecta de provetes cilíndricos, o método B baseia-se na resistência à compressão simples de provetes cilíndricos e o método C é apenas aplicável em misturas betuminosas fabricadas com betumes moles, fornecendo um valor de adesividade da mistura.

De acordo com Batista e Antunes (2009), o método C não é, de uma forma geral, aplicável ao tipo de misturas betuminosas fabricadas em Portugal, sendo o método A aquele que tem vindo a ser mais utilizado em diversos países Europeus. Assim, o método que tem sido utilizado nos ensaios de laboratório efectuados segundo a norma Europeia EN 12697-12 (2008) é o método A (resistência conservada em ensaio de tracção indirecta, ITSR), que vai ser descrito no desenvolvimento deste trabalho.

3.4.2 Ensaio de tracção indirecta segundo a Norma Europeia EN 12697-12:2008 – Método A

Conforme descrito anteriormente, o método A da norma europeia consiste na determinação da resistência conservada em ensaio de tracção indirecta, (ITSR). Para a realização do ensaio é necessário um mínimo de 6 provetes. Estes provetes são divididos em dois grupos homogéneos, onde a diferença entre as baridades e alturas médias não deve exceder, respectivamente, os limites de 15 kg/m³ e 5 mm.

O primeiro grupo de provetes, denominado por grupo de provetes “a seco” (ITS_d),  e acondicionado a uma temperatura de $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. O segundo grupo de provetes, denominado por grupo de provetes “imersos” (ITS_w),  e primeiramente medido, sendo depois submetido ao condicionamento em v acuo. Este procedimento resume-se em colocar os provetes em água destilada a uma temperatura de $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, e depois mantidos a uma pressão de $6,7 \pm 0,3 \text{ kPa}$ durante 30 ± 5 minutos.

Posto isto, os provetes são retirados do v acuo, retirada a água   superfície e novamente medidos, com o objectivo de verificar a sua variação de volume. De seguida são colocados, durante um período de 68 a 72 horas, num banho de água a $40 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Terminado o período atrás referido, os dois grupos de provetes são colocados   temperatura adoptada para a realização do ensaio de tracção indirecta. O primeiro grupo de provetes (ITS_d)   colocado a uma temperatura definida entre $5 \text{ }^\circ\text{C}$ e $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e o segundo grupo (ITS_w)   colocado noutro banho de água a temperatura idêntica   do primeiro grupo.

O ensaio de tracção indirecta consiste na aplicação de uma força vertical a velocidade constante no provete de ensaio, com o auxílio de um equipamento próprio (prensa), considerando-se o ensaio concluído quando for atingida a força vertical máxima, que culmina com a rotura do provete. Este equipamento encontra-se conectado a um computador equipado com um *software* onde são registados os valores do ensaio.

A resistência conservada em tracção indirecta ($ITSR$)   calculada através da expressão (3.8):

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \times 100 \quad (3.8)$$

em que,

ITS_w – Resistência   tracção indirecta dos provetes “imersos”;

ITS_d – Resistência á tracção indirecta dos provetes “a seco”.

Com base no valor obtido, a norma EN 13108-5:2006 preconiza que seja selecciona uma das categorias, apresentadas no Quadro 3.2, para a resistência conservada em tracção indirecta (ITSR).

Quadro 3.2 – Categorias previstas na norma EN 13108-5:2006 para a resistência conservada em tracção indirecta (ITSR)

Valor mínimo resistência conservada em tracção indirecta (ITSR)	Categoria
90	ITSR ₉₀
80	ITSR ₈₀
70	ITSR ₇₀
60	ITSR ₆₀
<i>Sem exigência (No requirement)</i>	ITSR _{NR}

A norma de ensaio preconiza, também, uma avaliação do tipo de rotura do provete. O procedimento de caracterização do tipo de rotura encontra-se descrito, de uma forma mais pormenorizada, na norma EN 12697-23:2003. No entanto, de uma forma simplificada, a rotura pode ocorrer das seguintes formas: por tracção indirecta evidente; por deformação; combinada (Figura 3.10).

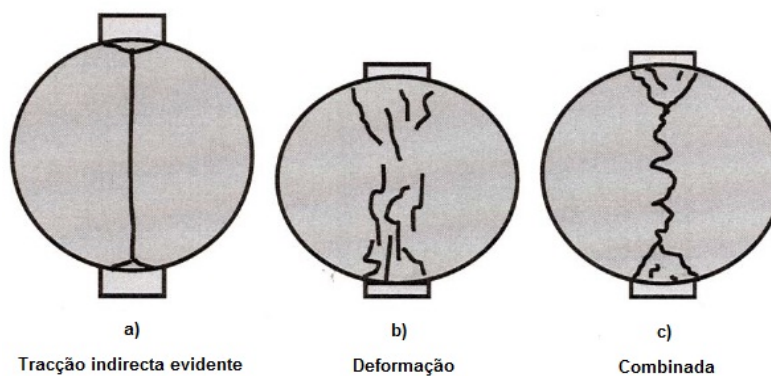


Figura 3.10 – Tipo de rotura (adaptado da norma EN 12697-23:2003)

Para além do tipo de rotura, a norma referencia a verifica o, após a rotura do provete, do revestimento de ligante na superfície do agregado e se existe agregado fracturado ou esmagado.

  recomendado, pela norma EN 12697-12:2008, que seja adoptada uma temperatura de ensaio de 25  C, de forma a obter-se a minimiza o da influencia dos agregados partidos na “linha” de rotura do provete e uma influencia máxima da adesividade do ligante. No entanto, a norma EN 13108-20:2008 refere uma temperatura de 15  C para efeitos de ensaios de tipo iniciais de misturas betuminosas abrangidas pela marca o CE (Batista *et al.*, 2008).

3.5 Caracteriza o do escorrimento do ligante

3.5.1 Generalidades

A realiza o e requisitos deste ensaio são descritos na norma europeia EN 12697-18:2004. Esta norma prevê a realiza o deste ensaio segundo duas metodologias: método do cesto (*Basket method*) e método de *Schellenberg* (*Schellenberg method*). O método de *Schellenberg*   frequentemente utilizado na Holanda e na Alemanha (Vale *et al.*, 2006).

Importa referir que nos Estados Unidos da América este tipo de ensaios   realizado de acordo com os requisitos de outra norma, em particular, a norma AASHTO T-305/97 – *Draindown Sensivity*.

O ensaio de escorrimento tem como finalidade determinar o escorrimento do ligante da mistura betuminosa, podendo assim ser efectuada uma avalia o da percentagem de fibras necessária para a estabiliza o da mistura. Várias publica es, como   o caso de PANK (1995), sugerem uma percentagem de fibras de acordo com a sua natureza (Quadro 3.3).

No caso particular das fibras de celulose, mineral e de vidro, são recomendadas percentagens de incorporação na mistura betuminosa compreendidas entre 0,3 - 0,5 %, 0,7 - 0,9 % e 0,4 - 0,6 %, respectivamente.

Quadro 3.3 – Percentagem de fibras na mistura SMA (PANK,1995)

Fibras	Percentagem (%)
Celulose	0,3 – 0,5
Mineral	0,7 – 0,9
Vidro	0,4 – 0,6

Em ambos os métodos, é determinado uma percentagem de escorrimento do ligante, D. A norma EN 13108-5:2006, estabelece as categorias indicados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Categorias previstas na norma EN 13108-5:2006 para o escorrimento do ligante (D)

Valor máximo do escorrimento do ligante (%)	Categoria
0,3	D _{0,3}
0,6	D _{0,6}
1,0	D _{1,0}
<i>Sem exigência (No requirement)</i>	D _{NR}

3.5.2 Método do cesto (*Basket method*)

Através deste método é possível 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.

Este método preconiza a utilização de um cesto (Figura 3.11), com as características definidas na norma do ensaio (onde é colocada a mistura sem ser

compactada) para avalia o a percentagem de material escorrido. Considera-se material escorrido todo o material sob forma de betume, agregados e fibras (aditivos) que se separam da amostra durante o processo de ensaio, e que pretende simular todo o material que se separa durante a mistura, o transporte e a compacta o da camada betuminosa.

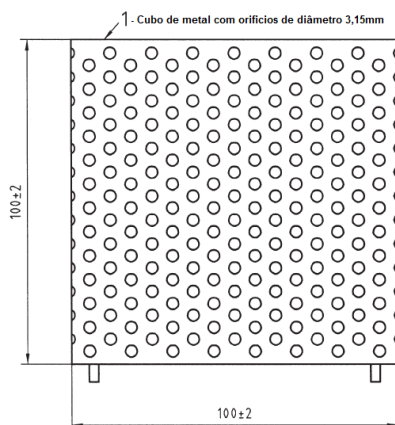


Figura 3.11 – Características do cesto utilizado no ensaio (EN 12697-18:2004)

Efectuando uma compara o com a norma americana, verifica-se que as características (principalmente a forma geométrica) e dimensões do cesto diferem da norma europeia. Na Figura 3.12, pode-se observar um cesto utilizado num estudo para determina o dos valores do ensaio de escorrimento, de acordo com a norma americana.



Figura 3.12 – Cesto utilizado para determina o do valor do escorrimento do ligante, de acordo com a norma americana AASHTO T-305/97 (Souza, 2007).

Para a realização deste ensaio, de acordo com a norma EN 12697-18:2004, são necessárias quantidades de agregados e betume suficientes para fabricar, pelo menos, 4 Kg de mistura betuminosa.

A temperatura do ensaio tem como base a temperatura de mistura, utilizada no processo de fabrico, definida pela norma EN 12697-35:2004, a par do tipo de betume: para betume de pavimentação considera-se a temperatura de mistura mais 25 °C; para betume modificados considera-se a temperatura de mistura mais 15 °C.

Nos agregados com densidade entre 2,65 Mg/m³ e 2,75 Mg/m³, efectua-se a pesagem de três lotes de 1,1 kg, respeitando as proporções de cada uma das fracções, com a aproximação de 1 g para obter a granulometria especificada. Para outros tipos de agregados deverão ser efectuadas as correcções necessárias para obter um volume de agregado similar. Cada lote é acondicionado separadamente. Colocam-se na misturadora o lote de agregado pesado e o betume considerado (com uma aproximação de 0,5 g), de acordo com os requisitos da norma EN 12697-35:2004, tendo em especial atenção as especificações de incorporação dos aditivos (neste caso as fibras) definida pelo fabricante.

Seguidamente efectua-se a pesagem de um tabuleiro forrado com papel de alumínio (W_1), preparado para depositar o cesto de ensaio.

Posto isto, a mistura é transferida para o cesto que se encontra sobre o tabuleiro pré-aquecido. Esta operação deverá ser executada o mais rapidamente possível, de forma a minimizar perdas de temperatura. O conjunto “cesto+tabuleiro” deverá permanecer, na estufa, à temperatura do ensaio durante um período entre as 3 e 3,15 horas.

No final do período referido, retira-se o cesto do tabuleiro e aguarda-se que este arrefeça o suficiente para efectuar nova pesagem (W_2).

Finalmente, o escorrimento do lote, em percentagem,   dado pela expressão (3.9):

$$D = 100 \times \frac{(W_2 - W_1)}{1100 + B} \quad (3.9)$$

em que,

W_1 – peso inicial do tabuleiro preparado com papel de alumínio, em g;

W_2 – peso final do tabuleiro com o material escorrido, em g;

B – peso de betume existente na mistura, em g.

Para uma mistura com o mesmo tipo de betume, se a diferença do escorrimento das amostras for superior a 0,5 %, o ensaio e os c alculos devem ser repetidos.

O valor do escorrimento da mistura   obtido efectuando a m edia entre, pelo menos duas amostras da mistura betuminosa. Se o valor obtido não for satisfatório, a percentagem ou tipo de fibras terá de ser reformulada e a mistura deverá ser submetida a novo ensaio de escorrimento do ligante.

Atendendo às características exigidas pela norma EN 12697-18:2004 para este m etodo de ensaio, principalmente no que respeita   dimensão do cesto de ensaio, surge uma preocupação relacionada com a forma e comprimento das fibras, que poderão obstruir os orifícios do cesto e influenciar os resultados do ensaio. Assim, recomenda-se que seja feita uma avaliação dos orifícios do cesto, e no caso de serem observados indícios da sua colmatação, deve ser realizado o ensaio pelo m etodo de *Schellenberg*.

3.5.3 M etodo de *Schellenberg*

Como referido anteriormente, este m etodo   bastante utilizado na Alemanha e na Holanda. O princípio deste m etodo baseia-se na quantificação da perda de material escorrido, após 1 hora, a uma temperatura representativa da temperatura m axima atingida durante o processo de mistura dos materiais. A determinação do

escorrimento é efectuada pelo resíduo de mistura deixado num copo de vidro específico para o ensaio, depois de este ser esvaziado.

Para a realização deste ensaio são necessárias quantidades de agregados e betume suficientes para fabricar, pelo menos, 3 Kg de mistura betuminosa. A temperatura de realização do ensaio e as condições para o fabrico da mistura são as mesmas que foram descritas no método anterior (método do cesto). No entanto este método preconiza a utilização de lotes de agregado com 1 kg e, pelo menos, três copos de vidro com volume de 800 ml e diâmetro de 105 ± 5 mm.

Os copos de vidro devem ser numerados e colocados na estufa à temperatura do ensaio durante 15 minutos, procede-se posteriormente à sua pesagem (W_1). Imediatamente a seguir, o lote de mistura é transferido para o copo, pesado (W_2) e colocado novamente no interior da estufa. A pesagem e transferência da mistura para o copo devem ser executadas no período máximo de 60 s. Posteriormente, repete-se o processo anterior para os outros dois lotes.

Após 60 ± 1 minutos retira-se o primeiro copo da estufa e mede-se a temperatura do lote de mistura. Continuamente são retirados, alternadamente, os restantes copos de vidro, garantido que permaneceram na estufa durante o período referido. Imediatamente após serem retirados, os copos são virados ao contrário durante um período de tempo de 10 ± 1 s e é efectuada nova pesagem (W_3).

Se a mistura restante no interior do copo for mais de 0,5 % do peso da mistura original e não for, obviamente, só betume escorrido, a mistura deve ser lavada com solvente num peneiro com 1 mm. Seguidamente, o material que fica no peneiro é secado e novamente pesado (W_4).

O escorrimento da mistura, em percentagem, é dado pelas expressões 3.10 e 3.11:

$$D = 100 \times \frac{(W_3 - W_1 - W_4)}{(W_2 - W_1)} \quad (3.10)$$

$$R = 100 \times \frac{(W_4)}{(W_2 - W_1)} \quad (3.11)$$

em que,

D – escorrimento do ligante, em %;

R – resíduo existente no peneiro 1 mm, em %;

W_1 – peso do copo de vidro vazio, em g;

W_2 – peso do copo de vidro com lote/amostra, em g;

W_3 – peso do copo de vidro com o material retido depois de virado, em g;

W_4 – peso do resíduo final seco retido no peneiro 1mm, em g.

Para uma mistura com o mesmo tipo de betume a diferença dos valores obtidos para escorrimento dos lotes não deve ser superior a 0,5 %, no caso contrário o teste e os c culos devem ser repetidos.

O valor do escorrimento da mistura   obtido efectuando a média entre, pelo menos, duas amostras da mistura betuminosa. No caso do valor obtido não for satisfatório, a percentagem ou tipo de fibras terá de ser reformulada e a mistura deverá ser submetida a novo ensaio de escorrimento do ligante.

3.6 Considera es finais

Neste Capítulo descreveram-se os métodos de ensaio utilizados no presente estudo com vista   caracteriza o laboratorial de uma mistura do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA) contendo fibras de celulose.

Os ensaios considerados foram os seguintes:

- ensaios de trac o indirecta ou compressão diametral para a determina o do módulo de rigidez;

- ensaios de compressão triaxiais com cargas repetidas para a avaliação da resistência à deformação permanente;
- ensaios de avaliação da sensibilidade à água, para a determinação da resistência conservada.

A par destes, foram também descritos os ensaios de escorrimento do ligante da mistura, considerados na norma EN 12697-18:2004, para avaliação do escorrimento da mistura.

Para além dos ensaios descritos existem diversos métodos de caracterização laboratorial de misturas betuminosas, nomeadamente ensaios resistência à fadiga, baseado na norma EN 12697-24:2004. De referir que, no âmbito deste estudo não foi realizado o ensaio de determinação da resistência à fadiga, sendo que devido ao, relativamente, maior teor em betume característico da mistura *Stone Mastic Asphalt*, a norma NP EN 13108-20:2008 não exige a realização desses ensaios.

Devido à pouca experiência na utilização de misturas betuminosas do tipo SMA em Portugal, a versão mais recente do CETO (2011), não faz referência a valores alusivos para os resultados dos ensaios, dificultando o processo de análise dos resultados obtidos no estudo experimental. Atendendo a este facto, no presente estudo, optou-se por, sempre que possível, enquadrar os resultados nas classes/categorias previstas na norma EN 13108-5:2006 para as propriedades em causa.

4 Estudo Experimental para Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas “*Stone Mastic Asphalt*”

4.1 Considerações iniciais

O conhecimento das características de desempenho de um material de pavimentação, em particular, das misturas betuminosas, é essencial quer do ponto de vista da concepção e do dimensionamento do pavimento, quer do ponto de vista da gestão da rede.

No caso das misturas betuminosas do tipo SMA em apreço, foram descritos, no capítulo anterior, ensaios de desempenho considerados para a sua caracterização.

Para a realização do presente trabalho foram extraídos, através de sondagens à rotação, carotes de um pavimento flexível, num troço onde há cerca de ano havia sido executada, a título experimental, uma camada de desgaste em mistura do tipo SMA. De acordo com dados da obra, para o fabrico desta mistura utilizaram-se os seguintes materiais:

- mistura de agregados, constituída por brita 6/10 de origem granodiorítica, pó 0/4 e filer de origem calcária, com abertura do peneiro superior (D) de 12,5 mm.;
- fibras de celulose, numa percentagem de 0,4 %;
- betume modificado PMB 45/80-55, numa percentagem de 5,5 %.

Tendo em conta os materiais utilizados e, a designação da mistura de acordo com a norma EN 13108-5:2006 é “SMA 12 Surf PMB 45/80-55”.

Com vista à realização de ensaios para a avaliação do desempenho da mistura aplicada, foi possível retirar 10 carotes do trecho experimental. As carotes foram posteriormente aparadas, por forma a obterem-se provetes cilíndricos adequados para o ensaio.

De referir que, previamente   realiza ao dos ensaios de desempenho (ensaios para determina ao do m odulo de rigidez, da resistência   deforma ao permanente, de avaliaçao da sensibilidade   água e de escorrimento) realizaram-se ensaios para determina ao da baridade dos provetes.

No desenvolvimento deste capítulo, sintetizam-se, para os diversos ensaios, as respectivas condi oes de realiza ao e os procedimentos seguidos, e apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos.

4.2 Determina ao da baridade dos provetes

A determina ao da baridade dos provetes foi efectuada de acordo com a norma EN 12697-6:2003+A1:2007 – Procedimento B (Bulk density – SSD), conforme se sintetiza:

- Inicialmente identificam-se os provetes e efectuam-se as primeiras pesagens com os provetes secos a massa constante (m_1);
- Seguidamente, os provetes são colocados num recipiente com água durante cerca de 50 minutos, controlando a temperatura com o recurso a um term metro. Depois, cada provete   colocado num cesto met lico dentro de um recipiente com  gua. Este cesto encontra-se ligado por uma vareta met lica a uma balança, com o objectivo de medir novamente o peso do provete (m_2).
- Finalmente, o provete   retirado do cesto e com uma camurça   retirada a água em excesso   sua superfície. Seguidamente   medido e registado o seu peso (m_3).

Após registadas as medi oes, determinam-se as baridades de cada um dos provetes, de acordo com a expressão (4.1).

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (4.1)$$

em que,

ρ_{bssd} – baridade do provete, em kg/m^3 ;

m_1 – massa do provete seco, em g;

m_2 – massa do provete saturado dentro de água, em g;

m_3 – massa do provete saturado com a superfície seca, em g;

ρ_w – baridade da água à temperatura de ensaio, em kg/m^3 .

No Quadro 4.1, apresentam-se os resultados obtidos quanto à baridade dos provetes, determinada pelo método hidrostático (método B da norma EN 12697-6:2003+A1:2007)

Quadro 4.1 – Baridade dos provetes ensaiados

Provete	Massa do provete seco (kg)	Baridade (Kg/m^3)
SMA12_1	1,243	2261
SMA12_2	1,244	2263
SMA12_3	1,092	2260
SMA12_4	1,089	2245
SMA12_5	1,361	2262
SMA12_6	1,369	2264
SMA12_7	1,169	2264
SMA12_8	1,264	2262
SMA12_9	1,439	2262
SMA12_10	1,263	2263

Analisando os resultados expressos no Quadro 4.1, verifica-se que, à excepção do provete “SMA_12_4”, os valores de baridade obtidos são relativamente homogéneos.

4.3 Determina o do módulo de rigidez da mistura em ensaio de trac o indirecta ou compressão diametral

O módulo de rigidez foi determinado através do ensaio de trac o indirecta ou compressão diametral descrito na norma europeia EN 12697-26:2004.

Os parâmetros utilizados para a realiza o deste ensaio foram:

- Diâmetro do provete (\varnothing): em fun o do provete ensaiado (mm);
- Altura do provete (h): em fun o do provete ensaiado (mm);
- Baridade do provete: em fun o do provete ensaiado (Kg/m^3);
- Temperatura: 20  C;
- Coeficiente de Poisson: 0,35;
- *Rise time*: 124 μs ;
- Número de ciclos de aplica o da força: 30 + 5 (ver ponto 3.2.2).

No Quadro 4.2 sintetizam-se as características dos provetes ensaiados, bem como as condi es de ensaio consideradas.

Quadro 4.2 – Resumo dos valores de entrada (*input*) para o ensaio de trac o indirecta ou compressão diametral

Provete	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Baridade (Kg/m^3)	Rise time (ms)	Temp. (� C)	Coeficiente de Poisson
SMA12_1	113,1	57,1	2261			
SMA12_2	112,5	56,8	2263			
SMA12_3	112,5	51,3	2260			
SMA12_4	112,6	50,2	2245			
SMA12_5	112,8	61,2	2262	124	20	0,35
SMA12_6	112,8	62,9	2264			
SMA12_7	112,9	53,1	2264			
SMA12_8	112,7	57,3	2262			
SMA12_9	112,7	65,4	2262			
SMA12_10	112,7	57,5	2263			

Os resultados obtidos no ensaio para determinação do módulo de rigidez apresentam-se no Quadro 4.3 e representam-se graficamente na Figura 4.1.

Quadro 4.3 – Módulo de rigidez dos provetes

Número do provete	Módulo de rigidez em ensaio de compressão diametral ⁽¹⁾ (MPa)
SMA12_1	3123
SMA12_2	3160
SMA12_3	2760
SMA12_4	3200
SMA12_5	2970
SMA12_6	3070
SMA12_7	3150
SMA12_8	3010
SMA12_9	3260
SMA12_10	3230

(1) valores arredondados às dezenas

Verificou-se que no provete SMA12_1 não eram cumpridas as condições exigidas pela norma (descritas em 3.2.2), quanto à diferença de valores do módulo obtido no primeiro ensaio (2952 MPa) e segundo ensaio (3293 MPa), sendo que o valor obtido não foi considerado.

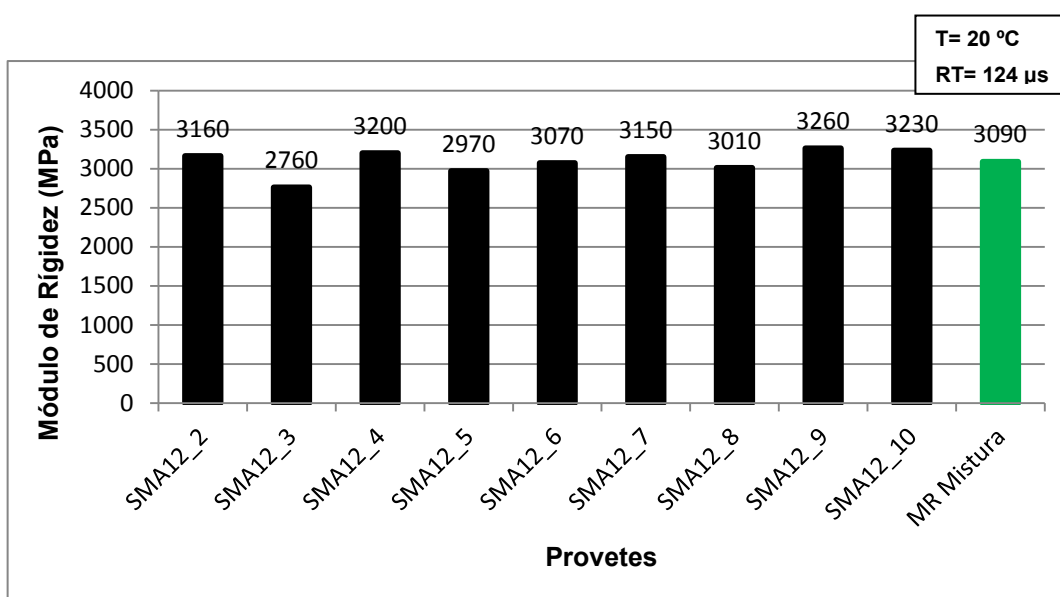


Figura 4.1 – Valores dos módulos de rigidez dos provetes

Efectuando os c culos da média aritmética dos valores obtidos, determina-se um valor médio para o módulo de rigidez de 3090 MPa (Figura 4.1).

Numa análise comparativa dos resultados apresentados neste trabalho com os resultados obtidos por Vale (2007), num estudo onde determina o módulo de rigidez de misturas betuminosas tipo SMA 12 50/70, com a utiliza o de fibras de coco e de celulose, verifica-se que os valores médios obtidos pelo mesmo método são, respectivamente 2690 MPa e 3180 MPa. Assim, verifica-se que os valores obtidos por Vale (2007) para as misturas com fibras de celulose, são muito semelhantes aos valores obtidos no presente estudo.

Num outro estudo efectuado por Filho (2007), verificou-se que os resultados da avalia o do módulo de rigidez de uma mistura betuminosa similar, SMA 12 50/70, foram ligeiramente superiores, tendo-se obtido um valor médio do módulo de 3610 MPa.

4.4 Determina o da resistência   deforma o permanente em ensaio de compressão triaxial com carga cíclica

A avalia o   deforma o permanente da mistura betuminosa efectuou-se através da realiza o de um ensaio de compressão triaxial com aplica o de cargas repetidas. Na realiza o do ensaio foi aplicada uma onda rectangular com um período de aplica o de 1 segundo e um período de repouso de igual grandeza, ou seja, de 1 segundo.

A norma de ensaios de tipo (NP EN 13108-20:2008) indica como condi es de ensaio, para misturas betuminosas destinadas a camada de desgaste, a aplica o de uma tensão de confinamento de 150 KPa e uma carga axial de 300 KPa. No entanto, devidas a restri es do equipamento de vácuo não foi possível aplicar a tensão de confinamento de 150 KPa, tendo-se optado por adoptar para os dois parâmetros referidos os valores estipulados na norma para a camada de base.

No Quadro 4.4 sintetizam-se as condições de ensaio.

Quadro 4.4 – Condições do ensaio de compressão triaxial

Temp. de acondicionamento (°C)	Temp. de ensaio (°C)	Tensão de confinamento (KPa)	Carga axial (KPa)	Frequência	Tipo de carregamento
15	50	50	200	1 s/1 s	onda rectangular

De acordo com o referido em 3.3.2, nestas condições é exercida uma pré-carga de 5 KPa, durante 120 s.

Quadro 4.5 – Características dos provetes ensaiados

Provete	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Baridade (kg/m ³)
SMA12_7	112,9	53,1	2264
SMA12_9	112,7	65,4	2262

Os provetes seleccionados foram preparados e colocados no NAT.

As curvas obtidas, por provete, através da análise dos dados de saída (output) registados pelo *software*, apresentam-se na Figura 4.2.

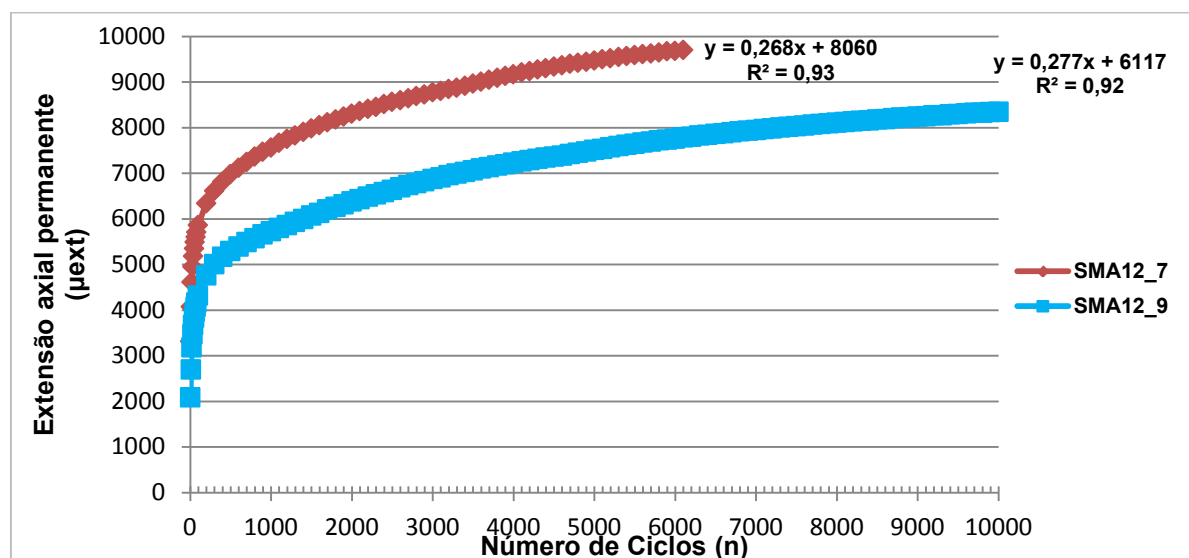


Figura 4.2 – Curvas de deformações obtidas no ensaio de compressão triaxial

Como referido no cap ıtulo anterior (Cap ıtulo 3), a norma EN 12697-25:2005, não indica o intervalo de ciclos para efectuar os c alculos. No entanto, optou-se por calcular os par ametros de acordo com as refer encias da norma para os ensaios de compressão uniaxial, ou seja, a partir dos 3600 ciclos, considerando-se, assim, a fase 2 da curva da deforma o (fase quase linear).

Embora a norma EN 12697-25:2006 não preconize, considera-se pertinente determinar o valor do m odulo de fluência (S_N) para análise e compara o dos resultados obtidos com outros estudos efectuados. O m odulo de fluência exprime, num certo sentido, a rigidez da mistura e   definido pela expressão (4.2), que representa o quociente entre a tensão aplicada ao provete e a deforma o permanente acumulada registada após um determinado número de ciclos.

$$S_N = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_N} \times 1000 \quad (4.2)$$

em que,

σ_d – tensão desviante aplicada, obtida pela expressão $\sigma_d = \sigma_B - \sigma_C$ (kPa)

ε_n – Extensão acumulada aos n ciclos

Devido a uma falha técnica do equipamento utilizado no ensaio, o provete SMA12_7 não atingiu os 10000 ciclos, tendo-se considerado para os c alculos, não são no intervalo entre os 3600 e 10000 ciclos, mas também o intervalo entre os 3600 e 6000 ciclos. No Quadro 4.6 apresentam-se os resultados obtidos, incluindo a velocidade de deforma o (f_c), parâmetro considerado mais relevante, bem como o m odulo de fluência (S_N).

Quadro 4.6 – Resultados do ensaio de compressão triaxial, segundo a norma EN 12697-25

Provete	σ_B (kPa)	σ_C (kPa)	ε_{3600} (μext)	ε_{6000} (μext)	ε_{10000} (μext)	$f_{c(3600-6000)}$ ($\mu\text{ext}/\text{ciclo}$)	$f_{c(3600-10000)}$ ($\mu\text{ext}/\text{ciclo}$)	$S_{N(3600-6000)}$ (MPa)	$S_{N(3600-10000)}$ (MPa)
SMA12_7	200	50	9055	9698	-	0,268	-	15,47	-
SMA12_9	200	50	7114	7779	8453	0,277	0,191	19,28	20,75

Legenda: σ_B – tensão axial cíclica; σ_C – tensão de confinamento; ε_{3600} – extensão acumulada aos 3600 ciclos; f_c – taxa de fluência ou velocidade de deforma o; S_N – m odulo de fluência.

Verifica-se alguma variabilidade nos valores obtidos para os dois provetes ensaiados, possivelmente devido à sua diferente altura. Refere-se, no entanto, que tratando-se de carotes recolhidos da obra, poderão haver outros factores a influenciar o seu diferente comportamento.

Visto que estamos perante o mesmo tipo de mistura betuminosa, a variabilidade obtida pode ser, também, indicadora da necessidade de realizar um maior número de ensaios para uma melhor avaliação da mistura.

A versão mais recente do CETO (2011), refere, apenas, valores para a resistência à deformação permanente recorrendo a ensaios de simulação em pista “*Wheel Tracking*” e para outro tipo de misturas betuminosas, sendo necessário, para análise dos resultados obtidos recorrer a outros estudos efectuados.

Num estudo realizado por Gardete (2006), foram submetidos a ensaio de compressão triaxial provetes obtidos em obra (por carotagem de uma mistura betuminosa aplicada em camada de desgaste do pavimento do tipo AC 14 Surf (BB) com percentagem de betume de 4,7 % (considerada inferior à percentagem de betume dos provetes ensaiados no presente estudo), obtiveram-se valores para a velocidade de deformação e módulo de fluência (S_N) de 0,2738 $\mu\text{ext/ciclo}$ e 25,4 MPa, respectivamente. Assim, realizando uma análise comparativa dos resultados obtidos nos dois estudos, verifica-se que os resultados são semelhantes, existindo apenas um pequeno acréscimo no módulo de fluência determinado no estudo de Gardete (2006), fruto, possivelmente, da menor percentagem de betume da mistura ensaiada.

Na determinação da deformação permanente recorrendo a esta metodologia de ensaio, a tensão de confinamento aplicada influencia bastante os resultados finais. Num estudo realizado por Baptista (2006), verifica-se que para a mesma mistura betuminosa, mas com tensão de confinamento relativamente maior, os resultados da velocidade de deformação permanente diminuem consideravelmente, originado um aumento do módulo de fluência da mistura.

De acordo com diversos estudos, nomeadamente, o efectuado por Freire (2002), para a avalia o da resistência   deforma o permanente de misturas betuminosas, considerando ensaios de simula o em pista de laboratório, concluiu-se que a temperatura de ensaio   um dos parâmetros que tem grande influência no comportamento   deforma o permanente das misturas betuminosas. A adop o de valores mais elevados para a temperatura conduzir  a um pior comportamento   deforma o permanente, do qual resultarão maiores cavados de rodeira. Assim, embora não sejam efectuados no presente estudo,   pertinente a realiza o de ensaios triaxiais para determina o da resistência   deforma o permanente recorrendo a diferentes temperaturas de ensaio.

Numa análise conclusiva, refere-se que os resultados obtidos nos ensaios triaxiais com aplica o de cargas repetidas não permitem uma correcta avalia o da resistência   deforma o permanente da mistura ensaiada, devido   variabilidade dos valores obtidos. No entanto, em compara o com outros estudos verifica-se que são obtidos valores relativamente semelhantes para a resistência   deforma o permanente, levando a admitir que a mistura apresenta bom comportamento   deforma o permanente.

4.5 Avalia o da sensibilidade   água em ensaio de trac o indirecta

Após determinada a baridade e as dimensões dos provetes, de acordo com a norma EN 12697-29:2002, foram seleccionados 6 provetes para o ensaio de determina o da resistência conservada em trac o indirecta, seguidamente, são preparados os dois grupos de três provetes, tendo em aten o a varia o máxima da baridade e espessura de 15 Kg/m³ e 5 mm, respectivamente.

No Quadro 4.7, sintetizam-se as características dos 2 grupos de provetes.

Quadro 4.7 – Características dos grupos de provetes submetidos ao ensaio de determinação da resistência conservada em tracção indirecta

Grupo dos provetes “a seco”			Grupo dos provetes “imersos”		
Provete	Espessura (mm)	Baridade (Kg/m ³)	Provete	Espessura (mm)	Baridade (Kg/m ³)
SMA12_1	57,1	2261	SMA12_5	61,2	2262
SMA12_2	56,8	2263	SMA12_8	57,3	2262
SMA12_6	62,9	2264	SMA12_10	57,5	2263

De seguida, o primeiro grupo de provetes (ITSd), grupo de provetes “secos”, foi acondicionado a uma temperatura de 20 ± 5 °C e o segundo grupo (ITSw), grupo de provetes “imersos”, foi submetido a um procedimento de vácuo, seguidamente descrito, com o objectivo de remover o ar no interior dos provetes e de garantir a entrada de água nos seus poros.

No procedimento de vácuo, os provetes foram colocados no interior de um picnómetro de vácuo e submersos com água. A água deve ser suficiente para cobrir os provetes numa altura de 20 mm acima do topo destes.

Seguidamente foi aplicado o vácuo, com o auxílio de uma bomba, até à pressão de $6,7 \pm 0,3$ kPa, durante um período de 10 ± 1 minutos.

Verificou-se em estudos anteriores (Batista *et al.*, 2008) que, quer o aumento da pressão, quer posteriormente a sua redução deve ser feita de forma gradual por forma a não danificar os provetes. Atendendo ao valor de cerca de 100 kPa da pressão atmosférica, o estudo referido sugere, por exemplo, que a pressão deve ser reduzida gradualmente por patamares, procedimento este que foi seguido quando da realização do presente ensaio.

Após atingida a pressão referida, o vácuo foi mantido durante 30 ± 5 minutos (Figura 4.3), sendo que no final deste período foi revertido o processo até ser atingida, novamente, a pressão atmosférica.



Figura 4.3 – Sistema de aplica o do vácuo (Picn metro e bomba de vácuo)

Depois de atingida a pressão atmosférica, os provetes foram retirados do picn metro e foi efectuada uma nova medi o geométrica dos provetes, com o objectivo de verificar se existia varia o do volume. No caso de algum provete sofrer uma varia o do volume superior a 2 %, este deve ser descartado e substituído por outro.

Após verifica o da condi o anterior e uma vez que nenhum provete sofreu varia o de volume superior ao máximo estabelecido, os provetes foram colocados num banho de água durante um período de 68 a 72 horas,   temperatura de 40 ± 1  C.

Terminado o período referido, os provetes foram colocados em outro banho de água   temperatura do ensaio (15  C), durante 2 horas (Figura 4.4a). Neste instante, o grupo de provetes “secos” foi também colocado   temperatura de ensaio, durante igual período de tempo (Figura 4.4b).

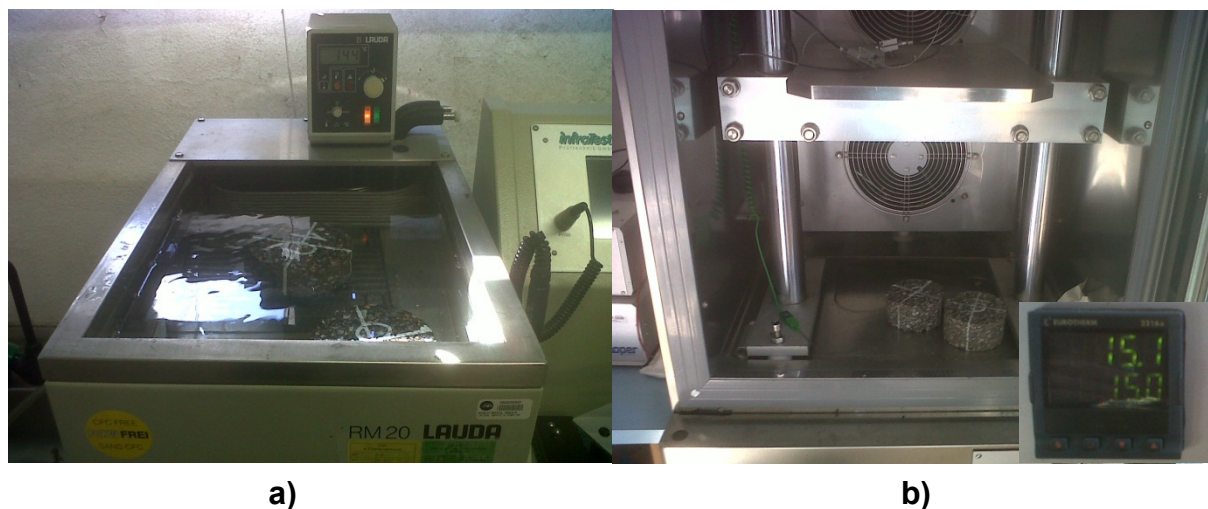


Figura 4.4 – a) Provetes “imersos”; b) Provetes “a seco”

Depois de concluído o período de condicionamento à temperatura do ensaio de tracção indirecta, iniciou-se o ensaio referido, com recurso à prensa de Marshall (Figura 4.5). Nesta prensa é aplicada uma carga vertical com velocidade constante até ocorrer a rotura do provete.



Figura 4.5 – Ensaio de tracção indirecta

Os resultados do ensaio são apresentados no Quadro 4.8 e representados graficamente na Figura 4.6.

Quadro 4.8 – Resultados do ensaio de sensibilidade   água, segundo a norma EN 12697-12 (2008),   temperatura de 15  C

Tipo de mistura	Parâmetro	Provetes “a seco” (valores médios)	Provetes “imersos” (valores médios)
SMA 12 50/70	ρ_{bSSD} (Kg/m ³)	2263	2262
	P _{ITS} (kN)	14,06	12,51
	ITS _m (kPa)	1350	1200
	ITSR (%)	89	

Legenda: $\rho_{b,SSD}$ – Baridade, determinada pelo método hidrostático (SSD); P_{ITS} – Resistência máxima (força de rotura) em trac o indirecta; ITS_m – Resistência (tensão de rotura) em trac o indirecta; ITSR – Resistência conservada   trac o indirecta

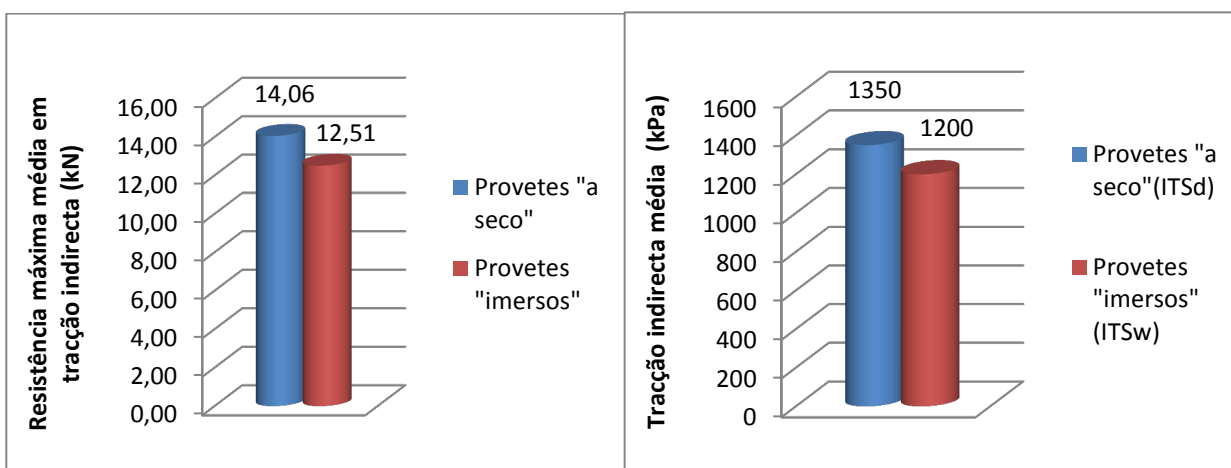


Figura 4.6 – Resultados obtidos no ensaio de sensibilidade    gua

Analisando a Figura 4.6, verifica-se que se obtiveram valores ligeiramente superiores para o grupo de provetes “a seco”, tal como era expectável no início do ensaio.

Com o valor de ITSR obtido, pode categorizar-se a mistura betuminosa em estudo de acordo com a norma EN 13108-5:2006. Assim, segundo a referida norma, esta mistura assume a categoria de ITSR₈₀. (Quadro 3.2).

O CETO (2011), não prevê valores do ITSR para misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt*, preconizando valores apenas para duas misturas betuminosas fabricadas a quente para camada de desgaste: misturas do tipo

MBA-BBA (Mistura betuminosa aberta com betume modificado com alta percentagem de borracha) e misturas do tipo MBR-BBA (Mistura betuminosa rugosa com betume modificado com alta percentagem de borracha). Para estes dois tipos de misturas betuminosas, o CETO (2011) preconiza um valor mínimo de resistência conservada de 75 %, ou seja, inferior ao valor obtido para a mistura SMA em apreço.

Para efeitos comparativos, analisou-se ainda um estudo realizado por Vale (2006) segundo a norma americana AASHTO T 283, no qual os valores da resistência conservada eram da ordem de 70 % a 90 %. Verificou-se que o valor determinado no presente estudo (89 %) situa-se na gama superior daquele intervalo.

Noutro estudo, realizado por Pereira (2009), foram, igualmente, submetidas ao ensaio de avaliação da sensibilidade à água, segundo a norma EN 12697-12:2008 – método A, misturas betuminosas utilizadas em camada de desgaste, tendo-se registado valores de 90 % para a resistência conservada em tracção indirecta (ITSR), ou seja, um valor da mesma ordem de grandeza do obtido no presente estudo.

No estudo efectuado por Batista *et al.* (2011), foram realizados ensaios para avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas para camadas de desgaste com porosidades distintas, com diferentes tipos de agregados e com betumes de diferentes penetrações. Para a execução dos ensaios considerou-se o método 104 da norma MIL-STD-620A, que era habitualmente utilizado em Portugal, e o método A da norma EN 12697-12:2008.

Considerando a mesma temperatura de ensaio (15 °C), verificou-se que os resultados determinados para a resistência conservada em tracção indirecta (ITSR) das misturas do tipo “Betão Betuminoso”, variam entre os 63 % e 100%, consoante o tipo de agregado e de betume utilizado. Para a mistura do tipo “Drenante”, os valores obtidos variaram entre os 70 % e 95 %.

Num estudo realizado por Silva *et al.* (2009), onde foram submetidas duas misturas betuminosas de alto módulo (MBAM), convencional e modificada com parafinas,   avalia o da sensibilidade   água segundo a norma europeia (EN 12697-12:2008), tendo-se obtido, respectivamente, valores de 86 % e 92 % para a resistência conservada. Neste estudo foi possível concluir ainda que, a utiliza o de parafinas não compromete a sensibilidade   água da mistura e também não prejudica a liga o agregado-ligante da mistura modificada.

Assim, o valor obtido no presente estudo para a resistência conservada em trac o indirecta (ITSR = 89 %), considera-se bastante satisfatório atendendo aos estudos referidos e a que o valor mínimo exigido no CETO para outro tipo de misturas (misturas com a utiliza o de betume modificado com alta percentagem de borracha),   de 75 %.

Depois de realizado o ensaio de trac o indirecta, fez-se a observa o do tipo de rotura dos provetes, sendo importante analisar por que razão se deu a sua rotura.

No Quadro 4.9, são apresentados os resultados relativos   observa o do tipo de rotura verificada. De acordo com o referenciado no capítulo anterior, esta rotura pode acontecer por trac o indirecta, deforma o do provete ou combinada (combina o das duas últimas).

Quadro 4.9 – Tipo de rotura dos provetes ensaiados

Tipo de mistura	Tipo de Provete	Identifica�o do Provete	Tipo de Rotura
SMA 12 Surf PMB 45/80-55	Provetes “a seco”	SMA_1	Combinada
		SMA_2	T. Indirecta
		SMA_6	T. Indirecta
	Provetes “imersos”	SMA_5	Combinada
		SMA_8	Combinada
		SMA_10	T. Indirecta

No que respeita à análise do tipo de rotura dos provetes “secos” (Quadro 4.9), verificou-se que, de uma forma geral, a rotura deu-se por tracção indirecta, apresentando uma linha de deformação evidente. No entanto no grupo dos provetes “imersos”, verificaram-se duas situações de rotura combinada, sendo esta uma característica que se pode relacionar com a acção da água, que funciona como “força de rotura” entre o ligante e o agregado.

Após a ocorrência da rotura pode observar-se as condições do revestimento na superfície do agregado exposto e/ou a presença de agregado fracturado ou esmagado.

No que diz respeito à presença de agregados fracturados ou esmagados, é de notar que em todos os provetes ensaiados, esse fenómeno, foi de reduzida expressão. Quanto às condições do revestimento dos agregados pelo ligante betuminoso, verificou-se, nos provetes “imersos”, existirem, particularmente, alguns agregados sem revestimento.

4.6 Avaliação do escoamento do ligante (*Binder Drainage*) segundo a norma EN 12697-18:2004

Conforme referido anteriormente, não foram realizados ensaios de determinação do escoamento do ligante da mistura betuminosa estudada no presente trabalho. No entanto, apresenta-se seguidamente os resultados do ensaio de escoamento do ligante, realizado no LNEC, com uma mistura betuminosa do tipo SMA idêntica à caracterizada no presente estudo (Batista e Miranda, 2010).

O ensaio de escoamento do ligante foi realizado com base no método do cesto (descrito em 3.5.2) e de acordo com a norma europeia EN 12697-18:2004 (Figura 4.7). Para a realização do ensaio foram consideradas misturas com diferentes percentagens de betume modificado, concretamente $P_b = 5,5 \%$ e $P_b = 6,0 \%$, e com uma percentagem de 0,4 % de fibras de celulose.



Figura 4.7 – Ensaio de escorrimento segundo a norma europeia EN 12697-18:2004 – “Método do Cesto” (Batista e Miranda, 2010)

A norma relativa aos ensaios tipo iniciais para marca o CE de misturas betuminosas (EN 13108-20:2008), não preconiza uma temperatura para a realiza o deste ensaio. No entanto a norma do ensaio (EN 12697-18:2004) que, para betumes modificados deverá ser adoptada a temperatura de fabrico da mistura, definida pelo fornecedor do betume, neste caso 160  C, acrescida de 15  C. De acordo com o referido, a temperatura de ensaio foi 175  C.

No Quadro 4.10, apresenta-se os resultados obtidos no ensaio de escorrimento do ligante (Batista e Miranda, 2010).

Quadro 4.10 – Resultados do ensaio de escorrimento do ligante segundo EN 12697-18:2004 – “Método do Cesto”

Tipo de mistura	Temperatura de ensaio (�C)	P _b (%)	Fibras de celulose (%)	D (%)
SMA 12 Surf PMB 45/80-55	175	5,5	0,4	0
		6,0	0,4	0

Legenda: P_b – Percentagem de betume; D – Valor médio do escorrimento do ligante

Analisando os resultados dos ensaios, verifica-se que para percentagens de betume de 5,5 % e 6,0 %, com 0,4 % de fibras de celulose, não existiu escorrimientos da mistura (D=0 %). Assim, de acordo com a norma EN 13108-5:2006, a mistura assume a categoria D_{0,3} para o escorrimiento do ligante.

Num estudo realizado por Fonseca *et al.* (2009), no âmbito da aplicação de uma mistura do tipo SMA na pista do Autódromo Internacional do Algarve, verificou-se que, segundo o método de *Schellenberg* preconizado na norma EN 12697-18:2004, para uma percentagem de ligante de 6,5 % e um teor de fibras de celulose de 0,45 % (sobre peso total da mistura), obtiveram-se valores para o escorrimiento do ligante de 0,14 %. Analisando este valor de acordo com a norma EN 13108-5:2006, temos a categoria D_{0,3} (0,14 % < 0,30 %) para o ensaio de escorrimiento do ligante.

No estudo elaborado por Vale *et al.* (2006), segundo a norma americana AASHTO T-305/97, para avaliação do escorrimiento do ligante, considerando uma mistura SMA com betume 50/70, uma temperatura de ensaio de 180 °C e diferentes percentagens de fibras, obtiveram-se os resultados expressos no Quadro 4.11.

Quadro 4.11 – Ensaio de escorrimiento segundo a norma americana AASHTO T-305/97 (Vale *et al.*, 2006)

Tipo de mistura	Temperatura de ensaio (°C)	Tipo de fibra	Percentagem de fibras (%)	Escorrimiento (%)
SMA 12 50/70	180	Sem fibras	0	0,70
		Celulose	0,30	0,03
		Celulose	0,50	0,02
		Coco	0,30	0,30
		Coco	0,50	0,25
		Coco	0,70	0,09

Embora o estudo de Vale *et al.*, (2006), para avalia o do escorrimento do ligante, contemple apenas a norma americana, dada a semelhança dos procedimentos dos ensaios, analisou-se os resultados segundo as exigências da norma europeia, considerando o método do cesto (*Basket Method*). De acordo com a norma EN 13108-5:2006, podemos atribuir, por exemplo, as categorias de $D_{1,0}$, para a misturas sem adi o de fibras e de $D_{0,3}$ para as misturas com adi o de 0,30% de fibras de celulose e 0,50 % de fibras de coco. No caso da mistura com 0,30 % de fibras de coco a categoria atribuída será $D_{0,6}$.

Denote-se que nos provetes sem a adi o de fibras, obteve-se o valor de 0,70 % para o escorrimento, concluindo-se, que o uso de fibras   determinante para evitar o escorrimento do ligante em misturas do tipo SMA.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

No presente capítulo, apresentam-se as principais conclusões obtidas no âmbito do estudo desenvolvido para avaliação da utilização de fibras em misturas betuminosas. Neste âmbito, foram descritas algumas fibras existentes no mercado, passíveis de utilização em misturas betuminosas.

A utilização de fibras no contexto da pavimentação está, basicamente, associada ao fabrico de um tipo específico de mistura betuminosa, o *Stone Mastic Asphalt*. Este tipo de mistura não é frequentemente utilizado em Portugal, nem equacionado no Caderno de Encargos Tipo da Obra das Estradas de Portugal. Contudo, os resultados provenientes de diversos estudos e da sua aplicação nos restantes países da Europa, comprovam a sua elevada eficácia e desempenho em vias com elevado tráfego de pesados e em aeroportos.

Verificou-se que a adição de fibras é fundamental para a viabilidade e aplicação de misturas betuminosas do tipo SMA. Estas permitem incrementar a percentagem de ligante para colmatar os vazios apresentados na granulometria descontínua dos agregados, reflectindo-se na melhoria do desempenho do pavimento, optimização da resposta face à variação das acções do tráfego e das condições climáticas e garantia da estabilidade da mistura durante o seu transporte e compactação.

As fibras de celulose são as mais utilizadas no fabrico de misturas do tipo SMA e são, em paralelo com as fibras de celulose com ceras, as que apresentam melhores vantagens a nível da homogeneidade, trabalhabilidade e de desempenho das misturas betuminosas.

A norma NP EN 13108-20:2008 especifica os ensaios tipo para caracterização dos materiais utilizados no fabrico da mistura betuminosa. Neste trabalho teve-se em

consideração as condições descritas pela norma referida na realização do estudo experimental para avaliar o desempenho da mistura com a adição de fibras.

Para a realização dos ensaios consideraram-se provetes obtidos de carotes de um pavimento betuminoso, onde foi aplicada uma mistura do tipo SMA 12 50/70. Os ensaios realizados em laborat  rio consistiram na avaliação do desempenho da mistura, de acordo com as exig  ncias das respectivas normas de ensaio.

Atrav  s dos resultados obtidos no estudo experimental realizado, registam-se as seguintes conclus  es:

- atrav  s da realização do ensaio de tracção indirecta, obteve-se o valor m  dio de 3090 MPa para o m  dulo de rigidez da mistura. Foi efectuada uma an  lise comparativa e verificou-se que o valor obtido    coerente com os valores apresentados noutros estudos. Refere-se, tamb  m, que no trabalho desenvolvido por Neves e Correia (2006), onde foi determinado o m  dulo de uma mistura tipo bet  o betuminoso com recurso ao mesmo tipo de ensaio, verificou-se que o valor m  dio para o m  dulo de rigidez da mistura foi da ordem de 5200 MPa. Assim, executada uma analogia entre os valores obtidos nos dois estudos,    espect  vel que as misturas betuminosas do tipo SMA apresentem valores ligeiramente inferiores devido    maior percentagem de betume;
- os resultados obtidos no ensaio de compress  o triaxial, realizado segundo a norma EN12697-25:2006, apontam que, embora as misturas SMA apresentem maior teor de betume, a resist  ncia gerada pelo imbricamento das part  culas do agregado grosso desencadeia uma resposta positiva    acção do trafego, resultando num bom comportamento da mistura    deformação permanente. Na realização deste ensaio    importante definir o valor da tens  o de confinamento, sendo que se esta for muito elevada, os valores da deformação permanente diminuem (Baptista, 2006). Embora tenham sido ensaiados poucos provetes, os resultados obtidos, para cada um dos provetes ensaiado, parecem ser satisfat  rios.

- na avaliação da sensibilidade à água, recorrendo ao ensaio de resistência conservada, segundo o método A da norma EN 12697-12:2004, registou-se o valor de 89% para a resistência conservada à tracção indirecta (ITSR), o que pode considerar-se bastante satisfatório. Embora o Caderno de Encargos Tipo da Obra ainda não apresente valores para o ITSR de mistura betuminosas do tipo SMA, efectuado uma análise com o valor mínimo de ITSR referido no documento para as misturas MBA-BBA e MBR-BBA (aplicadas em camada de desgaste), respectivamente 65 % e 75 %, confirma-se que o valor alcançado neste estudo é superior ao exigido;
- embora não tenham sido realizados ensaios de avaliação de escorrimento de ligante segundo a norma EN 12697-18:2004, apresentaram-se e comentaram-se os resultados do ensaio, realizado no LNEC, com uma mistura betuminosa do tipo SMA idêntica à caracterizada no presente estudo, verificando-se que a mistura não apresentava escorrimento . Acresce que, foram ainda apresentados resultados de diversos outros estudos, dos quais se concluiu que o uso de fibras é determinante para evitar o escorrimento do ligante em misturas do tipo SMA.

5.2 Trabalhos futuros

Os resultados obtidos e conclusões extraídas contribuem para um melhor aprofundamento dos conhecimentos da utilização de fibras em misturas betuminosas. Considera-se pertinente um aprofundamento do estudo deste tipo de mistura, de forma a encontrarem-se valores de referência e promover-se a sua utilização em Portugal, contemplando exigências e especificações de aplicação no Caderno de Encargos Tipo da Obra.

Deste modo, apresenta-se seguidamente, algumas linhas de orientação possíveis para a realização de trabalhos futuros:

- realizar estudos utilizando diversas percentagens de fibras, no processo de fabrico da mistura betuminosa, para avaliação da percentagem de fibra face ao valor do escorrimento da mistura;
- realizar ensaios de resistência à fadiga, efectuando estudos comparativos com outros tipos de misturas betuminosas aplicadas em camada de desgaste nos pavimentos rodoviários nacionais,
- estudar outros métodos de caracterização da resistência à deformação permanente, tendo em consideração a influência da temperatura e a percentagem de ligante;
- efectuar estudos de acompanhamento das obras em serviço, de forma a averiguar-se o comportamento e desempenho durante a sua vida útil.

Referências Bibliográficas

AIREY, G., CHOI, Y. (2002) – “*State of the art report on moisture sensitivity test methods for bituminous pavement materials*”. International Journal of Road Materials and Pavement Design, 3 pp 355-372.

Antunes, L. (2010) – “*Estudo de Misturas do tipo SMA com a Incorporação de Fibras Celulósicas. Enquadramento e objectivos*”. Jornada Técnica Misturas de Alto Desempenho. Laboratório Nacional de Engenharia de Lisboa. Lisboa.

APORBET (1998) – “*Misturas Betuminosas. Contribuição para a normalização do fabrico e da aplicação*”. APORBET – Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas.

AASHTO T-305/97 - *American Association of State Highway and Transportation Official T-305/97 – Draindown Sensivity.*

Baptista, A. (1999) – “*Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis – aplicabilidade em Portugal dos métodos existentes*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Especialidade em Engenharia Urbana. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra

Baptista, A. (2006) – “*Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central. Contribuição para o seu estudo e aplicação*”. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Batista, F. e Miranda, H. (2010) – “*Formulação de Misturas do tipo SMA com fibras*”. Jornada Técnica Misturas de Alto Desempenho. Laboratório Nacional de Engenharia de Lisboa, 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, Portugal.

Batista, F. e Antunes, M. (2009) – *“Ensaio de comparação interlaboratorial para avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas compactadas”*. Relatório LNEC nº181/2009, Processo 0702/01/17243.

Batista, F., Antunes, M., Teixeira, A., Ferreira, C., Gomes, V., Gomes, L. (2011) – *“Estudo da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas”*. XVI Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto. Rio de Janeiro, Brasil.

Batista, F., Antunes, M. e Fonseca, P. (2008) – *“Avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas com betume modificado com alta percentagem de borracha”*. V Congresso Rodoviário Português “Estradas 2008”, CRP, 10p.

Bernucci, L.; Motta, L.; Ceratti, J. e Soares, J. (2008) – *“Pavimentação asfáltica - Formação básica para engenheiros”*. PETROBRAS e ABEDA – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos. Rio de Janeiro, 2008.

Betunel (2008) – *“Revestimentos Asfálticos SMA”*. 6º Encontro Técnico DER-PR. Acedido a 20 de Outubro de 2011. Disponível em <http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/EncontrosTecnicos/6encontroTecnico/SMADERPR.pdf>.

Blazejowski, K. (2010) – *“Stone Matrix Asphalt: Theory and Practice”*. Taylor & Francis. Acedido a 20 de Agosto 2011. Disponível em http://books.google.com/books/about/Stone_Matrix_Aphalt.html?id=nAz_AnJTU8UC.

Branco, F., Pereira, P. e Santos, L.P. (2006) – *“Pavimentos Rodoviários”* (3ª Reimpressão). Almedina.

Brown, E., Haddock, L. (1997) – “*A method to ensure stone-on-stone contact in stone matrix asphalt paving mixtures.*” NCAT Report No. 97-2, USA.

Brown, E., Haddock, J., Lynn, T. e Mallick, R. (1997a) – “*Development of a Mixture Design Procedure for Stone Matrix Asphalt (SMA)*”. NCAT Report No. 97-3, USA.

Brown, E., Bukowski, J., Haddock, J. e Mallick, R. (1997b) – “*Performance of Stone Matrix Asphalt (SMA) – Mixtures in the United States*”. NCAT Report No. 97-1, USA.

Brown, E., Hurley, G., Prowell, B. e Watson, D. (2009) – “*Evaluation of Stone Matrix Asphalt (SMA) for Airfield Pavements*”. National Center for Asphalt Technology. USA.

Brown, E. e Mallick, R (1995) – “*Evaluation of Stone-on-Stone Contact in Stone-Matrix Asphalt*”. Transportation Research Record 1492, TRB, National Research Council, Washington, pp. 208-21

Caderno de Encargos Tipo Obra, Volume 14.03 (2011) – Estradas de Portugal, S.A. Acedido em 07 de Setembro de 2011. Disponível em <http://www.estradasdeportugal.pt/index.php/pt/areas-de-actuacao/empreendimentos>

Cooley, Jr. e Hurley, C (2004) – “*Potential of Using Stone Matrix Asphalt (SMA) in Mississippi*”. National Center for Asphalt Technology, USA.

COST 333 (1999). “*COST 333 – Development of new bitumous pavement design method – Final report of the action*”. Transport Research, European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research, European Commission, Directorate General Transport.

Campbell, C. (1999) – “*The Use of Stone Mastic Asphalt on Aircraft Pavements*” – Final report – Deakin University, Dubai.

Drüschner, L. e Schäfer, V. (2000) – “*Stone Mastic Asphalt*”. German Asphalt Association, Bonn.

EAPA (2001) – “*Asphalt in Figures*”. European Asphalt Pavement Association
Acedido a 18 de Julho de 2011. Disponível em <http://www.eapa.org>

EAPA (2007) – “*Long-Life Asphalt Pavements - Technical version*”. European Asphalt Pavement Association, Belgium.

EN 1427:2007 – *Bitumen and bituminous binders – Determination of the softening point - Ring and Ball method*

EN 12595:2007 – *Bitumen and bituminous binders – Determination of kinematic viscosity*

EN 12697-6:2003 + A1:2007 – *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens.*

EN 12697-12:2006 – *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 12 – Determination of the water sensitivity of bituminous specimens.*

EN 12697-18:2004 – *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 18: Binder drainage.*

EN 12697-23:2003 – *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens.*

EN 12697-24:2004 – *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 24: Resistance to fatigue.*

EN 12697-25:2005 – *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 25: Cyclic compression test.*

EN 12697-26:2004 – *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 26: Stiffness.*

EN 12697-29:2005 – *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 29: Determination of the dimensions of a bituminous specimen.*

EN 12697-35:2004 – *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 35: Laboratory mixing.*

EN 13043:2002 – *Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas.*

EN 13108-5:2006 – *Bituminous mixtures – Material specifications. Part 5: Stone Mastic Asphalt.*

EN 13108-7:2006 – *Bituminous mixtures – Material specifications. Part 7: Porous Asphalt.*

EN 13302:2010 – *Bitumen and bituminous binders – Determination of dynamic viscosity of bituminous binder using a rotating spindle apparatus*

Farrar, M. (2008) – “*Warm Mix Asphalt. White Paper*”. Acedido a 22 de Outubro de 2011. Disponível em:

http://www.westernresearch.org/uploadedFiles/Transportation_Technology/Pavement_Materials_Science/WRI%20Warm%20Mix%20Asphalt.pdf

Ferreira, C. (2009) – “*Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil Área de Especialização Engenharia Rodoviária, Universidade do Minho.

Filho, C. (2007) – “*Estudo do Efeito de Diferentes Granulometrias no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Densas Descontínuas Tipo Stone Matrix Asphalt (SMA)*”. Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes, Fortaleza, Brasil.

Fisipe (2011) – “*Folheto Promocional - Benefícios da Utilização do Asphalt +*” Acedido a 22 de Outubro 2011. Disponível em http://www.fisipe.pt/fotos/editor2/Folheto%20promocional_%20L60_asphal_pt.pdf

Fonseca, P., Guimarães, C., Ferreira, C., Catita, J. (2009) – “Autódromo Internacional do Algarve e características de desempenho da Mistura Betuminosa aplicada na pistas (Stone Mastic Asphalt)”. XV CILA Congresso Ibero-Latino do Asfalto, Lisboa, pp 405-415.

Freire, A. (2002) – “*Deformações Permanentes de Misturas Betuminosas em Pavimentos Rodoviários*”. Dissertação elaborada para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Gardete, D. (2006) – “*Comparação de Ensaios Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente*”. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Rodoviária. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Gatchalian, D. (2006) – “*Characterization of Aggregate Resistance to Degradation in Stone Matrix Asphalt Mixtures*”. Texas Transportation Institute. Report No. 204-1F. Texas.

IME (2011) – Instituto Militar de Engenharia. Acedido a 25 de Agosto 2011. Disponível em:

http://transportes.ime.eb.br/MATERIAL%20DE%20PESQUISA/LABOTATORIO/LAB%20LIGANTES/03_asfalto.htm.

InIR (2011) – “*Construção e Reabilitação de Pavimentos. Ligantes Betuminosos*”. Instituto Nacional de Infra-estruturas Rodoviárias. Acedido a 20 de Dezembro de 2011. Disponível em:

<http://www.inir.pt/portal/LinkClick.aspx?fileticket=cU2qC8H9SfU%3d&tabid=116&mid=487&language=pt-PT>.

InIR (2009) – “*Levantamento das características dos agregados produzidos em Portugal*”. Instituto Nacional de Infra-estruturas Rodoviárias, Coimbra.

Jahromi, S. (2008) – “*Carbon Fiber Reinforced Asphalt Concrete*”. Department of Civil Engineering Shahid Rajaei Teacher Training University. Tehran, Iran.

Karim, M., Katman, H, Mahrez, A. (2010) – “*Fatigue and Deformation Properties of Glass Fiber Reinforced Bituminous Mixes*”. Dept. of Civil Engineering University Malaya. Kuala Lumpur, Malaysia.

Lanchas, S. (2011) – “*Stone Mastic Asphalt - SMA & Fiberized Asphalt Mixtures - As Misturas de grande durabilidade e alto desempenho em Pavimentos de Aeroporto*”, Conferencia ANA, Lisboa.

LNEC (1962) – “*Vocabulário de Estradas e Aeródromos*”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

LNEC (1973) – “*Vocabulário de Estradas e Aeródromos*”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Mahmoud, E. (2005) – “*Development of experimental methods for the evaluation of aggregate resistance to polishing, abrasion, and breakage*”. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Ciências. Texas A&M University, College Station, USA.

Miranda, H.M.B. (2008) – “*Resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Alta Percentagem de Borracha*”. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Transportes. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.

Motta, L., Leite, L. (2000) – “*Efeito do Filer nas Características Mecânicas das Misturas Asfálticas*”. In: Anais do 11º Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte, pp. 1007-1017, Rio Grande do Sul, Brasil.

Mourão, F. (2003) – “*Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA*”. Dissertação de Mestrado. UFRJ, Rio de Janeiro.

NAPA (2002) – “*Designing and Constructing SMA Mixtures*” – State-of-the-Practice. National Asphalt Pavement Association, EUA.

Neves, C., Bernucci, L., Júnior, J. (2004) – “*Avaliação de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha quanto à deformação permanente*”. In: 18º. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro, pp 77-87.

Neves, C. e Correia, A. (2006) – “*Caracterização da Rigidez de Misturas Betuminosas em Ensaio de Tração Indirecta por Compressão Diametral de Provetes Cilíndricos*”. 26ª Revista de Engenharia Civil, Universidade do Minho, pp.61-74.

NP EN 1097-1:2011 – Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 1: Determinação da resistência ao desgaste micro-Deval.

NP EN 1097-2:2002 – Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: Métodos para determinação da resistência à fragmentação – Los Angeles.

NP EN 13108-20:2008 – Misturas Betuminosas. Especificações dos materiais Parte 20: Ensaio de Tipo.

Owende, P., Hartman, A., Ward, S., Gilchrist, M. e O'Mahony, M. (2001) – *“Minimizing distress on flexible pavements using variable tire pressure”*. Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 127, N.º 3, pp. 254-262.

Pank, H. (1995) – *“Finnish Asphalt Specifications”*. Finnish Pavement Technology Advisory Council.

Pellinen, T., Xiao, J., Shah, A. (2008) – *“The effect of aging on mechanical properties of hot-mix asphalt.”* International Society for Asphalt Pavements Symposium, 18th-20th August 2008, Zurich, Switzerland.

Pereira, F. (2009) – *“Estudo da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas”*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa

Putman, B. e Serji, N. (2004) - *“Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures”*. Resources, Conservation and Recycling 42, pp 265-274.

Shell (1990) – *“The Shell bitumen handbook”*. First Edition, Shell Bitumen, London, UK.

Shell (2003) – *“The Shell bitumen handbook”*. Fifth Edition, Thomas Telford Publishing, London, UK.

Silva, H. (2005) – *“Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique - Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas”*, Tese de Doutoramento em Vias de Comunicação. Universidade do Minho.

Silva, H. (2010) – *“Study on the use of Bituminous Mixtures Modified with Acrylic Fibres in Road Pavement Overlays”*. University of Minho. Guimarães, Portugal.

Silva, H., Oliveira, J., Souza, E. (2009) – “*Fabrico de Misturas Betuminosas de Alto Desempenho a Menores Temperaturas com Betume 35/50 e Parafinas*”. XV Congresso Ibero-Latino americano do Asfalto. Lisboa, Portugal, pp. 375-384.

Silva, P., Bernucci, L., Moura, E. e Leite, L. (2006) – “*Estudo em Laboratório de Misturas Asfálticas SMA 0/8S e SMA 0/16*”. V Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias. Recife-PE, Brasil.

Souza, J (2007) – “*Comportamento de Misturas Asfálticas a Quente com Agregados Provenientes de Jazidas de Seixo no Estado do Pará*”. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Paraíba.

Vale, A., Pinto, I., Soares, J. e Dantas, S. (2006) – “*Estudo Laboratorial da Viabilidade do Uso de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas do Tipo SMA*”. In: Anais do 18º Encontro de Asfalto, artigo IBP0049_06. Rio de Janeiro, Brasil.

Vale, A. (2007) – “*Estudo Laboratorial da Viabilidade do uso de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas do tipo SMA*”. Dissertação submetida ao Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Brasil.

Zaumanis, M. (2010) – “*Warm Mix Asphalt Investigation*”. Master of Science Thesis. Technical University of Denmark. Kgs.Lyngby, Denmark.