



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Avaliação da influência da ação da água nas misturas betuminosas drenantes

Liliana Patrícia Ferreira Brejo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(Ciclo de estudos Integrado)

Orientadora: Prof.^a Doutora Marisa Dinis de Almeida

Covilhã, junho de 2016

Ao meu avô, Francisco Brejo (*in memoriam*),
da tua *petite fille*.

Agradecimentos

A presente dissertação foi elaborada na Universidade da Beira Interior (UBI), na Covilhã, no Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA), sob a orientação da Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida, Professora Auxiliar da Universidade da Beira Interior.

Chegada a esta fase, agradeço a quem permitiu que esta dissertação se realizasse, quer com a sua colaboração, quer em todo o apoio e palavras de incentivo dado ao longo deste ano e de todo o meu percurso académico. Aqui manifesto o meu sincero e humilde obrigada.

À minha orientadora, Professora Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida fico-lhe grata por toda a orientação e disponibilidade que sempre demonstrou. Agradeço-lhe a amizade, o apoio, incentivo e motivação que sempre estiveram presentes tendo sido essenciais para a realização e finalização deste trabalho.

À Universidade da Beira Interior, pelo contributo e acolhimento durante a minha formação e pelos recursos colocados à disposição na realização desta dissertação.

Agradeço a todos os professores, colegas e restantes elementos do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, de quem sempre recebi simpatia e amizade.

Agradeço à Márcia e ao Ricardo, a companhia e contributo em todo o trabalho experimental. Este pautou pelo bom humor e leveza devido à vossa presença, pois apesar de todos os contratemplos, o apoio prestado e companheirismo tornou este ano bem mais divertido. Desejos de um futuro risonho e promissor.

À CEPESA Portuguesa S.A., expresso o meu agradecimento pelos betumes fornecidos e pelo seu contributo para a realização deste trabalho.

Ao Sr.º Engenheiro Fernando Martinho, fico-lhe grata pela constante disponibilidade e simpatia no esclarecimento de várias questões, bem como por fornecer prontamente as fibras celulósicas utilizadas na presente dissertação.

Ao Sr.º Albino, Sr.º Félix e Sr.º Luciano, técnicos dos laboratórios de construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, agradeço a disponibilidade manifestada, preciosa contribuição e momentos de boa disposição no decorrer de todo o trabalho experimental.

Aos meus professores dos diversos ciclos de ensino e Erasmus. Professora Maria de Fátima Filipe, Professor Alves Jana e Professor Marcin Górski. Fontes de inspiração e admiração contínua, seres humanos ímpares.

À Sofia B. que me fez aprender a gostar da língua inglesa, a não ter medo de alargar horizontes e a sair da zona de conforto. Obrigada.

Aos meus amigos de Abrantes e Lisboa que apesar das minhas ausências estão sempre lá!

Às minhas amigas e colegas de casa na saudosa cidade da Covilhã. Cláudia, Anabela, Ângela e Mariana. O meu obrigada! Por muitas aventuras e pela amizade.

Ao melhor grupo de trabalho e amigos, Ana Josefa Dias, Norberto Gomes e João Libério, desejo-vos o melhor e nunca esquecerei os anos passados juntos na Covilhã.

Ao Fernando Pinto. Obrigada e desejos do melhor para o teu futuro.

Às melhores pessoas que poderia ter conhecido na Dinamarca, Juan M., Eva V., Justyna P., André A., Kelly P., Mark S., Thibaud F., Irene R., María R., ... E na Polónia, Rafał e Tomek G., Mikołaj B. e todos os seus amigos, Kasia G., Magdalena B., Patryk K. e Daniel L., Arek D., Karolina J., Richi M., Roman J. e Filip F. O meu coração está um pouco espalhado por todo o mundo e não vos esquecerei. Ensinaram-me e contribuíram a ser quem sou hoje.

Um agradecimento a toda a minha família, pela presença, encorajamento e ânimo. Em especial ao meu tio, Rui Ferreira, a inspiração para o meu percurso. Agradeço-te por todo o apoio e incentivo.

Aos meus pais que sempre me incentivaram a ir mais além. Acompanharam-me nos bons e maus momentos. Cada um inspira-me com os seus traços de personalidade que me orgulho de identificar, alguns, em mim própria.

À minha irmã que admiro pela personalidade forte, persistência e força. Admiro-te pelo que és e pelo que te tornarás. Acredito em ti!

Por fim ao meu avô, que apesar de não estar presente me acompanhou todos estes anos.

Intelligence is the ability to adapt to change.

Stephen Hawking

Resumo

Em virtude das mudanças climáticas globais que se têm vindo a sentir nas últimas décadas, cada vez mais observam-se fortes precipitações no nosso país e em vários locais do mundo. A aplicação de misturas betuminosas drenantes nas camadas de desgaste em rodovias tem como objetivo controlar o escoamento superficial e, conseqüentemente, aumentar a sua segurança de circulação. Recentemente, a aplicação destas camadas tem aumentado verificando-se o seu uso principalmente na Europa e Estados Unidos da América.

As misturas betuminosas drenantes são aplicadas na camada de desgaste dos pavimentos rodoviários devido às muitas vantagens que apresentam, tais como, o aumento da segurança de circulação durante a precipitação e a redução do ruído. Graças à sua estrutura com elevada porosidade, as misturas betuminosas drenantes permitem que a água seja drenada e percolada no seu interior, sendo escoada para a berma ou para sistemas de drenagem apropriados adjacentes à camada, o que reduz os efeitos de pulverização, aumentando a visibilidade dos condutores durante os períodos de chuva. Contudo, e apesar das vantagens descritas anteriormente, a aplicação destas camadas possui algumas limitações. As grandes desvantagens das misturas betuminosas drenantes são a colmatação dos seus vazios e a sua durabilidade. Muitos dos efeitos funcionais negativos resultam do prejuízo que as águas superficiais provocam na segurança e nível de serviço de circulação. Para melhorar a qualidade das misturas betuminosas drenantes vários estudos e pesquisas têm sido realizados por todo o mundo.

A presente dissertação incide o seu estudo na avaliação da influência da ação da água nas misturas betuminosas drenantes e do efeito da adição de fibras celulósicas na sua composição, comparando o seu desempenho com as misturas drenantes sem esta adição. Inicialmente, realizou-se a sua formulação baseada na baridade, na porosidade e na perda de massa por desgaste, efetuada através do ensaio cântabro seco e imerso, obtendo-se o teor ótimo de ligante betuminoso. A avaliação destas misturas realizou-se através dos ensaios de determinação do módulo de rigidez por tração indireta, sensibilidade à água e permeabilidade. Através do trabalho laboratorial concluiu-se que as fibras celulósicas contribuem para a melhoria das propriedades de coesão e reforçam as misturas betuminosas drenantes, permitindo um maior teor de ligante em relação às misturas sem esta adição. Este fator revelou-se bastante importante para as camadas de desgaste drenantes, sendo que um teor de ligante betuminoso mais elevado forma uma película mais espessa em torno dos agregados que aumenta a durabilidade destas misturas.

Palavras-chave

Fibras celulósicas; Mistura betuminosa drenante; Ensaio Cântabro; Permeabilidade; Sensibilidade à água.

Abstract

The increase in rainfall figures over the past decades, in our country and many parts of the world, has been a result of global climate change. The recent increase in the use of porous asphalt, particularly in Europe and the United States of America, is due to its efficiency in controlling runoff and safety on roads.

Porous asphalt mixtures are applied to the surface layer of roads due to the many advantages that they bring, such as increased traffic safety during precipitation and noise reduction. Due to its structure with high void content, porous asphalt allows water to be drained and percolated within, being disposed to the side or to appropriate drainage systems adjacent to this layer, which reduces spray effects, increasing the driver's visibility during periods of rain. However, despite the advantages described above, the application of these layers has some limitations. The major disadvantages of porous asphalt mixtures are clogging and durability. Many of the negative functional effects on the surface result from water damages causing losses in traffic safety and road service level. To improve the quality of porous asphalt much research and several studies have been conducted throughout the world.

This dissertation focuses on the assessment of the influence of the action of water in porous asphalt mixtures and the effect of the addition of cellulosic fibers in its composition, comparing its performance with the porous asphalt mixtures without this addition. First, there was its formulation based on bulk density, air voids and particle loss, made through the dry and immerse cantabro particle loss test, obtaining the optimal content of bituminous binder. The evaluation of these mixtures was performed by tests for determining indirect tensile stiffness modulus, water sensitivity and permeability. Through the laboratory work, it was concluded that cellulosic fibers contribute to the improvement of cohesion properties and enhance the porous asphalt mix, allowing an increased binder content compared to the mixtures without this addition. This factor appears to be very important for superficial porous asphalt layers, and a higher content of bituminous binder forms a thicker film that enhances the durability of these mixtures.

Keywords

Cellulosic fibers; Porous asphalt; Cantabro particle loss; Permeability; Water sensitivity.

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da Dissertação	2
Capítulo 2 - Estado de Arte sobre Misturas Betuminosas Drenantes	5
2.1 Introdução	5
2.2 Objetivos das misturas betuminosas drenantes	5
2.3 Características das misturas betuminosas drenantes	7
2.4 Vantagens e desvantagens	12
2.4.1 Vantagens	12
2.4.2 Desvantagens	12
2.5 Origem das misturas betuminosas drenantes	13
2.5.1 Experiência estrangeira	14
2.5.2 Portugal	26
2.6 Efeito da incorporação de fibras em misturas betuminosas drenantes	27
2.6.1 Objetivo	27
2.6.2 Tipos de fibras	29
2.6.3 Aplicação de fibras nas misturas betuminosas drenantes	35
Capítulo 3 - Aspectos relativos à ação da água nas camadas betuminosas drenantes	41
3.1 Introdução	41
3.2 Consequências da presença de água na degradação das misturas	42
3.2.1 Perda de adesividade	43
3.2.2 Perda de coesão	46
3.2.3 Degradação/fratura de partículas de agregado quando sujeitos a congelamento	50
3.2.4 Patologia associada à presença de água	51
3.3 Caracterização da sensibilidade à água e da permeabilidade	52
3.3.1 Sensibilidade à água	52
3.3.2 Permeabilidade	55
Capítulo 4 - Trabalho Experimental	59
4.1 Introdução	59
4.2 Caracterização dos materiais utilizados	60
4.2.1 Agregados naturais	60
4.2.2 Análise granulométrica	61

4.2.3 Massa volúmica	62
4.2.4 Cal hidráulica	64
4.2.5 Ligante betuminoso	64
4.2.6 Fibras celulósicas - <i>Viatop® Premium</i>	65
4.3 Estudo da composição das misturas betuminosas	66
4.3.1 Fuso granulométrico	66
4.3.2 Estimativa do teor de betume	68
4.3.3 Determinação do teor ótimo de betume	69
4.4 Influência da temperatura nas misturas com adição de fibras - Ensaio cântabro	81
4.5 Caracterização das misturas betuminosas	82
4.5.1 Módulo de rigidez por tração indireta	82
4.5.2 Ensaio de sensibilidade à água	84
4.5.3 Ensaio de permeabilidade	89
Capítulo 5 - Considerações Finais	93
5.1 Conclusões	93
5.2 Trabalhos Futuros	95
Referências Bibliográficas	97
Acervo Normativo	107

Lista de Figuras

Capítulo 2 - Estado de Arte sobre Misturas Betuminosas Drenantes

Figura 2.1 - Contacto pneu-pavimento em a) mistura betuminosa densa e b) mistura betuminosa drenante	6
Figura 2.2 - Exemplos de drenagem de águas pluviais na autoestrada A1 (Portugal)	7
Figura 2.3 - Percolação da água pela camada drenante	7
Figura 2.4 - Tipos de poros da mistura drenante	8
Figura 2.5 - Diferenças entre as misturas betuminosas densas e drenantes	9
Figura 2.6 - Superfície de camada betuminosa densa e superfície de camada betuminosa drenante	9
Figura 2.7 - Sistema de dupla-camada	10
Figura 2.8 - Pavimento com dupla camada	11
Figura 2.9 - Linha de água perceptível durante período chuvoso na <i>Tokyo Bay</i> , Japão	18
Figura 2.10 - Reabilitação - aplicação de camada betuminosa drenante em troço do IC9	27
Figura 2.11 - Diferenças entre misturas a) sem e b) com adição de fibras	28
Figura 2.12 - Fibras celulósicas	30
Figura 2.13 - Aspeto de a) celulose, b) fibras celulósicas com betume, c) granulado de fibras celulósicas revestidas com betume - <i>Viatop® Premium</i>	30
Figura 2.14 - Exemplos de fibras granulares celulósicas a) Arbocel, b) Viatop® AD10 e c) Viatop® 66	31
Figura 2.15 - Pormenor de fibras poliméricas sintéticas: polipropileno e aramida	32
Figura 2.16 - Drenagem livre de camada betuminosa drenante em autoestrada em <i>South Auckland</i> - Nova Zelândia	36

Capítulo 3 - Aspetos relativos à ação da água nas camadas betuminosas drenantes

Figura 3.1 - Drenagem superficial	41
Figura 3.2 - Mistura betuminosa drenante	42
Figura 3.3 - Ilustração dos danos causados pela presença de água na mistura	42

Figura 3.4 - Adesão betume-agregado	44
Figura 3.5 - Tipos de degradação das misturas betuminosas drenantes	46
Figura 3.6 - Pressão da água nos poros	47
Figura 3.7 - Efeitos do envelhecimento a curto e longo prazo do ligante relacionando a viscosidade com o período de envelhecimento	49
Figura 3.8 - Tipos de rotura	54
Figura 3.9 - Permeâmetro LCS	55
Figura 3.10 - Ensaio de permeabilidade a) vertical e b) horizontal	56
Capítulo 4 - Trabalho Experimental	
Figura 4.1 - Brita 5/10	60
Figura 4.2 - Brita 5/15	60
Figura 4.3 - Pó de Pedra 0/4	60
Figura 4.4 - Agregados a ser peneirados	61
Figura 4.5 - Análise granulométrica	61
Figura 4.6 - Curvas granulométricas dos agregados	62
Figura 4.7 - a) Pesagem hidrostática e b) secagem de agregados grossos	63
Figura 4.8 - Picnómetro a gás hélio - Modelo <i>AccuPyc™</i> 1330	63
Figura 4.9 - Cal Hidráulica	64
Figura 4.10 - Fibras <i>Viatop® Premium</i>	65
Figura 4.11 - Fuso Granulométrico e curva das misturas betuminosas drenantes finas	67
Figura 4.12 - Fuso Granulométrico e curva das misturas betuminosas drenantes grossas	68
Figura 4.13 - Moldes <i>Marshall</i> (base, molde e colar)	70
Figura 4.14 - Estufa	70
Figura 4.15 - Produção de mistura betuminosa drenante a quente	71
Figura 4.16 - Moldagem da mistura betuminosa drenante	71
Figura 4.17 - a) Compactador de impacto (DECA-UBI) b) Compactação de provetes c) Desmolde de provetes	72

Figura 4.18 - Provetes da mistura betuminosa drenante fina a) com fibras b) sem fibras	72
Figura 4.19 - Provetes da mistura betuminosa drenante grossa a) com fibras b) sem fibras	72
Figura 4.20 - Representação gráfica das baridades médias das misturas betuminosas drenantes PA 12,5 a) finas MFF e MFSF e b) grossas MGF e MGSF	73
Figura 4.21 - Representação gráfica das porosidades das misturas betuminosas drenantes PA 12,5 a) finas MFF e MFSF e b) grossas MGF e MGSF	75
Figura 4.22 - Grupo de provetes a) seco e b) imerso	77
Figura 4.23 - Provetes do grupo seco e imerso em estufa (DECA - UBI)	77
Figura 4.24 - Ensaio da perda por desgaste com o tambor de <i>Los Angeles</i> (DECA - UBI)	77
Figura 4.25 - Exemplo de provete a) antes e b) após ensaio cântabro	78
Figura 4.26 - Resultados do ensaio cântabro para misturas betuminosas finas	79
Figura 4.27 - Resultados do ensaio cântabro para misturas betuminosas grossas	79
Figura 4.28 - Resultados do ensaio cântabro imerso a 20 e 60 °C das misturas MFF e MGF	82
Figura 4.29 - a) Equipamento NAT e b) Esquema do equipamento utilizado para o ensaio de tração indireta	83
Figura 4.30 - Ensaio de tração indireta em compressão diametral no NAT (DECA-UBI)	83
Figura 4.31 - Provetes do segundo grupo submetidos a vácuo (DECA - UBI)	85
Figura 4.32 - Ensaio à tração indireta (DECA - UBI)	85
Figura 4.33 - Provete ensaiado a) antes e b) após a aplicação da carga diametral	87
Figura 4.34 - Ensaio com recurso ao permeâmetro LCS adaptado - Permeabilidade horizontal	89
Figura 4.35- Ensaio de permeabilidade vertical	90
Figura 4.36 - Provete com face inferior parafinada	90
Figura 4.37 - Ensaio de permeabilidade horizontal	91

Lista de Quadros

Capítulo 2 - Estado de Arte sobre Misturas Betuminosas Drenantes

Quadro 2.1 - Vantagens e desvantagens dos tipos de fibras comuns na aplicação em misturas	33
Quadro 2.2 - Estados e distritos que indicam o uso de fibras em várias aplicações	35

Capítulo 3 - Aspectos relativos à ação da água nas camadas betuminosas drenantes

Quadro 3.1 - Fatores que influenciam a coesão e a adesão nas misturas betuminosas drenantes	50
Quadro 3.2 - Categorias para a resistência conservada em tração indireta - ITSr	54
Quadro 3.3 - Categorias para a Permeabilidade vertical (K_v) e horizontal (K_h)	57

Capítulo 4 - Trabalho Experimental

Quadro 4.1 - Massa volúmica dos agregados	63
Quadro 4.2 - Características do betume modificado Elaster® 13/60	65
Quadro 4.3 - Características do granulado	66
Quadro 4.4 - Características do betume incluído no granulado	66
Quadro 4.5 - Características da fibra	66
Quadro 4.6 - Percentagem dos materiais constituintes das misturas betuminosas produzidas	67
Quadro 4.7 - Percentagens de betume	69
Quadro 4.8 - Formulações das misturas betuminosas drenantes	69
Quadro 4.9 - Baridade máxima teórica das misturas betuminosas	74
Quadro 4.10 - Formulação final das misturas betuminosas drenantes	81
Quadro 4.11 - Características de cada uma das misturas betuminosas drenantes a quente	81
Quadro 4.12 - Resultados obtidos do ensaio de tração indireta em compressão diametral	84
Quadro 4.13 - Baridade média dos grupos de provetes	84

Quadro 4.14 - Resultados obtidos do ensaio de sensibilidade à água, a 15 °C	86
Quadro 4.15 - Categorias para a resistência conservada em tração indireta (ITSR) obtidas	87
Quadro 4.16 - Caracterização do tipo de rotura dos provetes ensaiados	88
Quadro 4.17 - Resultados obtidos do ensaio de permeabilidade	92
Quadro 4.18 - Categorias de permeabilidade vertical e horizontal	92

Lista de Acrónimos

Letras Gregas

$\rho_{b,dim}$	Baridade do provete saturado com superfície seca
ρ	Massa volúmica do agregado
ρ_{a1}	Massa volúmica do agregado 1
ρ_{a2}	Massa volúmica do agregado 2
ρ_b	Massa volúmica do ligante; Baridade geométrica do provete
ρ_m	Baridade máxima teórica da mistura betuminosa
$\rho_{m\acute{a}x}$	Baridade máxima teórica
ρ_w	Massa volúmica da água à temperatura de ensaio

Letras Romanas

a	Área da secção do permeâmetro
A_p	Área da secção do provete
A	Percentagem de agregados retidos no peneiro 2,36 mm
B	Percentagem de agregados que passa no peneiro 2,36 mm e fica retida no peneiro 0,075 mm
C	Percentagem de agregados que passa no peneiro 0,075 mm
D	Dimensão máxima em mm
d	Diâmetro do provete
dB	Decibéis
F	Fator de absorção dos agregados (entre 0 e 2 %), na falta de informação utiliza-se $F = 0,7 \%$
h	Altura do tubo; Altura do provete
h_1	Altura de água da face inferior do provete no início do ensaio
h_2	Altura de água da face inferior do provete no fim do ensaio
ITS	Resistência à tração indireta
ITS_d	Resistência à tração indireta dos provetes secos
ITSR	Resistência conservada em tração indireta
ITS_w	Resistência à tração indireta dos provetes imersos
k	Coefficiente de permeabilidade
K	Constante em função da quantidade de material que passa no peneiro 0,075 mm
K_h	Coefficiente de permeabilidade horizontal
K_v	Coefficiente de permeabilidade vertical
M_1	Massa do agregado saturado com superfície seca
m_1	Massa do provete seco
M_{2a}	Massa do cesto metálico com o agregado saturado, imerso em água
M_{3a}	Massa do cesto metálico vazio, imerso em água
P	Resistência máxima média
PA	Provetes secos, conservados à temperatura ambiente
p_{a1}	Percentagem do agregado 1 na mistura
p_{a2}	Percentagem do agregado 2 na mistura

P_b	Percentagem de betume em relação ao peso total da mistura
PL	Valor da perda de partículas
PS	Provetes imersos, conservados em água
r	Raio interno do tubo
t_v	Tempo de escoamento de 1735 cm ³
UV	Ultravioleta
V	Volume de escoamento
V_m	Porosidade da mistura
W_1	Massa da amostra inicial
W_2	Massa da amostra final

Siglas

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ACFC	<i>Asphalt Concrete Friction Course</i>
APA	<i>Asphalt Pavement Alliance</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBd	Betão betuminoso drenante
BBDr	<i>Beton Bitumineux Drainantes</i>
CE	Marcação CE
CEDEX	<i>Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas</i>
COST	<i>European Cooperation in Science and Technology</i>
CPA	Camada Porosa de Atrito
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
DIRENG	Diretoria de Engenharia da Aeronáutica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DOTs	<i>Departments of Transportations</i>
EAPA	<i>European Asphalt Pavement Association</i>
EN	<i>European Standard</i>
EP	Estradas de Portugal, S.A.
EUA	Estados Unidos da América
EVA	Etileno-acetato de vinilo
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
InIR	Instituto Nacional de Infraestruturas Rodoviárias
JH	<i>Japan Highway Public Corporation</i>
JRS	<i>J. Rettenmaier & Söhne</i>
LCS	<i>Laboratorio de Caminos de Santander</i>
LID SWM Guide	<i>Low Impact Development Stormwater Management Planning and Design Guide</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MF	Mistura Fina
MFF	Mistura Fina com Fibras
MFSF	Mistura Fina sem Fibras
MG	Mistura Grossa
MGF	Mistura Grossa com Fibras
MGSF	Mistura Grossa sem Fibras
NAPA	<i>National Asphalt Pavement Association</i>

NAT	<i>Nottingham Asphalt Tester</i>
NCAT	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
NF	<i>Norme française</i>
NLT	<i>Normas del Laboratorio de Transportes</i>
NP	<i>Norma Portuguesa</i>
NP EN	<i>Norma Portuguesa baseada na Norma Europeia</i>
OGFC	<i>Open-Graded Friction Course</i>
PA	<i>Porous Asphalt</i>
PEM	<i>Permeable European mix</i>
PET	<i>Politereftalato de etileno</i>
PFC	<i>Porous Friction Course</i>
PG-3	<i>Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes</i>
PMB	<i>Polymer Modified Bitumen</i>
RT	<i>Rise Time</i>
SBS	<i>Estireno-butadieno-estireno</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SiO ₂	<i>Sílica</i>
SMA	<i>Stone Mastic Asphalt</i>
SN	<i>Swiss standard</i>
TRL	<i>Transportation Research Laboratory</i>
UBI	<i>Universidade da Beira Interior</i>
UNHSC	<i>University of New Hampshire Stormwater Center</i>

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Enquadramento do tema

Nos dias de hoje, devido à instabilidade do clima, saber as condições atmosféricas com que o utente se irá deparar ao longo do percurso é uma incógnita podendo este ser surpreendido por fortes aguaceiros, não só na estação de inverno como em qualquer altura do ano. Na condução noturna, em condições de chuva, com o piso molhado acresce um outro perigo, o encandeamento. Com o pavimento denso convencional, ou ainda em pavimento gasto e a necessitar de manutenção ou reabilitação, o reflexo da luz emitida pelos faróis dos veículos ao projetarem no pavimento encandeiam o condutor de outro veículo sendo um dos fatores de sinistralidade rodoviária. Tomando como exemplo as estradas portuguesas, maioritariamente constituídas por pavimentos densos convencionais, em tempo de chuva apresentam menor atrito e menor dissipação de energia, aumentando a distância de travagem e paragem dos veículos. Em particular, nas zonas de proximidade das curvas, a acumulação de água no pavimento pode causar a perda de controlo da direção do veículo, originando a aquaplanagem. Através da aplicação de uma camada betuminosa drenante, na camada de desgaste do pavimento, estas situações podem ser minimizadas ou até dissipadas.

As misturas betuminosas drenantes constituem uma das melhores opções para a pavimentação da camada de desgaste, uma vez que oferecem vantagens, em comparação com misturas betuminosas classificadas como densas, em termos de segurança, economia e meio ambiente. Em virtude das vantagens descritas, as misturas betuminosas drenantes aplicadas em camadas de desgaste são empregues em todo o mundo, sendo apresentado nesta dissertação a análise documental e estado de arte acerca da evolução e das aplicações deste tipo de misturas em vários países, inclusive em Portugal.

A camada de desgaste sendo a mais superficial de um pavimento está sujeita à ação direta do tráfego e à ação dos agentes climatéricos, para tal, e durante a sua formulação é necessário ter em conta que as características desta camada dependem do tipo de materiais constituintes, sendo estes selecionados segundo o tipo de utilização do pavimento, idade e condições/agressões climáticas a que estará sujeito, sempre atendendo à aplicação de uma superfície cómoda e segura para a circulação de tráfego. Contudo, as solicitações a que os pavimentos estão sujeitos originam a sua progressiva degradação ao longo da sua vida útil. Além do mais, as misturas betuminosas drenantes, devido à sua granulometria descontínua, estão expostas ao ar e à água, portanto, mais suscetíveis aos danos causados por estes agentes. De modo a mitigar as limitações deste tipo de misturas têm sido efetuadas investigações com o objetivo de melhorar e aperfeiçoar o seu desempenho, nomeadamente com a incorporação de ligantes modificados, aditivos e/ou fibras.

A formulação destas misturas e a sua avaliação ainda necessitam de melhorias e padronização de modo a promover ainda mais a confiança no uso das mesmas. Esta dissertação pretende contribuir no conhecimento e desenvolvimento deste tipo de misturas, nomeadamente a sua formulação com ou sem a adição de fibras celulósicas, a sua caracterização, assim como avaliar o seu desempenho face à presença da água nas misturas a aplicar na camada de desgaste dos pavimentos.

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como principal objetivo a avaliação da influência da ação da água nas misturas betuminosas drenantes. Para tal, e de modo a complementar este estudo, são comparadas as características das misturas betuminosas drenantes com e sem a adição de fibras celulósicas na sua composição para camadas de desgaste de pavimentos rodoviários. É analisada a viabilidade técnica da utilização de fibras celulósicas em misturas betuminosas drenantes, sendo este estudo de comparação realizado através do recurso a ensaios laboratoriais. É efetuado o ensaio cântabro de modo a determinar o teor ótimo de betume, assim como para avaliar o efeito da temperatura no desempenho das misturas betuminosas drenantes com a adição de fibras. Posteriormente são realizados ensaios de caracterização, nomeadamente o ensaio para a determinação do módulo de rigidez por tração indireta, o ensaio de sensibilidade à água e o ensaio de permeabilidade das misturas betuminosas drenantes.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é estruturada e apresentada em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo, pretende-se enquadrar o tema a ser desenvolvido, procurando demonstrar-se a importância e objetivos do estudo e trabalho realizados.

No segundo capítulo é apresentado o estado de arte sobre misturas betuminosas drenantes. São abordados os objetivos e as características deste tipo de misturas, assim como apresentadas as vantagens e desvantagens da sua aplicação. Na secção seguinte é apresentada a origem, início e aplicação das misturas betuminosas drenantes em vários países, inclusive Portugal. Por último, são abordados os efeitos da incorporação de fibras em misturas betuminosas drenantes, em termos de objetivo do seu uso, tipos de fibras e aplicação de fibras nas misturas betuminosas drenantes em diferentes países.

O terceiro capítulo aborda os aspetos relativos à ação da água nas camadas betuminosas drenantes. São apresentadas as consequências da presença de água na degradação das misturas, nomeadamente a perda de adesividade, a perda de coesão e a degradação, ou fratura, de partículas de agregado quando sujeitas a congelamento. Nesta secção é ainda relatada a patologia associada à presença de água neste tipo de camadas. No final deste capítulo são descritos os ensaios mais usuais que caracterizam o desempenho das misturas

betuminosas drenantes na presença de água, sendo estes a sensibilidade à água e a permeabilidade da mistura, ensaios realizados na presente dissertação.

O quarto capítulo integra o trabalho experimental, realizado nos Laboratórios do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA) da Universidade da Beira Interior (UBI), onde são analisadas as características e materiais utilizados, efetuado o estudo da composição das misturas betuminosas drenantes e avaliada a influência da temperatura nas misturas com adição de fibras na sua composição, através da realização do ensaio cântabro imerso a 60 e 20 °C. Posteriormente, são descritos os ensaios realizados, nomeadamente o ensaio para a determinação do módulo de rigidez por tração indireta, o ensaio de sensibilidade à água e o ensaio de permeabilidade da mistura, sendo apresentados os resultados obtidos em cada um destes ensaios.

Por último, no quinto capítulo, são apresentadas as considerações finais da presente dissertação, nomeadamente as conclusões, recomendações e sugestões para trabalhos futuros de possível investigação e estudo no âmbito desta temática.

Capítulo 2 - Estado de Arte sobre Misturas Betuminosas Drenantes

2.1 Introdução

O presente capítulo baseia-se na pesquisa, análise documental e estado de arte acerca das misturas betuminosas drenantes aplicadas em camadas de desgaste. Este conhecimento é necessário tanto em relação às suas características como às suas vantagens e desvantagens. Neste capítulo são abordadas a evolução e as aplicações das misturas betuminosas drenantes em vários países, inclusive em Portugal. São também abordados os tipos de fibras utilizadas nas misturas betuminosas drenantes, sendo mencionados os efeitos desta incorporação na sua composição, assim como apresentados exemplos de fibras.

As misturas betuminosas drenantes são utilizadas por todo o mundo, sendo designadas por diferentes nomenclaturas, sendo estas: *Open-Graded Friction Courses* (OGFC), *Porous Friction Course* (PFC), *Asphalt Concrete Friction Course* (ACFC), *popcorn mix*, e *permeable European mix* (PEM) ou simplesmente, *Porous Asphalt* (PA), (Lebens e Troyer, 2012).

2.2 Objetivos das misturas betuminosas drenantes

A camada de desgaste, sendo a mais superficial de um pavimento, sujeita à ação direta do tráfego e do clima, tem de possuir características de resistência, para que não se degrade nem se deforme sob a passagem dos veículos, assim como proporcionar uma superfície confortável e segura para a circulação de tráfego. A segurança é um dos aspetos a que é dada uma importância cada vez maior (CEPSA, 2014). As características desta camada dependem do tipo de materiais constituintes, da idade e do tipo de utilização do pavimento, conjugadas com as agressões climáticas a que estão sujeitas (InIR, 2009a).

As misturas betuminosas drenantes são constituídas por betume, agregados e filler, podendo ainda adicionar-se fibras e aditivos. De modo a obter-se uma mistura betuminosa homogênea todos os constituintes da mistura devem ser misturados de forma uniforme e em proporções adequadas. Normalmente, estas misturas são produzidas a quente e a sua aplicação é exclusiva nas camadas de desgaste nos pavimentos flexíveis (Nascimento, 2012).

No caso das camadas de desgaste compostas por misturas betuminosas drenantes, estas possuem essencialmente propriedades funcionais, não lhe conferindo capacidade estrutural significativa (Dias *et al.*, 2004). Estas misturas têm como objetivos drenar o escoamento superficial, melhorar as condições de visibilidade na presença de precipitação, aumentar a aderência, reduzir o ruído de circulação e o efeito de espelho na superfície molhada (Virgiliis,

2009), condições estas que aumentam a segurança e conforto na utilização das rodovias. Estas misturas apresentam uma menor resistência aos efeitos abrasivos do tráfego, e podem colmatar-se quando aplicadas em zonas onde a precipitação não é frequente e/ou se acumule sujidade (Menezes, 2008).

A função de drenagem é a característica principal deste tipo de camada, sendo o seu objetivo o de escoar a água precipitada o mais rápido possível para jusante. É necessário assegurar esta sua propriedade, uma vez que ao longo dos anos, para além do desgaste superficial existe a questão da colmatação dos seus vazios, situação que compromete a sua funcionalidade.

A precipitação já é uma situação climática que condiciona a utilização da rodovia, uma vez que a acumulação de água no pavimento não só o torna escorregadio, como pode permitir a formação de lençóis de água, promovendo a ocorrência de aquaplanagem. Através da aplicação de misturas betuminosas drenantes nas redes rodoviárias esta situação é mitigada, como exemplificado pela Figura 2.1.

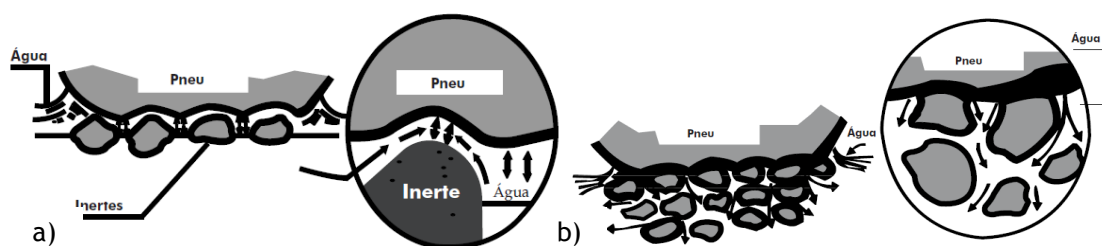


Figura 2.1 - Contacto pneu-pavimento em a) mistura betuminosa densa e b) mistura betuminosa drenante (Fonte: PAVIDREN)

Em comparação com os pavimentos convencionais, a aplicação destas misturas à superfície dos pavimentos permite o aumento do volume de escoamento superficial, aumentando a segurança de utilização em dias de chuva. Ao evitar a acumulação de água à superfície impede-se, ou pelo menos é diminuída, a ocorrência de formação de lençóis de água no pavimento, situação causadora de muitos dos acidentes rodoviários.

As misturas betuminosas drenantes apresentam, após compactadas, uma elevada porosidade, na ordem de 22 a 30 % (Nascimento, 2012). Existindo um elevado volume de vazios, é criada uma rede de canais no interior da camada drenante que possibilita a rápida drenagem das águas pluviais (Homem, 2002). Esta elevada porosidade da mistura betuminosa drenante é obtida por meio de uma dosagem adequada de agregados, filer e betume (Oliveira, 1995). Ao encontrar uma camada impermeável subjacente, a água escoar, devido às inclinações do perfil da estrada, sendo encaminhada até à berma ou para sistemas de drenagem apropriados, como ilustrado na Figura 2.2, reduzindo, assim, a possibilidade de formação da película de água sobre a superfície do pavimento e aumentando a segurança do tráfego em dias de chuva (Oliveira, 2003; Hwee e Guwe, 2004).



Figura 2.2 - Exemplos de drenagem de águas pluviais na autoestrada A1 (Portugal)

Nas camadas drenantes, a drenagem é uma combinação do escoamento superficial e do escoamento no interior da camada devido à sua permeabilidade, ou seja, devido aos vazios comunicantes que a constituem, como ilustrado na Figura 2.3. A diminuição da película de água à superfície tem, portanto, um acréscimo na aderência pneu-pavimento (Oliveira, 1995).

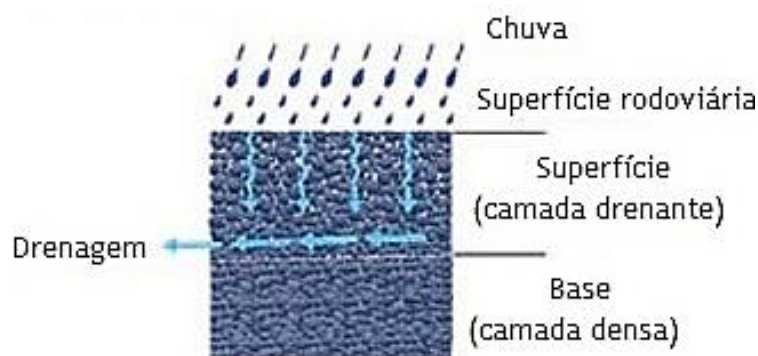


Figura 2.3 - Percolação da água pela camada drenante (adaptado de http://www.enexco.co.jp/english/business_activities/expressway_management/measures.html, consultado a 3 de janeiro de 2016)

2.3 Características das misturas betuminosas drenantes

As misturas betuminosas drenantes, aplicadas em camadas de desgaste, permitem a melhoria da segurança e comodidade de circulação, principalmente durante os períodos de precipitação.

Estas misturas são caracterizadas por possuírem uma composição granulométrica descontínua, proporcionando uma estrutura com elevada porosidade, característica pela qual são conhecidas e utilizadas, permitindo a percolação da água superficial (Oliveira, 2003).

As misturas betuminosas abertas possuem esta definição devido à percentagem de porosidade elevada que as caracteriza. Estas misturas possuem granulometria descontínua, com diâmetro nominal máximo de agregado de 14 mm.

As camadas de desgaste, com misturas betuminosas drenantes, em Portugal, têm uma espessura constante de cerca de 4 cm, permitindo o escoamento da água superficial entre espaços vazios interligados, como ilustrado na Figura 2.4, pelo interior da camada até às bermas e não à superfície como acontece nos pavimentos convencionais (Branco *et al.*, 2006). Como resultado, a água entra facilmente na camada e é deslocada a partir do interior da superfície, o que melhora drasticamente a visibilidade em tempo de chuva, como descreve Gerald A. Huber em *Performance Survey on Open-Graded Friction Course Mixes*, documento síntese da *National Cooperative Highway Research Program - NCHRP* (Huber, 2000).

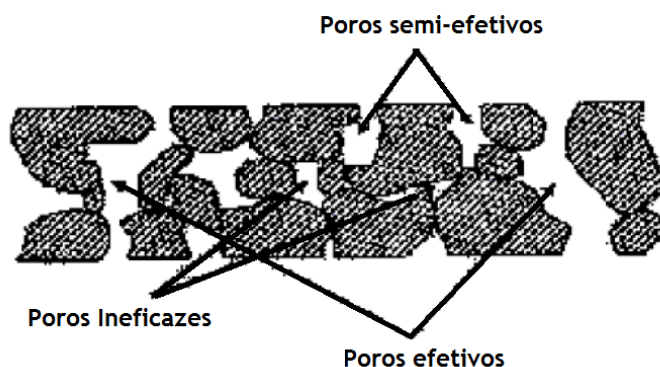


Figura 2.4 - Tipos de poros da mistura drenante
(Fonte: Associação das Rodovias do Japão, 1996, citado por Oliveira, 2003)

Devido a esta característica, as misturas betuminosas drenantes e, segundo indicação do Manual de Pavimentação da CEPISA (2014), só devem ser utilizadas em estradas localizadas em zonas onde não exista ocorrência de neve ou formação de gelo, que tenham um regime de pluviosidade razoavelmente constante, que facilite a sua limpeza, e em locais cujos acessos estejam pavimentados e destinados a tráfegos relativamente elevados. Não é recomendada a aplicação destas misturas sobre tabuleiros de obras de arte em que a sua correta impermeabilização não seja garantida. Em qualquer caso, devem ser previstos sistemas específicos de captação e eliminação de água infiltrada através do pavimento.

Não é aconselhada a utilização de misturas betuminosas drenantes em locais com muitas variações de velocidade, como por exemplo, rotundas ou intersecções prioritárias com viragens acentuadas (Menezes, 2008).

As misturas betuminosas drenantes constituídas por uma curva granulométrica descontínua, têm como função permitir a infiltração da água na estrutura da mistura, ao contrário das misturas betuminosas densas, que apresentam uma curva granulométrica contínua e cujo objetivo é o de impedirem a penetração da água para as camadas subjacentes (Pereira, 2009). O resultado desta diferença de curva de granulometria é bem esquematizado na Figura 2.5.

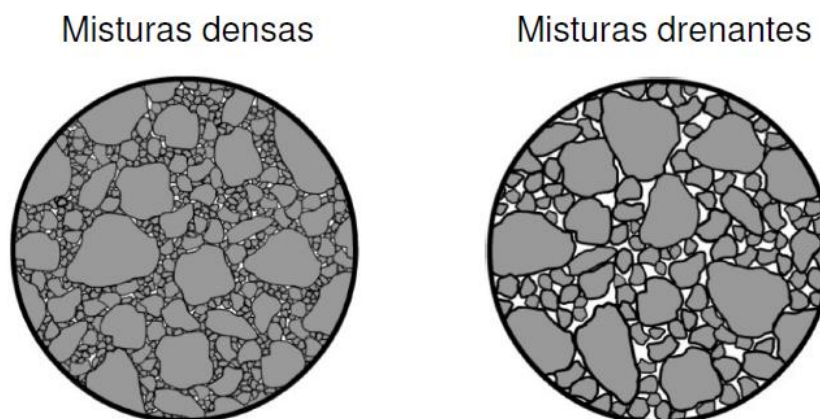


Figura 2.5 - Diferenças entre as misturas betuminosas densas e drenantes (adaptado de Pereira, 2009)

As principais vantagens de segurança das misturas betuminosas drenantes, em comparação com as misturas betuminosas densas estão relacionadas com a porosidade e a textura da superfície, perceptíveis pela Figura 2.6.



Figura 2.6 - Superfície de camada betuminosa densa e superfície de camada betuminosa drenante (Fonte: Lebens e Troyer, 2012)

As misturas betuminosas são compostas por uma mistura de partículas de agregados, cujos tamanhos variam entre 0 e D (dimensão máxima em milímetros) e um ligante betuminoso. A escolha do tipo de ligante betuminoso é feita tendo em conta o nível de desempenho estrutural e funcional que se pretenda, dependendo também do volume e tipo de tráfego do qual será objeto e das condições climáticas a que estará exposto. Podem ser utilizados ligantes modificados e aditivos para aumentar o seu desempenho. A mistura final, após compactada e arrefecida, apresenta determinadas características volumétricas, mecânicas, funcionais e de desempenho, consoante as aplicações a que se destina (InIR, 2009b).

De acordo com o Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (2014), a norma europeia EN 13108-7 *Bituminous mixtures- Material specifications - Part 7: Porous asphalt* preconiza os requisitos para as misturas betuminosas drenantes, produzidas a quente. Esta norma especifica a mistura betuminosa drenante com base na abordagem empírica e de requisitos para os materiais constituintes, em associação com ensaios de desempenho.

A produção das misturas betuminosas drenantes é realizada em centrais betuminosas a quente, sem nenhum aspeto particular a destacar, a não ser o cumprimento da granulometria descontínua e a formulação da mistura, além da correta aplicação dos aditivos, quando e de acordo com o caso (Menezes, 2008).

Segundo o Manual de Pavimentação da CEPSA (2014), para melhorar a eficácia das misturas betuminosas drenantes e de modo a reduzir o problema da colmatação, o uso de dupla camada drenante é vantajoso. Estas são compostas por duas camadas drenantes constituídas por agregados de dimensão distinta, ilustrado na Figura 2.7. Aplicando primeiro uma camada com agregado mais grosso, de dimensão 12 a 20 mm, formam-se vazios de maior tamanho. Numa segunda camada superficial, com a utilização de agregado mais fino, de dimensões máximas entre 8 e 10 mm, resulta uma melhoria das características funcionais do pavimento, em termos de conforto e segurança para o utente, nomeadamente, na redução do ruído e na capacidade de drenar a água.

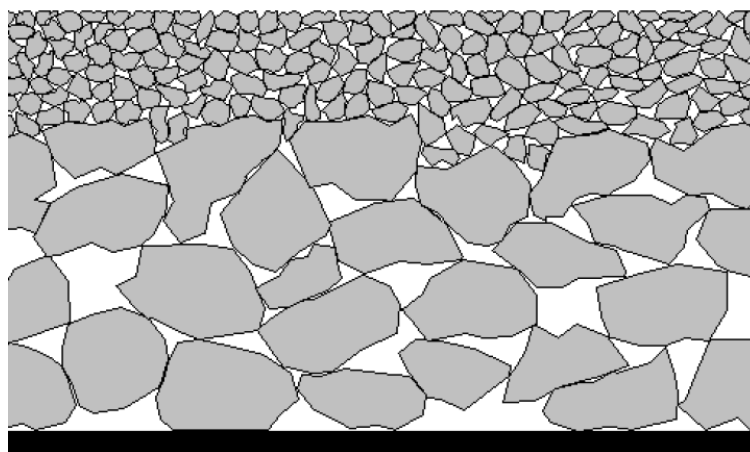


Figura 2.7 - Sistema de dupla-camada
(Fonte: www.asphaltalliance.com, consultado a 22 de novembro de 2015)

O sistema de dupla camada, foi utilizado pela primeira vez na Holanda no início dos anos noventa.

A dupla camada drenante, como referido anteriormente, é dividida em duas camadas, como ilustrado na Figura 2.8, uma camada superficial, com espessura de 1 ou 2 cm, composta por agregado fino, com funções de filtro, e uma segunda camada subjacente, com espessura de 2 a 5 cm, composta por agregado grosso, com funções de drenagem (Ranieri, 2005).



Figura 2.8 - Pavimento com dupla camada (Fonte: Sandberg, 2012)

A camada superior composta por agregado fino oferece uma barreira à entrada de poeira na camada de drenagem inferior. Além disso, a camada superficial é a mais fácil de limpar segundo Ranieri (2005), pois o equipamento de limpeza só é realmente eficaz nos primeiros 1 a 2 cm de profundidade. A textura da camada superior favorece a resistência à derrapagem. Desta forma, a combinação da composição da mistura drenante com o agregado fino da camada superior e a composição da mistura drenante com agregado grosso da camada inferior, melhora bastante a absorção de ruído (Ranieri, 2005).

Em alguns casos, o uso de misturas betuminosas drenantes é aconselhado em autoestradas. Estradas urbanas e parques de estacionamento normalmente têm mais detritos na superfície, uma vez que o vento provocado pelo deslocamento dos veículos não os remove, acumulando-se e sendo necessária manutenção mais frequente.

Segundo alguns autores, existe uma tendência no pavimento das autoestradas que mantém as estruturas drenantes abertas durante a sua vida útil. Acontecimento justificado pelas grandes velocidades praticadas nestas redes rodoviárias que promovem o vácuo hidráulico resultante do contacto entre os pneus e a superfície do pavimento (Kandhal, 2002; Bendtsen *et al.*, 2005). Este fenómeno promove a não colmatação dos vazios característicos destas misturas betuminosas (Huber, 2000). Este efeito provoca ruído de alta frequência, contudo, com o uso de misturas betuminosas drenantes na camada superficial, o ruído é atenuado, uma vez que o ar é bombeado para o interior da camada drenante, como é referido no documento da *National Asphalt Pavement Association* - NAPA (Kandhal, 2002).

Assim, para o correto funcionamento das camadas betuminosas drenantes é indispensável uma operação de conservação periódica, para a limpeza e desobstrução desta camada. Esta intervenção tem de ser efetuada com equipamentos específicos de tratamento hidromecânico, que efetuem ações de pulverização de água a alta pressão, seguida de uma aspiração (Menezes, 2008).

2.4 Vantagens e desvantagens

2.4.1 Vantagens

As vantagens da utilização de misturas betuminosas drenantes em relação às misturas densas convencionais são enumeradas por vários autores (Fonseca, 1998; Homem, 2002; Dumke, 2005; Castro *et al.*, 2005; Souza, 2008; Kamar e Sarif, 2009):

- Redução dos riscos de aquaplanagem - a mistura betuminosa drenante escoando a água da superfície do pavimento reduz, ou pode mesmo eliminar, a possibilidade de ocorrer uma situação de aquaplanagem;
- Maior resistência à derrapagem com o piso molhado - a mistura betuminosa drenante possui uma grande macro textura. Característica que faz com que o pavimento mantenha uma elevada aderência pneu-pavimento, mesmo a alta velocidade;
- Redução de pulverização (efeito *spray*) de água - com as misturas betuminosas drenantes a água superficial penetra para o interior da camada, eliminando o efeito de *spray* provocado pela passagem dos pneus do veículo que circula na dianteira;
- Menor reflexão das luzes dos veículos no piso molhado - ao eliminar a película superficial de água reduz-se o fenómeno de reflexão de luzes, proporcionando uma melhor visibilidade e segurança na condução com o piso molhado;
- Redução dos níveis de ruído do tráfego - esta camada, devido às suas características e textura, reduz o ruído dentro e fora do veículo. Comparando com revestimentos convencionais, a utilização de camadas drenantes faz com que ocorra uma redução de ruído de 3 a 7 dB. Segundo Láo (2004) a capacidade de reduzir o nível de ruído da interação pneu-pavimento das camadas betuminosas drenantes está relacionada, entre outras, pela porosidade, pela granulometria, pela disposição dos agregados na sua superfície e pelas características dos agregados (diâmetro máximo, angulosidade, índice de forma, desgaste e porosidade);
- Consumo de combustível - Lefebvre (1993), citado por Homem (2002), salienta que uma das vantagens do uso das misturas betuminosas drenantes na camada de desgaste, está no facto de que estas proporcionam uma menor resistência à circulação. Verificando-se, em alguns casos, uma economia significativa no consumo de combustível, da ordem de 1 a 2 %.

2.4.2 Desvantagens

As misturas betuminosas drenantes, devido à sua elevada porosidade, possuem algumas limitações, tais como as enumeradas por vários autores e apresentadas de seguida (Dumke, 2005; Castro *et al.*, 2005; Ranieri, 2005; Menezes, 2008, Souza, 2008; Kamar e Sarif, 2009; Nascimento, 2012):

- Colmatção dos vazios - A colmatção é tanto mais lenta quanto maior o teor de vazios. Para se conseguir uma boa drenagem é necessário que a mistura mantenha uma percentagem mínima de porosidade, característica que difere de país para país. A colmatção reduz gradualmente as propriedades de drenagem e acústicas da camada e intensifica o desgaste da sinalização horizontal. A colmatção, e consequente perda de permeabilidade, ocorre ao fim de algum tempo, podendo variar ao fim 3 a 6 meses em locais agressivos, nomeadamente cidades e zonas rurais e ao fim de 3 anos em autoestradas, podendo nas zonas de circulação dos pneumáticos encontrarem-se pouco colmatadas, em virtude do efeito de vácuo hidráulico;
- Uso no inverno - as misturas betuminosas drenantes, em comparação com as misturas betuminosas densas, exigem maiores quantidades de sal e aumento das operações de manutenção neste período do ano;
- Contribuição estrutural - a sua contribuição estrutural é pouco significativa. A título indicativo, refira-se que a espessura de 4 cm de mistura betuminosa drenante corresponde, em termos de capacidade resistente, sensivelmente, a metade de uma mistura densa convencional;
- Durabilidade - a existência de uma elevada quantidade de vazios, proporciona uma grande exposição, favorecendo a oxidação e o envelhecimento precoce por ação dos agentes atmosféricos. O grande volume de vazios favorece o dano por ação da água, como a desagregação no caso de má adesividade entre o agregado e o ligante. O processo de deterioração é combatido principalmente pelo aumento da espessura da película de ligante, recobrando os agregados e/ou pelo uso de ligante betuminoso modificado;
- Custo - pela presença de ligante betuminoso modificado, a necessidade de agregados de qualidade superior, o maior gasto com a sinalização horizontal, e necessidade de uma camada de ligação de qualidade, podem chegar a duplicar o custo da camada betuminosa drenante em relação a uma camada convencional. Para além disso, e relativamente à conservação deste tipo de pavimento os seus custos são bastante significativos.

2.5 Origem das misturas betuminosas drenantes

A necessidade de afastar da superfície do pavimento o excesso de água proveniente da pluviosidade levou aos primeiros estudos sobre misturas betuminosas de granulometria descontínua, na década de 1930 nos Estados Unidos da América (EUA). Na década de 1950 obteve-se um revestimento chamado de *Open-Graded Asphalt Friction Course* (OGFC), cuja designação adotada na presente dissertação é mistura betuminosa drenante. Esta mistura diferia das anteriores por apresentar granulometria muito aberta e reduzida espessura (Mallick *et al.*, 2000; Souza, 2008).

A aplicação de misturas betuminosas drenantes, como camada de desgaste, em pavimentos teve início na década de 60, em países europeus. Desde então, têm sido aplicadas de forma

crecente devido às vantagens oferecidas nos aspetos de segurança e conforto, em relação às misturas betuminosas convencionais (Oliveira, 2003).

Devido à sua notável capacidade de escoamento das águas pluviais, evitando o efeito prejudicial da aquaplanagem, a *Federal Highway Administration* (FHWA) e a *Federal Aviation Administration* (FAA) dos EUA criaram especificações para as camadas betuminosas drenantes no início da década de 1970 (Kandhal e Mallick, 1998; Dumke, 2005).

Ao longo desta década, quer nos Estados Unidos da América, quer na Europa, foram concebidos muitos pavimentos com camada superficial drenante (Kandhal, 2002).

2.5.1 Experiência estrangeira

As diferentes condições ambientais são uma das razões para que não haja uniformidade no tipo de misturas betuminosas drenantes utilizada entre os vários países. Outra razão, e mais importante, é a diferente “cultura” na construção de rodovias que cada país desenvolveu desde as suas primeiras aplicações (Ranieri, 2005).

Estados Unidos da América

As primeiras experiências com misturas betuminosas drenantes foram realizadas na década de 30, nos EUA, com a finalidade de resolver problemas de aderência nos pavimentos. Estas misturas receberam várias denominações, ficando oficialmente conhecidas por OGFC.

A popularidade deste tipo de misturas aumentou nos EUA na década de 1970, em resposta ao programa da FHWA, para aumentar a resistência ao atrito nas estradas (Kandhal, 2002). Com base em experiências de campo, em 1974, a FHWA implementou especificações de serviço visando a aplicação de misturas betuminosas drenantes em áreas de tráfego pesado (Oliveira, 2003).

Na década de 1980, devido aos problemas de durabilidade das misturas drenantes, muitos estados suspenderam o seu uso. No entanto, alguns estados, incluindo Georgia, Texas e Oregon, melhoraram as formulações das misturas e continuaram a sua aplicação. As mudanças incluíram a utilização de um ligante betuminoso modificado com polímeros e com a adição de fibras, de modo a estabilizar a mistura e diminuir o escorrimento do ligante, aumentar o teor de ligante e a porosidade e utilizar um agregado mais resistente. A utilização de ligante betuminoso modificado produziu uma película mais espessa sobre as partículas de agregado que contribuiu para a durabilidade da mistura, nomeadamente diminuindo os efeitos da oxidação e da desagregação (Fitts, 2002).

A norma estadunidense AASHTO T269-11: *Standard Method of Test for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Asphalt Mixtures* (Designação ASTM: D 3203/D 3203M-11) requer que a porosidade seja superior a 16 % (Dylla e Hansen, 2015).

Nos EUA está estabelecido para as misturas betuminosas drenantes uma porosidade entre 18 a 20 %. Watson *et al.* (2004), citados por Nielsen (2006), refere um estudo de formulação de misturas betuminosas drenantes com base no ensaio cântabro, recomendando uma porosidade mínima de 18 %. McDaniel *et al.* (2005), citados por Nielsen (2006), nos relatórios de avaliação de campo reporta o uso de uma mistura betuminosa drenante de granulometria 0/12 mm aplicados em 2003, no Indiana. Para a sua avaliação foram realizados ensaios no compactador giratório e ensaio cântabro resultando uma porosidade de 23 %, com um teor de 5,7 % de ligante betuminoso modificado.

Os *Departments of Transportation* (DOTs) em treze dos estados dos EUA têm contribuído para um projeto de investigação das misturas betuminosas drenantes, sendo esta realizada pelo *National Center for Asphalt Technology* - NCAT (APA, 2003).

Brasil

No Brasil, os estudos sobre misturas betuminosas drenantes iniciaram-se na década de 1960, pela Diretoria de Engenharia da Aeronáutica (DIRENG). Estes estudos procuravam aumentar a segurança nos procedimentos de aterragem e descolagem nos aeroportos (Botelho *et al.*, 2004, citados por Souza 2008). A denominação corrente deste tipo de misturas no país passou a ser Camada Porosa de Atrito - CPA (Souza, 2008).

Esta camada, quando modificada por polímeros, é definida pela norma brasileira DNER-ES 386/99 Pavimentação - pré-misturado a quente com asfalto polímero - camada porosa de atrito. Esta norma refere que a mistura betuminosa drenante deverá possuir uma porosidade entre 18 e 25 % (Souza, 2008).

As primeiras experiências com misturas drenantes no Brasil surgem a partir da década de 80 com a aplicação em aeroportos. Em 1983 houve uma aplicação na pista do aeroporto de Confins, em Belo Horizonte, em Minas Gerais. Em 1987, foi aplicado na pista do aeroporto Santos Dumont, no Rio de Janeiro, uma camada drenante utilizando-se misturas betuminosas modificadas por polímeros (Petrobrás, 2001, citado por Oliveira, 2003).

Em 1997 realizou-se um troço experimental, em São Paulo, com 2 km de extensão, situado na via marginal da estrada Presidente Dutra (BR-116) cuja espessura era de 4 cm e apresentava uma porosidade de 18 % (Porto, 1999, citado por Oliveira, 2003).

África do Sul

A *South African Bitumen and Tar Association* em associação com o Centro de Investigação Científica e Industrial desenvolveu um manual para a formulação e construção de misturas betuminosas drenantes (1995). O método de formulação é baseado na experiência europeia aplicado às condições do sul de África (Huber, 2000).

O ligante betuminoso empregue depende do clima e do volume de tráfego a que a mistura estará sujeita. Em climas quentes ou para tráfego médio/pesado é necessário utilizar um ligante betuminoso de alta viscosidade, modificado com borracha ou polímeros. Para estradas sujeitas a tráfego baixo/médio utiliza-se um ligante betuminoso puro ou modificado por polímeros (Huber, 2000).

Na composição das misturas betuminosas drenantes são utilizados dois tipos de granulometria com dimensão nominal máxima de 9,5 e 13,2 mm. A porosidade de projeto deve estar entre 18 a 22 %, sendo que, para climas quentes ou para tráfego médio/pesado é requerida uma porosidade superior a 22 %. O teor máximo de ligante betuminoso admissível é controlado pela porosidade dos provetes compactados (Huber, 2000).

Os provetes compactados são avaliados no ensaio cântabro. Para o ensaio, realizado a 25 °C, é permitida uma perda máxima de 25 %. O ensaio cântabro limita a quantidade mínima de ligante a ser aplicado. No caso do ensaio cântabro húmido os provetes são submetidos a imersão em água e a ciclos de gelo e degelo. Os provetes são colocados em vácuo saturado e depois sujeitos a dois ciclos de gelo e degelo, são colocados durante 15 horas a -10 °C, seguidos de 24 horas em banho de água a 60 °C. Antes da realização do ensaio as amostras são acondicionadas durante 4 horas. Após este período estas são testadas ao ensaio cântabro a uma temperatura de 25 °C. A perda de massa por desgaste máxima permitida é de 30 %. É especificado um mínimo absoluto de 4,5 %, independentemente dos resultados do ensaio (Huber, 2000).

Em 1993 foi aplicada a primeira superfície de mistura drenante na África do Sul, sob a autoridade do Departamento Gautrans das Obras Públicas (anteriormente chamado de Departamento de Estradas Transvaal). Este projeto envolveu a construção de um total de aproximadamente 1 milhão de m² de mistura betuminosa numa faixa de rodagem com um fluxo de 25 mil veículos por via, por dia (Fletcher e Theron, 2011).

Durante a fase de projeto decidiu-se usar um ligante betuminoso modificado devido ao bom desempenho em misturas betuminosas, e, assim, foi selecionado ligante betuminoso com adição de borracha. O objetivo desta formulação foi o de otimizar o teor de ligante das misturas, porosidade, perda de massa por desgaste e escorrimento do ligante. Este projeto produziu misturas com porosidades típicas de 20 a 23 % e com teor de ligante de 5,8 % (Fletcher e Theron, 2011).

As propriedades funcionais da camada drenante tinham de ser mantidas através da limpeza mensal da superfície com recurso a jato de água e aspiração, de modo a evitar a obstrução da superfície em ambiente seco e empoeirado. Sob condições de elevada precipitação, era esperada a autolimpeza das camadas betuminosas drenantes devido ao vácuo hidráulico, ou seja, através da ação das forças de sucção dos pneus movendo-se rapidamente sobre a superfície. O revestimento teve um bom desempenho durante seis a sete anos antes da primeira desagregação superficial tornar-se visível (Fletcher e Theron, 2011).

Nova Zelândia

Segundo reporta Patrick *et al.* (2003), citados por Nielsen (2006), as camadas betuminosas drenantes são amplamente aplicadas na Nova Zelândia tendo sido introduzidas em 1975 com uma porosidade estabelecida superior a 14 %. Na década de 80 a especificação foi revista estabelecendo-se uma porosidade superior a 20 %, contudo, devido à baixa eficácia e curto período de vida útil desta camada realizou-se uma investigação para maximizar a porosidade (até 30 %) e aplicar um betume modificado, de modo a garantir uma resistência da mistura adequada.

Os agregados empregues nas misturas padrão, na Nova Zelândia, possuem granulometria de 20 ou de 14 mm. Jackson *et al.* (2004), citados por Nielsen (2006), referem nos seus estudos troços aplicados na Nova Zelândia com recurso a dupla camada, seguindo os desenvolvimentos realizados na Europa, de espessura 7 cm e composto por uma camada inferior de granulometria 0/16 mm e uma camada superior de granulometria 0/8 mm.

Japão

Segundo Motomatsu *et al.* (2004), citados por Nielsen (2006), as camadas drenantes foram introduzidas no Japão em 1987.

Desde 1991 o *Japan Highway Public Corporation* (JH), agência governamental responsável pelas redes rodoviárias do Japão, acompanha o desempenho de pavimentos drenantes (Oliveira, 2003). Em 1998, foi decidida a utilização, como padrão, de camadas drenantes em todas as redes rodoviárias a serem construídas. A principal razão para o seu uso foi a de aumentar a segurança do tráfego e evitar a deformação permanente do pavimento (Nielsen, 2006).

A aplicação deste tipo de misturas na rede rodoviária japonesa foi muito bem-sucedida, sendo que, no final de 2002, mais de 40 % das autoestradas japonesas eram pavimentadas com misturas betuminosas drenantes (Nielsen, 2006). Na Figura 2.9 é perceptível a diferença de circulação entre os pavimentos com camada densa e camada drenante.

De acordo com a *European Asphalt Pavement Association (EAPA)*, no ano de 2003 existia no Japão um total de 152 milhões de m² da rede rodoviária pavimentados com misturas betuminosas drenantes, sendo que, em 2014, foram aplicados 5,97 milhões de m².



Figura 2.9 - Linha de água perceptível durante período chuvoso na *Tokyo Bay*, Japão (adaptado de Poulidakos *et al.*, 2004)

Europa

Holanda

Na Holanda, as primeiras aplicações de pavimentos drenantes realizaram-se em 1972, tendo sido feitas pesquisas para a avaliação destas misturas. Inicialmente, o interesse que se verificou relativamente a estes pavimentos foi devido à procura de uma melhoria na segurança, tendo em conta o clima chuvoso do país. Mais tarde, nos anos 80, o principal motivo do seu desenvolvimento foi a redução do ruído de tráfego (Oliveira, 1995).

Durante o final dos anos 1970, foi realizada uma investigação inicial das camadas betuminosas drenantes com o intuito de reduzir o efeito de *spray* pela passagem dos pneus em movimento na superfície das estradas. A legislação acerca do ruído requeria a colocação de camadas betuminosas drenantes em todas as estradas percorridas por um valor acima de 25 mil veículos por dia. No decorrer da investigação, foram aplicadas cerca de 60 % de camadas betuminosas drenantes na rede rodoviária holandesa (Fletcher e Theron, 2011).

Em 1990 foi decidido que toda a rede de autoestrada seria pavimentada com camadas betuminosas drenantes, sendo que nesse ano já existiam 4500 km de pavimentos drenantes na rede nacional, sendo 2000 km em autoestradas. A decisão da construção de uma tão grande extensão de pavimentos drenantes teve por base um estudo técnico-económico, do tipo custo-benefício. A metodologia foi realizada através de uma análise comparativa entre misturas

betuminosas drenantes e misturas betuminosas densas, resultando cada uma das suas características e efetuando-se posteriormente uma análise custo-benefício global.

Os pavimentos utilizados normalmente duraram entre 10 a 12 anos, sendo necessária manutenção ou reabilitação devido à desagregação da camada superficial (Nielsen, 2006).

Bochove (2000), citado por Nielsen (2006), relata que desde 1990, na Holanda, têm sido realizados ensaios em dupla camada de misturas betuminosas drenantes, como parte de um projeto de investigação em larga escala entre vários países.

Em 2009, mais de 80 % das autoestradas neste país eram pavimentadas com misturas betuminosas drenantes do tipo PA 16 (Voskuilen e Elzinga, 2010).

Em estradas sujeitas maioritariamente a tráfego pesado é utilizada na camada betuminosa drenante espessura de 5 cm e agregados de granulometria 0/16 mm. Normalmente são usados ligantes betuminosos modificados apenas em casos especiais (Nielsen, 2006).

Neste país, a percentagem de betume puro determinada está entre 4 e 5 % e para betumes modificados entre 4,5 e 5,5 %. A porosidade é estabelecida em 20 % para betumes puros 80/100, podendo obter valores superiores a este tanto para betumes puros como modificados (Ruiz, 1997, citado por Dumke, 2005; Nielsen, 2006).

As camadas betuminosas drenantes são limpas regularmente utilizando jatos de água a alta pressão e posteriormente aspiradas. Este procedimento é realizado duas vezes por ano, sendo condicionado pelo tipo de tráfego, velocidade, entre outros fatores. No caso da superfície se tornar completamente colmatada esta fica impossível de limpar. A seguir à limpeza, as características de ruído e permeabilidade decrescem (porque o material é trazido até à superfície), no entanto estas propriedades melhoram pouco tempo depois. Os holandeses indicam que a colmatação começa a manifestar-se após 6 meses (Gibbs *et al.*, 2005).

Bélgica

Na Bélgica, os pavimentos drenantes têm sido objeto de estudo desde 1979. A sua primeira experiência realizou-se com a execução de um troço de 2 700 m², de uma rede rodoviária com duas vias e com um volume de tráfego diário de 700 veículos/dia em cada direção (Heystraeten *et al.*, 1990, citados por Oliveira, 2003)

O organismo *Centre de Recherches Routières* foi o responsável pela construção da maior parte de estradas experimentais e estudou numerosos aspetos deste tipo de pavimento, tais como composição, processo de fabrico, mistura em obra, avaliação da permeabilidade, avaliação do ruído de tráfego, características do ligante, degradações, análise económica e materiais adotados (Oliveira, 1995).

A *Administration de Routes*, na Bélgica, introduziu indicações relativas aos pavimentos drenantes, que entraram em vigor em abril de 1986, sendo essencialmente de quatro tipos: materiais elementares, misturas e tipos, produção e colocação em obra e resultado a obter (Oliveira, 1995).

A dimensão de agregado normalmente aplicada nas misturas betuminosas drenantes é de 0/14 mm (Nielsen, 2006). Na Bélgica a percentagem de betume adotada para betumes puros ou modificados encontra-se entre 4 e 5 %, sendo que para betumes com borracha adota-se um teor entre 5,5 e 6,5 %. Relativamente à porosidade, quando esta é obtida através de uma média ponderada de amostras, deve encontrar-se na ordem de 19 a 25 %, individualmente, cada amostra deverá possuir uma porosidade entre 16 e 28 %. Os tipos de ligantes empregues são betumes puros 80/100, betumes modificados ou betumes com borracha (Ruiz, 1997, citado por Dumke, 2005). Verificou-se que a utilização do ligante em misturas betuminosas drenantes era, maioritariamente, betumes modificados, onde 60 % dos casos usavam betume com pó de borracha e 30 % betume com adição de polímeros, tendo sido utilizado em 10 % dos casos betume puro. Tal situação explica-se pelo facto do betume puro ter tendência para um envelhecimento mais rápido (Oliveira, 1995).

De acordo com EAPA em 2014, foi aplicada uma área total de 0,31 milhões de m² com misturas betuminosas drenantes na Bélgica.

Dinamarca

Na Dinamarca, a segurança é a principal prioridade, sendo imposto para os pavimentos drenantes uma porosidade igual ou superior a 18 % (Gibbs *et al.*, 2005).

Os dinamarqueses, segundo estudos efetuados, indicam que os pavimentos drenantes começam a colmatar no primeiro ano, contudo, as camadas onde circulam veículos a alta velocidade comportam-se melhor, devido ao efeito de vácuo hidráulico. É ainda referido que caso o pavimento drenante não seja limpo regularmente, este pode tornar-se demasiado colmatado impedindo a sua limpeza de forma eficaz após 2 anos ou até menos. A permeabilidade inicial deverá ter uma duração de escoamento inferior a 10 segundos, assim, quando a permeabilidade do pavimento drenante, obtida através do tempo de escoamento, tem uma duração inferior a 75 segundos, o pavimento é considerado demasiado colmatado para ser limpo (Gibbs *et al.*, 2005).

Na Dinamarca, os pavimentos permeáveis requerem uma manutenção adicional durante o inverno devido à probabilidade de ocorrência de gelo (Gibbs *et al.*, 2005).

De acordo com EAPA em 2014, foi aplicado um total de 0,20 milhões de m² com misturas betuminosas drenantes na Dinamarca.

Áustria

Na Áustria, o primeiro troço experimental realizou-se em 1984, no Tirol (autoestrada A-12) sobre um pavimento rígido (Oliveira, 1995).

Em 1992, 18 % das camadas superficiais da rede rodoviária principal austríaca estava pavimentada com camadas betuminosas drenantes. Desde então, o uso de misturas betuminosas drenantes tem decrescido substancialmente devido, principalmente, a um rápido declínio no nível de serviço observado nos primeiros sinais de desagregação da camada superficial. Em geral, o desempenho é considerado bastante satisfatório, porém a sensibilidade à desagregação da camada superficial levou à utilização preferencial por pavimentos convencionais que são menos sensíveis a esta. As características da mistura betuminosa drenante mais aplicadas são espessura de 4 cm, granulometria 0/11 mm e teor de ligante de, pelo menos, 5,2 %. Neste tipo de camadas são apenas utilizados ligantes betuminosos modificados (Nielsen, 2006).

Na Áustria a porosidade estabelecida é de 17 % para betumes modificados com polímeros (Ruiz, 1997, citado por Dumke, 2005).

Alemanha

Na Alemanha as camadas drenantes são aplicadas desde a década de 70 e atualmente desenvolvem-se estudos relacionados com a contaminação da água que atravessa estes pavimentos (Hernández, 2008).

Como referido no documento elaborado para a NAPA, em 1992 existiam por volta de 400 mil m² de camadas com misturas betuminosas drenantes (OGFC) nas estradas nacionais alemãs. Sendo que, mesmo após oito anos, estas camadas drenantes apresentavam excelentes condições (Kandhal, 2002).

Desde 1986 vários estudos têm sido realizados no que concerne a este tipo de camadas, sendo que a Alemanha tem sido um dos países que mais tem contribuído para a sua investigação. Três gerações de misturas betuminosas drenantes foram experienciadas, tendo sido realizados aproximadamente trinta projetos (Hirsh e Ripke, 2008).

Atualmente, na Alemanha o teor de betume adotado encontra-se entre 5,3 e 6,5 % e a porosidade entre 24 e 28 % para misturas com betumes modificados com polímeros (Ruiz, 1997, citado por Dumke, 2005).

Schäfer (2004), citado por Nielsen (2006), relata algumas experiências de misturas betuminosas drenantes aplicadas em camadas de espessura de 4 cm na Alemanha, desde 1996. Estes tipos de misturas são constituídos por granulometria 0/8 mm, uma porosidade de 22 % e com um alto teor de ligante betuminoso modificado por polímero. Foi prevista uma vida de

serviço, relacionado ruído, de mais de 6 anos e uma vida de serviço estrutural de mais de 10 anos.

A partir de 2004, o uso de pavimento com dupla camada betuminosa drenante foi extensivamente aplicado nas autoestradas alemãs A30 e A9 (Hirsh e Ripke, 2008).

Suíça

Na Suíça, a primeira aplicação de camadas drenantes foi executada em 1972 num pavimento aeroportuário. O início da utilização deste tipo de camadas em pavimentos rodoviários ocorreu no final da década de 70 (Homem, 2002).

Em 1979, um projeto de pesquisa incidiu a sua investigação em vários tipos de misturas drenantes (Poulikakos *et al.*, 2007; Poulikakos e Partl, 2010). Comprovou-se que as misturas modificadas com polímeros apresentam melhor desempenho tanto *in situ*, como em testes de laboratório. A norma suíça atual SN 640 431-7:2008 requer a utilização de ligante modificado por polímeros nas misturas betuminosas drenantes (Poulikakos e Partl, 2010).

Desde 1982 realiza-se através do *Institute for Transportation, Traffic, Highway and Railway Engineering IVT of the Swiss Federal Institute of Technology* um programa de pesquisas com o objetivo de observar o desempenho a longo prazo das camadas betuminosas drenantes (Homem, 2002).

Neste país, foram observados pavimentos drenantes em serviço, de granulometrias 0/10 e 0/16 mm, com 15 a 20 % de porosidade e geralmente com betume modificado com polímeros. Os aspetos observados foram a aderência, a permeabilidade, o ruído e o efeito do inverno rigoroso (Oliveira, 1995).

Segundo a EAPA em 2014, foi aplicado um total de 1,01 milhões de m² pavimentados com misturas betuminosas drenantes na Suíça.

Reino Unido

As camadas drenantes foram introduzidas, no Reino Unido, pelo *Transportation Research Laboratory* (TRL) no final dos anos 50. No entanto este tipo de pavimento não se desenvolveu de imediato devido à dúvida sobre a permeabilidade, capacidade de reduzir a projeção da água e sobretudo a sua durabilidade (Oliveira, 1995).

Em 1967 realizou-se a primeira tentativa da aplicação de misturas betuminosas drenantes (Bowskill e Colwill, 1997, citados por Ranieri, 2005). A aplicação de camadas drenantes em pistas de aeroportos militares começou com o intuito de evitar a aquaplanagem e derrapagem em tempo de chuva (Hwee e Guwe, 2004). A mistura foi produzida com um agregado de

tamanho máximo de 20 mm e com 4,5 % de betume modificado com borracha natural. Mesmo tendo a sua porosidade diminuído em pouco tempo, este piso permaneceu em serviço por cerca de 15 anos (Ranieri, 2005).

A aplicação de misturas betuminosas drenantes na camada superior de um pavimento tem de conter a qualidade do agregado necessária para proporcionar resistência à derrapagem (Gibbs *et al.*, 2005). Para além disso, um estudo realizado no Reino Unido indica que uma camada betuminosa drenante pode reduzir a pulverização de água até 95 % ao circular-se na retaguarda de um camião a uma distância de aproximadamente 3 metros (Nicholls, 1997, citado por Kline, 2010).

Contudo foram encontrados problemas de durabilidade devido à desagregação de agregados na camada de desgaste. Um verão extremamente quente destruiu muitas das camadas betuminosas drenantes existentes no Reino Unido. Por esta razão, na década de 1990, o uso destas camadas foi restringido às redes de autoestradas onde os seus benefícios se sobrepõem aos seus inconvenientes (Nielsen, 2006).

No Reino Unido utilizam-se dois tipos de dimensão nominal máxima das misturas betuminosas drenantes, sendo estas de granulometria 0/10 e de 0/20 mm. Granulometria 0/10 mm aproxima-se dos padrões estabelecidos por outros países na Europa. Granulometria 0/20 mm é considerada bastante grossa, porém, é alegado que a aplicação de um agregado com esta dimensão origina espaços vazios maiores na estrutura da camada, ficando esta menos suscetível à colmatação e permitindo uma maior redução de ruído de tráfego (Huber, 2000). Frequentemente, para a camada betuminosa drenante é adotada uma espessura de 5 cm (Nielsen, 2006).

A percentagem mínima de porosidade é, preferencialmente, de 20 % sendo que a granulometria pode ser alterada de modo a aumentar a porosidade na mistura se necessário. A durabilidade não é ensaiada diretamente, mas é controlada por seleção do teor de ligante, usando um mínimo de 4,5 %. Frequentemente são aplicados ligantes betuminosos modificados de modo a prevenir o escorrimento das misturas (Huber, 2000).

França

França foi um dos primeiros países europeus a utilizar misturas betuminosas drenantes, no ano de 1977, sendo estas objeto de experiências sistemáticas. A mistura, aplicada sob forma de troço experimental, possuía uma porosidade de 20 % e espessura de 4 cm (Takahashi e Partl, 2001).

Os pavimentos com camada superficial drenante desenvolveram-se em França a partir de 1984. Tendo sido objeto de homologação normativa (NF P 98-134), após dezembro de 1991, foram

denominados como *Beton Bitumineux Drainantes* (BBDr) e descritos como pavimentos com porosidade da ordem dos 20 % (Oliveira, 1995).

Em França 40 % das aplicações de pavimentos drenantes foram realizadas com betume puro e 60 % com betumes modificados, tais como betume puro com adição de fibras, betume modificado por polímeros e betume modificado por pó de borracha (Oliveira, 1995).

Na maioria das vezes são aplicadas camadas com espessura de 4 cm e são usadas misturas com granulometria 0/10 mm e com betume puro 50/70. Em autoestradas concessionadas são aplicadas, quase exclusivamente, misturas betuminosas drenantes com ligante modificado com polímeros ou com adição de fibras na sua composição (Nielsen, 2006).

Estudos realizados em investigações francesas determinaram que o uso de ligante betuminoso modificado é necessário na composição das misturas betuminosas drenantes, de modo a prevenir a desagregação dos agregados e o escorrimento de ligante. Além disso, verificou-se que as camadas drenantes devem ser utilizadas apenas em estradas traçadas para circulação a altas velocidades, acima de 80 km/h (Nielsen, 2006).

Este tipo de misturas é suscetível ao frio e pode facilitar a formação de gelo no seu interior a temperaturas próximas e inferiores a zero graus celsius. É atingido o ponto de fusão nas superfícies constituídas por camadas betuminosas drenantes cerca de 30 minutos antes, em comparação com as superfícies compostas por camadas densas (Gibbs *et al.*, 2005).

Diversos aspetos têm sido estudados, relativamente à formulação, disposições construtivas, funcionamento estrutural, drenagem, rugosidade e aderência, propriedades acústicas e conservação (Oliveira, 1995).

Em França a porosidade adotada encontra-se entre 20 e 28 % para betumes puros ou modificados (Ruiz, 1997 citado por Dumke, 2005). A percentagem de ligante estabelecida tanto para betumes puros como para betumes modificados é entre 4,5 e 5,5 % (Nielsen, 2006).

A aplicação de camadas drenantes tem evoluído de tal modo que já são reconhecidas duas gerações. A primeira caracterizada por uma porosidade de aproximadamente 20 % e teor de ligante entre 4,4 a 5,5 %. A segunda com porosidade de aproximadamente 30 % e teor de ligante superior a 5,5 %, que propicia uma elevada drenagem superficial (Porto, 1999, citado por Souza, 2008).

Itália

Algumas das primeiras misturas drenantes foram aplicadas no final de 1980 (Gibbs *et al.*, 2005). O primeiro uso das misturas betuminosas drenantes foi destinado a aumentar a resistência à derrapagem e reduzir o efeito de pulverização em estradas molhadas. Quando se observou que

estas camadas também resultam em pavimentos de ruído reduzido, os esforços para a sua otimização foram aplicados no sentido de reduzir o ruído, sem perder segurança ou a durabilidade em termos da superfície do pavimento (Fletcher e Theron, 2011).

Cerca de 35 % das autoestradas italianas (1868 km), designadas por *Autostrade*, foram revestidas por uma camada betuminosa drenante até o final de 2003, sendo a maior parte destas misturas compostas por dimensão nominal máxima de 0/16 mm. A nova fórmula tende para um tamanho de agregado máximo menor, de 0/11 mm ou, talvez, até 0/8 mm (Gibbs *et al.*, 2005).

A compactação *Marshall* é utilizada para a produção de provetes. O teor mínimo de betume a aplicar é baseado no ensaio cântabro realizado a 20 °C. A perda de massa por desgaste máxima permitida é de 25 %. A avaliação dos danos provocados pela água na mistura é efetuada durante a formulação. Os provetes são imersos em banho de água a 49 °C, em seguida, são testados no ensaio cântabro a 20 °C. A perda máxima permitida é de 30 %. O teor máximo de ligante betuminoso é determinado pela porosidade que se pretenda, sendo esta estabelecida na ordem de 18 a 23 %. O intervalo de teor de ligante permitido é de 4 a 6 % (Huber, 2000).

Pasetto (2000), citado por Nielsen (2006), refere que em Itália as misturas betuminosas drenantes são estabelecidas como uma prática de construção, especialmente em autoestradas. A durabilidade é uma das preocupações dos italianos em relação a este tipo de misturas. Pasetto realizou uma pesquisa sobre a contribuição da utilização de vários tipos de fibras (polipropileno, *polyacrylonitrile* e celulose) no desempenho das misturas betuminosas drenantes. Verificou-se que as fibras melhoraram muito o comportamento no ensaio cântabro, especialmente para as misturas com teores mais elevados de ligante betuminoso.

Espanha

Em Espanha, foram construídos quatro troços experimentais entre 1979 e 1980, com utilização de misturas betuminosas drenantes, numa rede rodoviária de tráfego pesado (Kraemer, 1997, citado por Filho, 2001).

Nas primeiras aplicações as camadas betuminosas drenantes tinham porosidades entre 15 a 18 %, verificando-se uma colmatação rápida do pavimento. Começou-se por isso a aplicar misturas com uma porosidade na ordem dos 20 %. Na maior parte dos pavimentos drenantes realizados em Espanha, utilizaram-se betumes modificados (cerca de 80 %), principalmente desde que se aumentou a porosidade (Oliveira, 1995).

Em 1990, Espanha tinha a maior área de misturas betuminosas drenantes na Europa, quase 10 milhões de m². Em 1996, esse número tinha aumentado para 30 milhões de m² (Huber, 2000).

A formulação mais comum aplicada em Espanha de misturas betuminosas drenantes é de dois tipos, PA-11 e PA-16. Em Espanha a percentagem mínima de porosidade é de 20 %, sendo o teor mínimo de ligante betuminoso selecionado através da realização do ensaio cântabro, ensaio este desenvolvido neste país. Segundo o *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes* (PG-3, 2013), o ensaio cântabro quantifica a perda de massa dos provetes compactados, sendo o valor máximo permitido de 35 % (T00 a T1) e 40 % (T2 a T3), dependendo do tipo de tráfego de circulação previsto. Quanto menor o teor de betume, maior a perda de massa. O teor de ligante betuminoso típico utilizado é de 4,5 %. Para tráfego alto ou clima quente é especificado o uso de ligante betuminoso modificado com penetração 60/70. Para tráfego baixo e clima fresco é especificado o uso de um ligante modificado com penetração 80/100 (Huber, 2000).

2.5.2 Portugal

Atualmente Portugal é um dos países europeus com mais capital investido na rede rodoviária, nomeadamente em autoestradas, possuindo a maior extensão de autoestrada por habitante e por superfície de território. O tipo de pavimento que constitui a rede rodoviária portuguesa é, maioritariamente, do tipo flexível, ou seja, constituído por camadas de misturas betuminosas.

Luís (1997), citado por Nielsen (2006), refere que as misturas betuminosas drenantes foram introduzidas em Portugal na rede de autoestradas em 1991. Foram aplicadas camadas com 4 cm de espessura, com misturas formuladas de granulometria 0/15 mm, uma porosidade entre 20 a 25 % e com teor de ligante betuminoso modificado com polímeros entre 4,8 a 5,0 %.

A primeira camada drenante foi aplicada em 1993 e 1994, na autoestrada A3 - Sublanço Cruz/Braga, concessionada pela BRISA, numa extensão de cerca de 12 km (Nascimento, 2012). Até 1998 foram aplicados cerca de 6,5 milhões de m² de misturas betuminosas drenantes nas redes rodoviárias portuguesas (Oliveira, 2003).

Foi noticiado pelo Jornal Público, a 13 de setembro de 2006, que as vítimas mortais na autoestrada A1 diminuíram 52 % em 13 anos, entre 1992 e 2005. A concessionária Brisa contabilizou menos acidentes e menos feridos. Esta autoestrada foi sujeita a obras de beneficiação e alargamento e é atualmente uma autoestrada "melhorada", sem problemas graves a registar. De entre os estudos realizados para a implementação destas melhorias verifica-se que a concessionária, em zonas onde chove com mais frequência, optou pela execução da camada de desgaste com recurso a camada betuminosa drenante.

A utilização de camada betuminosa drenante tem sido amplamente aplicada na rede rodoviária portuguesa, como apresentado no estudo realizado por Nascimento (2012). No decorrer da presente dissertação, no itinerário complementar IC 9 concessionado pela BRISA, no sentido Fátima-Tomar, ao quilómetro 38,5, estão a proceder-se trabalhos de reabilitação da camada superficial, substituindo o pavimento denso por drenante, como ilustra a Figura 2.10.

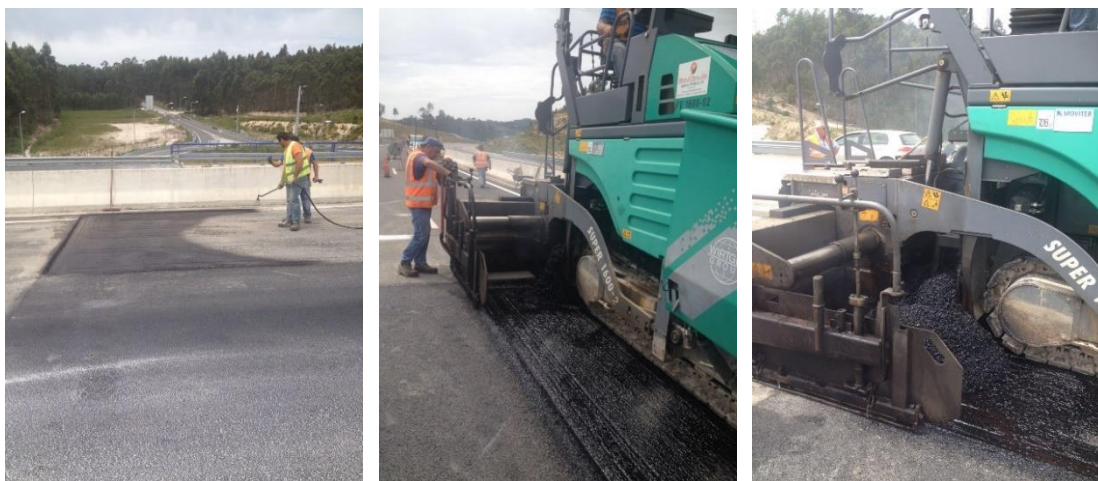


Figura 2.10 - Reabilitação - aplicação de camada betuminosa drenante em troço do IC9

2.6 Efeito da incorporação de fibras em misturas betuminosas drenantes

2.6.1 Objetivo

A incorporação de fibras na composição de misturas betuminosas drenantes em camadas de desgaste tem como objetivo melhorar as características de desempenho estrutural e funcional, nomeadamente a segurança e conforto do utente. Para tal, as características como adesão agregado/ligante, a regularidade do pavimento, o ruído de circulação e a resistência ao envelhecimento por ação dos agentes atmosféricos influenciam estas duas condições (Ribeiro, 2012). Contudo, a substituição de betumes modificados com polímeros, ou de betumes borracha, por betumes tradicionais com a adição de fibras deve ser devidamente justificada através de estudos comparativos de desempenho (InIR, 2009b).

As fibras atuam de duas formas distintas quando adicionadas em misturas betuminosas. Possuem uma ação a curto prazo, que atua durante a produção, transporte e colocação no pavimento, de modo a possibilitar o aumento da quantidade de ligante betuminoso, prevenindo que ocorra o escorrimento do mesmo, graças à sua grande superfície específica e às suas qualidades de interface, como ilustrado na Figura 2.11. Além disso, as fibras possuem uma ação a longo prazo, influenciando as propriedades mecânicas e a durabilidade da mistura betuminosa durante a sua vida útil, devido à sua geometria alongada permitindo um reforço do mástique (betume, filler e fibra) que liga o agregado (Homem, 2002; Ribeiro, 2012).

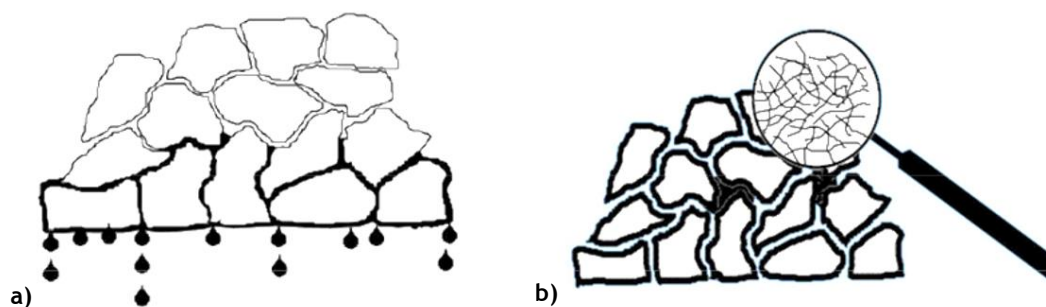


Figura 2.11 - Diferenças entre misturas a) sem e b) com adição de fibras (adaptado de Martinho *et al.*, 2013)

Para além da utilização de fibras em misturas betuminosas drenantes, pelas razões descritas anteriormente, estas podem ser adicionadas em misturas betuminosas densas para reforçar a resistência da mistura à deformação permanente e à desagregação (NCHRP, 2015).

As fibras são introduzidas durante a mistura dos agregados aquecidos permitindo-lhes ligarem-se com o agregado. Algumas fibras granuladas contêm uma pequena quantidade de ligante betuminoso, sendo recomendado pelo fabricante como esta adição deve ser contabilizada na mistura (Kandhal 2002; Putman, 2012). De modo a determinar o melhor momento de adição das fibras no tambor da misturadora, por forma a otimizar a uniformidade da mistura, é importante a consulta do fabricante destas.

De modo a serem transferidas eficazmente as tensões resultantes da utilização, deve haver uma boa aderência entre a fibra e o ligante betuminoso. Uma maior área superficial sobre as fibras pode auxiliar esta adesão. Além disso, estas têm de ser uniformemente dispersas na mistura de modo a evitar concentrações de tensão (Busching *et al.*, 1970, citados por NCHRP, 2015).

Para a produção de uma mistura betuminosa drenante de alta qualidade é necessária a monitorização cuidadosa da temperatura, de acordo com as propriedades do ligante betuminoso. Se a temperatura da mistura for muito alta, a mistura pode ficar suscetível ao escorrimento do ligante e provocar a oxidação prematura deste, característica que pode causar o mau desempenho da mistura (Putman, 2012).

Normalmente as misturas betuminosas com adição de fibras são produzidas utilizando os mesmos procedimentos que as misturas convencionais (NCHRP, 2015).

Estudos recentes demonstram que a aplicação de misturas betuminosas drenantes apresenta melhor desempenho e maior durabilidade quando possuem ligantes betuminosos modificados com polímeros na sua composição. A adição de fibras nestas misturas tem sido feita para controlar o escorrimento do ligante, sendo que esta era uma das questões verificada nas misturas produzidas antigamente (APA, 2003).

O relatório NCHRP (2015) reúne informação acerca do estado atual da adição de fibras em misturas betuminosas. Este descreve os vários tipos de fibras que foram utilizados no estudo, as suas propriedades e o modo como foram testadas, as formulações, os tipos de aplicações nas quais foram utilizadas, os ensaios de laboratório e o desempenho das misturas.

Wu *et al.* (2006) focaram o seu estudo na avaliação dos efeitos e propriedades das fibras celulósicas e poliéster em misturas betuminosas drenantes. Foram realizados testes de permeabilidade, abrasão, propriedades volumétricas, deformação e danos causados pela água. Os resultados experimentais indicam que as fibras estabilizam o ligante betuminoso permitindo o recobrimento deste em torno dos agregados. Além disso, eles resultam numa ligeira melhoria da resistência mecânica da mistura betuminosa drenante a alta temperatura. A partir da análise de comparação, este estudo conclui que as fibras celulósicas aparentam ter um melhor desempenho do que as fibras poliéster em misturas betuminosas drenantes.

2.6.2 Tipos de fibras

Uma grande variedade de tipos de fibras tem sido usada em misturas betuminosas, incluindo celulose, minerais, polímeros sintéticos, e vidro, bem como alguns tipos de fibras menos comuns. Materiais reciclados, tais como fibra de papel de jornal, fibras de tapetes, e fibras de pneus reciclados também têm sido utilizados. Estes diferentes tipos de fibras têm vantagens e desvantagens que os tornam mais adequados para algumas aplicações do que outros. Por exemplo, a celulose não é forte em tensão, porém é absorvente e retém o ligante betuminoso, por conseguinte, é bastante apropriada para o aumento de drenagem de misturas betuminosas drenantes, mas não para reforçar misturas betuminosas classificadas como densas (NCHRP, 2015).

De seguida são apresentados os tipos de fibras que podem ser incorporados nas misturas betuminosas drenantes.

Celulose

As fibras celulósicas são feitas à base de plantas, sendo normalmente produzidas a partir de madeira, ou, ainda em outros casos, produzidas a partir de jornal reciclado. Estas fibras tendem a possuir ramificação com elevada absorção, sendo essa natureza que lhes permite reter grandes teores de ligante betuminoso nas misturas. As fibras celulósicas podem ser fornecidas na forma solta ou em aglomerado (NCHRP, 2015). Estas fibras têm a vantagem de ser mais económicas, tendo em conta a grande facilidade com que são obtidas e terem origem numa fonte renovável (Carvalho, 2012).

As fibras celulósicas, ilustradas na Figura 2.12, absorvem aproximadamente cinco vezes a sua massa, retendo o ligante e garantindo uma boa aderência na mistura (NCHRP, 2015).



Figura 2.12 - Fibras celulósicas (Fonte: Dumke, 2005)

Adicionando 0,3 ou 0,5 % de fibras nas misturas betuminosas drenantes pouco afecta o comportamento de escoamento, sendo 0,5 % a percentagem utilizada em experiências na Argentina, verificando-se que com maiores valores, ocorrem problemas com a determinação do teor ótimo da mistura (Bolzan, 2000, citado por Dumke, 2005). Entretanto, uma das conclusões dos ensaios realizados por Decoene (1990), citado por Dumke (2005), a adição de 0,3 % de fibras celulósicas permite um aumento do teor de ligante e da sua durabilidade.

As fibras celulósicas não modificam as misturas betuminosas, mas sim incorporadas a estas reúnem condições que melhoram o seu desempenho. Estas fibras, ilustradas na Figura 2.13, são envolvidas com ligante betuminoso através de um processo especial que auxilia na granulação destas. O betume ocupa os espaços vazios entre as fibras, efeito necessário para a completa dispersão do granulado durante o processo de mistura com os agregados (JRS, 2016).

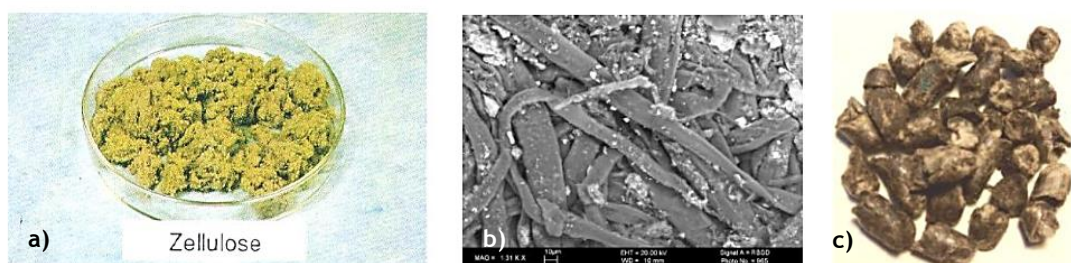


Figura 2.13 - Aspeto de a) celulose, b) fibras celulósicas com betume, c) granulado de fibras celulósicas revestidas com betume -Viatop® Premium (Fonte: Martinho *et al.*, 2013)

Na Figura 2.14 apresentam-se os principais tipos de granulado de fibras celulósicas e as suas utilizações em misturas betuminosas, por exemplo as fibras Arbocel têm como vantagem minimizar a retração no betão de cimento, as fibras Viatop® AD10 promovem a adesividade das misturas e as fibras Viatop® 66 permitem uma maior percentagem de betume (Martinho *et al.*, 2013).



Figura 2.14 - Exemplos de fibras granulares celulósicas a) Arbocel, b) Viatop® AD10 e c) Viatop® 66 (Fonte: Martinho *et al.*, 2013)

O granulado apresenta dimensões de 5 a 8 mm de comprimento e de 3 a 4 mm de diâmetro. As fibras celulósicas são resistentes a temperaturas de 140 °C durante diversos dias e apenas alguns segundos a temperaturas da ordem de 200 °C (Homem, 2002).

Segundo Mourão (2003), as fibras celulósicas granuladas, quando impregnadas com ligante betuminoso apresentam as seguintes vantagens, dispersão rápida e completa, inodora e livre de pó, insensibilidade à humidade, facilidade de dosagem e produção de mistura mais homogênea.

Mineral

Em misturas betuminosas drenantes as fibras minerais são adicionadas em percentagens da ordem de 1 % (Homem, 2002).

Qualquer das fibras que ocorrem naturalmente, tais como o amianto, ou fibras produzidas a partir de minerais podem ser utilizadas. Fibras minerais (também chamadas de lã mineral ou lã de rocha) são fabricadas por fusão de minerais, posteriormente, formando fibras por fiação ou por extrusão. Segundo a biografia consultada pelo NCHRP (2015), tem-se que os minerais utilizados para criar fibras minerais incluem escórias ou uma mistura de escória e de rocha (US EPA, 1995; Brown *et al.*, 1996), basalto (Morova, 2013), brucita (Guan *et al.*, 2014), metal (Garcia *et al.*, 2009, 2012 a e b, 2013 a e b; Serin *et al.*, 2012) e carbono (Clevin, 2000; Liu e Shaopeng, 2011; Khattak *et al.*, 2012, 2013; Yao *et al.*, 2013).

As fibras de amianto foram o primeiro tipo de fibra empregue em misturas betuminosas, tendo sido aplicadas desde a década de 1920 (Serfass e Samanos, 1996, citados por NCHRP, 2015) até 1960, altura em que as questões ambientais e de saúde restringiram o uso de amianto (Busching *et al.*, 1970, citados por NCHRP, 2015).

Fibras Poliméricas Sintéticas

Polímeros diferentes têm diferentes pontos de fusão, que precisam ser considerados ao adicionar à mistura betuminosa quente (NCHRP, 2015).

As fibras de polímero mais frequentemente utilizadas são poliéster, polipropileno, aramida, e combinações de polímeros, como apresentado na Figura 2.15 a combinação de fibras de polipropileno e aramida. Segundo Kaloush *et al.* (2010), as fibras de aramida contraem a altas temperaturas, o que possibilita a resistência do pavimento à deformação. Outras fibras incluem o *nylon*, poliparafenileno, e outros materiais menos utilizados. É de salientar que diferentes polímeros têm diferentes pontos de fusão, que precisam ser considerados ao adicionar à mistura betuminosa quente. A produção de fibras sintéticas tipicamente envolve a extração de um polímero fundido através de pequenos orifícios. As fibras podem ser agrupadas em fios, embora, hoje em dia, o fio não é habitualmente usado em betumes (Busching *et al.*, 1970, citados por NCHRP, 2015).



Figura 2.15 - Pormenor de fibras poliméricas sintéticas: polipropileno e aramida
(Fonte: Kaloush *et al.*, 2010)

Fibras metálicas

Hannant (1994), citado por Homem (2002), salienta que uma grande variedade de formas e comprimentos de fibras metálicas podem ser obtidos, dependendo do seu processo de produção. Estas podem sofrer deformações mecânicas de várias formas de modo a aumentar a resistência de aderência. Estas fibras contribuem para as características estruturais da mistura betuminosa, aumentando a sua resistência mecânica, nomeadamente atuando como um reforço a longo prazo, porém, não tendo nenhuma influência como material estabilizante.

As fibras metálicas são relativamente grossas, possuindo por volta 300 μm de diâmetro, sendo adicionadas em percentagens da ordem de 0,4 a 1,5 % da massa total da mistura. Pressupondo que não é usual que o material compósito rompa devido à rutura da fibra metálica, mas sim relacionada ao arranque das fibras, não há razão para se aumentar a resistência à tração acima da obtida com os aços comuns e com baixo teor de carbono. A resistência à tração é de aproximadamente 1100 MPa e o módulo de elasticidade é de 200 GPa (Homem, 2002).

Em pavimentação betuminosa a sua aplicação não é usual. As fibras metálicas não possuem capacidade de aderência ao ligante betuminoso, existindo a possibilidade de ocorrência de ferrugem, assim como de problemas de compactação e de características da superfície (Homem, 2002).

Fibras de Vidro

As fibras de vidro não têm sido relatadas muitas vezes na literatura, mas parecem ter propriedades desejáveis, incluindo o módulo de elasticidade à tração elevado (aproximadamente 60 GPa), baixo alongamento (3 a 4 %), elevada recuperação elástica (100 %), e elevado ponto de amolecimento (815 °C), (NCHRP, 2015). As características de fibras de vidro, usualmente utilizadas em pavimentação, são as seguintes: diâmetro de 6 mm, densidade de 2,50 g/cm³ e comprimento entre 1 e 10 mm (Homem, 2002).

Este tipo de fibras concede um aumento de resistência mecânica à mistura betuminosa onde são empregues, aumentando a sua capacidade estrutural. Contudo, as fibras de vidro são frágeis, devendo ser manuseadas com cuidado durante a produção e construção. Para além disso, estas fibras detêm uma baixa capacidade de aderência ao ligante betuminoso necessitando da utilização de um tratamento superficial (Homem, 2002).

A adição de fibras de vidro permite uma melhoria das características da mistura tanto a curto como a longo prazo, ou seja, este tipo de fibras atua como estabilizante, a curto prazo, e como material de reforço, a longo prazo (Corté, 1998, citado por Homem, 2002).

Nos resultados obtidos pela pesquisa e questionário realizado pelo NCHRP é demonstrado que 30 dos 50 estados dos Estados Unidos da América atualmente permitem ou exigem o uso de fibras em algumas misturas betuminosas. De longe, o uso mais comum é em misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA) e misturas betuminosas drenantes (NCHRP, 2015)

No Quadro 2.1, apresentam-se as vantagens e desvantagens mencionadas no relatório NCHRP (2015).

Quadro 2.1 - Vantagens e desvantagens dos tipos de fibras comuns na aplicação em misturas (adaptado de NCHRP, 2015 e Homem, 2002)

Tipo de fibra	Vantagens	Desvantagens
Celulose	<ul style="list-style-type: none"> - Estabiliza o ligante betuminoso em misturas drenantes e misturas do tipo SMA; - Absorve ligante betuminoso, permitindo alto teor de ligante tornando as misturas mais duradouras. - Relativamente barato; - Pode ser feita a partir de uma variedade de plantas; - Amplamente disponível; - Pode ser produzido a partir de materiais reciclados, como papel de jornal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Grande absorção de ligante betuminoso aumentando o custo da mistura; - Não resiste a tensões.

Mineral	<ul style="list-style-type: none"> - Estabiliza o ligante betuminoso em misturas drenantes e misturas do tipo SMA; - Não é tão absorvente como as fibras celulósicas; - Fibras eletricamente condutoras têm sido utilizadas para fins indutivos de aquecimento ou de degelo promovendo a selagem de fendas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Algumas camadas podem degradar-se devido à presença de água; - Pode criar misturas duras, difíceis de compactar, sendo agressivas e causando danos nos pneus quando aplicadas em camadas de desgaste. 	
Poliéster	<ul style="list-style-type: none"> - Resiste a fendas e à desagregação; - Aumenta a resistência da mistura e a sua estabilidade; - Possui um ponto de fusão mais elevado do que o polipropileno; - Resistência alta à tração. 	<ul style="list-style-type: none"> - Maior peso específico significa menos fibras por unidade de peso acrescentado; - Custo/benefício não comprovado/varia. 	
Fibras Poliméricas Sintéticas	Polipropileno	<ul style="list-style-type: none"> - Resiste à fadiga e deformação permanente; - Compatível com o betume; - Dispersa-se facilmente no ligante betuminoso; - Resiste a ácidos e sais; - Baixo peso específico, o que significa mais fibras por unidade de peso adicionado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor ponto de fusão do que algumas outras fibras (149 °C). Requer o controle de temperatura de produção; - Custo/benefício não comprovado/varia.
	Aramida	<ul style="list-style-type: none"> - Resiste à fadiga, desagregação e deformações permanentes; - Aumenta a resistência da mistura e a sua estabilidade; - Resistência alta à tração. 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo/benefício não comprovado/varia.
Metálica		<ul style="list-style-type: none"> - Compostas por redes metálicas de carbono que previnem e retardam a ocorrência e desenvolvimento de fendas; - Grande variedade de forma e comprimento; - Contribui para as características estruturais da mistura betuminosa, aumentando a sua resistência mecânica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Não possuem capacidade de aderência ao ligante betuminoso; - Nenhuma influência como material estabilizante; - Possibilidade de ocorrência de ferrugem; - Possibilidade de surgimento de problemas de compactação e de características da superfície.
Fibras de vidro		<ul style="list-style-type: none"> - Resistência alta à tração; - Baixo alongamento; - Recuperação elástica alta; - Ponto de amolecimento alto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Frágil; - Custo/benefício não comprovado/varia; - Podem partir onde se cruzam e durante a mistura e compactação.

O uso de fibras celulósicas ou de minerais é típico para misturas do tipo SMA e misturas betuminosas drenantes. Nas misturas densas existem poucas aplicações de fibras sendo estas do tipo polímeros sintéticos (NCHRP, 2015).

2.6.3 Aplicação de fibras nas misturas betuminosas drenantes

Por muitas décadas, em várias partes do mundo, foi aplicado o uso de fibras em misturas betuminosas (NCHRP, 2015).

Atualmente, as misturas betuminosas drenantes têm como requisito possuírem uma elevada porosidade, de modo a assegurar o seu bom desempenho de permeabilidade e baixo escorrimento do ligante betuminoso. Em muitos casos, as misturas betuminosas são constituídas com ligante betuminoso modificado com polímeros e, em outros casos, com fibras. O ligante betuminoso modificado com polímeros ajuda na redução do escorrimento do ligante betuminoso e aumenta o desempenho a altas temperaturas da mistura, nomeadamente, na resistência à deformação permanente. O uso de fibras é outra alternativa para reduzir o escorrimento do ligante (Hansen, 2008).

Para a realização desta subsecção recorreu-se aos dados recolhidos pelo relatório NCHRP (2015).

Estados Unidos da América

Resumindo o estudo elaborado e presente no relatório NCHRP (2015), em abril de 2014, este organismo distribuiu por todos os 50 estados dos EUA um questionário acerca da incorporação de fibras em misturas betuminosas. Foram recebidas respostas de 48 estados.

No Quadro 2.2, observa-se que onze estados usam fibras, tanto em misturas do tipo SMA, como em misturas betuminosas drenantes. Doze estados usam fibras apenas em misturas do tipo SMA e oito usam fibras apenas em misturas betuminosas drenantes. Estas informações refletem aproximadamente os tipos de misturas usadas em cada um dos estados. Por exemplo, até agora a Carolina do Norte tem utilizado apenas fibras em misturas betuminosas drenantes, contudo este estado já possui um projeto para a regulamentação do uso de misturas do tipo SMA, porém ainda não aplicou nenhuma.

Quadro 2.2 - Estados e distritos que indicam o uso de fibras em várias aplicações (adaptado de NCHRP, 2015)

Aplicação	Indicação de uso - estados e distritos
SMA ou misturas descontínuas	Alabama, Colorado, Connecticut, Illinois, Kansas, Kentucky, Michigan, Missouri, Ohio, Pensilvânia, Dakota do Sul, Wisconsin
Misturas drenantes ou misturas descontínuas	Connecticut, Flórida, Maine, Carolina do Norte, Nova Hampshire, Nova Iorque, Oregon, Carolina do Sul
SMA e misturas betuminosas drenantes	Delaware, Indiana, Geórgia, Louisiana, Maryland, Mississippi, Nova Jersey, Oklahoma, Tennessee, Texas, Virgínia
Sobreposições em misturas betuminosas densas	Idaho
Outras aplicações	Connecticut - misturas frias; New Hampshire e Pensilvânia - misturas antiderrapantes; Ohio - especificação suplementar para os distritos que desejam usar fibras; Virgínia - misturas a quente em camadas finas.

Nove estados relataram que realizaram, ou estão a realizar, pesquisas sobre o uso de fibras em misturas betuminosas. Um total de 22 estados relataram ter regulamentações ou métodos de ensaio específicos para fibras ou misturas betuminosas reforçadas com fibra. A maioria requer um valor máximo admissível de escorrimento de ligante betuminoso, tipicamente não mais do que 0,3 % da massa total da mistura. AASHTO T 305:2014 - *Method Of Test For Determination Of Draindown Characteristics In Uncompacted Asphalt Mixtures* é frequentemente citado como o método de ensaio utilizado. Os estados do Kansas e Carolina do Sul têm os seus próprios métodos de ensaio de escorrimento de ligante, que são semelhantes aos outros métodos.

Canadá

O distrito de Ontario aplica fibras na composição das misturas do tipo SMA e algumas experiências de misturas em estudo. Nas misturas em estudo, o propósito da adição das fibras é o de ajudar a resistir à desagregação. Cinco troços experimentais foram construídos em 2007. Para comparar o desempenho entre estes, um dos troços era convencional sem fibras, e os restantes quatro troços experimentais possuíam diferentes combinações de ligante betuminoso modificado com polímeros e fibras de *Politereftalato de etileno* (PET), polímero termoplástico.

Austrália/ Nova Zelândia

As fibras celulósicas utilizadas em misturas do tipo SMA apresentam tipicamente uma percentagem de 0,3 % da massa total da mistura. Outras fibras incluindo a lã de rocha, fibra de vidro, poliéster e lã natural, são adequadas para este uso, mas raramente aplicadas uma vez que a celulose é mais rentável.

No sul da Austrália, as misturas betuminosas drenantes são apenas aplicadas em autoestradas onde os veículos circulam a alta velocidade, devido à capacidade destas misturas em reduzir o efeito *spray* de água, que reduz a visibilidade comprometendo a segurança do condutor. Na Nova Zelândia esta é uma prática comum, como exemplificado na Figura 2.16. No entanto, as misturas do tipo SMA são as mais populares devido ao seu maior período de vida útil e das suas propriedades funcionais (Fletcher e Theron, 2011).



Figura 2.16 - Drenagem livre de camada betuminosa drenante em autoestrada em *South Auckland* - Nova Zelândia (Fonte: Fletcher e Theron, 2011)

Brasil

As misturas do tipo SMA exigem a utilização de fibras sendo tipicamente aplicadas fibras celulósicas. Contudo, as misturas SMA não são amplamente utilizadas no Brasil, sendo, talvez menos de 4000 km no total. No Brasil, houve algumas aplicações de micro revestimento com fibras de vidro.

Vale *et al.* (2014) estudaram os efeitos do uso de fibras de coco nas misturas do tipo SMA. A parte do nordeste do Brasil é um dos principais produtores de coco. Foi verificado que a adição de fibras celulósicas e de coco aumenta a resistência conservada em tração indireta (ITSR). Porém, as misturas SMA com fibras de coco demonstraram um baixo desempenho à fadiga, quando comparado com a adição de fibras celulósicas ou sem a adição de qualquer tipo de fibra. Este resultou, possivelmente, devido à alta absorção da fibra de coco que aumentou a rigidez da mistura. Os autores também observaram que as fibras de coco longas eram difíceis de se misturar com o agregado, reduzindo assim a resistência da mistura por interferir com intertravamento do agregado.

Finlândia

A Finlândia aplica fibras celulósicas em misturas do tipo SMA, sendo que este tipo de misturas é especialmente utilizado em estradas para tráfego pesado. As misturas do tipo SMA são consideradas o melhor pavimento de estradas, com boa resistência à deformação, baixas temperaturas e desgaste, sendo que em períodos de neve os pneus com correntes são o maior problema (Campbell, 1999).

Alemanha

As misturas do tipo SMA foram desenvolvidas na Alemanha em meados dos anos 1960 e têm sido utilizadas na Europa há mais de 30 anos para fornecer melhor resistência à deformação permanente e para resistir ao desgaste provocado pelos pneus com correntes de neve (Kumar *et al.*, 2005, citados por Moghaddam *et al.*, 2014). A aplicação de fibras em misturas do tipo SMA é recorrente na Alemanha.

Um dos principais fornecedores de fibras celulósicas utiliza fibras revestidas com ligante betuminoso de modo a facilitar a sua dispersão na mistura.

Israel

Em Israel, muitas das camadas de desgaste das estradas existentes ainda são compostas por misturas betuminosas densas com baixa macro textura. O uso de misturas do tipo SMA e outras misturas betuminosas, estudadas pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP), começou apenas em 1997 (Yaron e Nesichi, 2005).

Netivei Israel, a companhia nacional de estradas, exige que para as misturas do tipo SMA e misturas drenantes sejam aplicadas fibras celulósicas ou fibras minerais.

Vários ensaios foram efetuados numa secção de teste construído pela *Netivei Ayalon Company*, que inclui uma mistura betuminosa densa (referência), uma mistura betuminosa drenante, uma mistura do tipo SMA 0/8 mm (mistura padrão) e uma mistura do tipo SMA 0/5 mm (mistura experimental).

Todas as misturas aplicadas estão em conformidade com os padrões israelitas existentes para a rugosidade e níveis de resistência à derrapagem. Com base na experiência internacional e em Israel, tendo por base dados de construção, para a mistura do tipo SMA 0/8 mm é esperado que esta tenha uma vida útil longa e um melhor desempenho quando comparada com as misturas betuminosas drenantes e densas.

A porosidade das misturas SMA é menor do que a porosidade de uma mistura betuminosa drenante, e a sua capacidade de drenagem é melhor do que a de uma mistura betuminosa densa (Nesichi, 2005).

Outros países de Médio Oriente

Não existe conhecimento da utilização de fibras nos países de Médio Oriente.

O Irão tem utilizado algumas misturas do tipo SMA e misturas betuminosas drenantes, mas normalmente usa ligante modificado com polímeros elastómeros, do tipo estireno-butadieno-estireno (SBS), ou granulado de borracha para limitar a drenagem para as camadas inferiores do pavimento.

Polónia

Na Polónia não são frequentes as aplicações de fibras em misturas betuminosas, contudo existe uma empresa que tem utilizado fibras sintéticas em misturas betuminosas a frio.

Outro uso europeu é o da aplicação de fibras em misturas do tipo SMA, sendo que, cerca de 99 % das fibras utilizadas são de celulose. Algumas empresas europeias que operam na Polónia (e outros países europeus) realizaram pesquisas sobre o uso de fibras nos últimos 10 anos, contudo, atualmente, este estudo é realizado e coordenado por programas de investigação europeus, designados por *Research and Technological Development* e *COST, European Cooperation in Science and Technology*. No entanto, a informação obtida é que estes programas não estão focados no uso de fibras em misturas betuminosas.

Existe uma patente polaca para o processo de utilização de fibras a partir de resíduos de pneus (borracha), porém não houve nenhuma aplicação prática até à data. Houve uma pesquisa sobre

o uso de fibras de polímero em camadas de base de alta resistência para aplicações em zonas de tráfego pesado.

Espanha

As fibras celulósicas são utilizadas em misturas betuminosas de alto desempenho para evitar a drenagem para as camadas inferiores do pavimento. Contudo esta é uma aplicação limitada, sendo principalmente utilizada em aeroportos. A utilização de misturas do tipo SMA é rara em Espanha.

Em Espanha, normalmente são aplicados aditivos estabilizadores para evitar o escorrimento do ligante betuminoso durante o armazenamento, transporte e aplicação da mistura betuminosa. (Recasens, 2006).

Tradicionalmente, o uso de fibras de amianto era bastante popular devido às suas excelentes vantagens mecânicas, contudo, após a confirmação da sua toxicidade, o seu uso foi proibido em muitos países. Em sua substituição, atualmente, são utilizadas, maioritariamente, fibras orgânicas ou sintéticas (Recasens, 2006).

Tanto a adição de fibras no mástique como a incorporação de polímeros no ligante betuminoso têm o mesmo objetivo, o de melhorar a suscetibilidade térmica e reduzir a fragilidade da mistura, tornando-a menos deformável e mais resistente a fissuras e à ação abrasiva de tráfego (Recasens, 2006).

Reino Unido e Norte da Irlanda

As fibras celulósicas são aplicadas em misturas do tipo SMA de modo a evitar a drenabilidade para as camadas inferiores do pavimento.

No Norte da Irlanda as fibras inorgânicas ou orgânicas podem ser usadas para ajudar a evitar o escorrimento do ligante betuminoso (Ongel *et al.*, 2007).

No Reino Unido a utilização de ligante betuminoso modificado com polímeros ou a adição de fibras são especificados para reduzir o escorrimento do ligante nas misturas betuminosas drenantes (Ongel *et al.*, 2007).

Bolzan *et al.* (2001) mencionam que há registos de ensaios em 28 estradas (com 83 secções), realizados entre 1967 e 1991, no Reino Unido, pelo *Transportation Research Laboratory* (TRL). Estes ensaios incluem uma variedade de materiais, com agregados com dimensões máximas nominais de 20, 14 e 10 mm, vários teores de ligante betuminoso não modificado, teores de ligante modificado entre 3,2 e 5,7 % com diferentes polímeros, fibras ou outros modificadores. Estes modificadores incluem tanto polímeros como fibras, que aumentam a superfície específica. A aplicação de polímeros pode ser considerada como parte do ligante betuminoso,

enquanto a adição de fibras modifica a mistura em vez do betume. Têm sido ensaiados vários ligantes modificados com polímeros, com a adição de borracha natural, polímeros estireno-butadieno-estireno (SBS), etileno-acetato de vinilo (EVA), resina epoxy e cal hidratada.

As respostas obtidas pelo relatório NCHRP (2015) confirmam que a utilização de fibras, a nível internacional, é predominantemente em misturas do tipo SMA e misturas betuminosas drenantes, sendo que o tipo de fibras amplamente utilizado é de celulose.

Capítulo 3 - Aspectos relativos à ação da água nas camadas betuminosas drenantes

3.1 Introdução

Com a aplicação de misturas betuminosas drenantes na camada de desgaste das estradas os perigos da aquaplanagem deixam de existir e a visibilidade reduzida devido à projeção de água em tempo de chuva deixa de ser um problema passando a ser uma questão residual. Estas misturas, permitindo a drenagem superficial, tornam a circulação rodoviária mais segura, como ilustra a Figura 3.1.



Figura 3.1 - Drenagem superficial (adaptado de http://www.enxco.co.jp/english/business_activities/expressway_management/management/measures.html, consultado a 3 de janeiro de 2016)

As solicitações a que os pavimentos estão sujeitos originam a sua progressiva degradação, ao longo da sua vida útil. As solicitações dos pavimentos são, essencialmente, resultado da ação do tráfego e da ação dos agentes climáticos. A ação do tráfego consiste nas forças exercidas pelo contacto entre o pneu e o pavimento nas camadas betuminosas. A ação dos agentes climáticos é, essencialmente, constituída pela ação da água e pela ação da temperatura. A ação da água origina, por exemplo, a diminuição da capacidade de aderência ou coesão da mistura betuminosa drenante, enquanto a ação da temperatura é responsável pelo envelhecimento do ligante betuminoso, favorecendo o surgimento do fenómeno de desagregação (Silva, 2005). Neste capítulo as preocupações debruçar-se-ão acerca da ação da água nas misturas betuminosas drenantes.

As misturas betuminosas drenantes, devido à sua granulometria descontínua, estão expostas à água e, portanto, mais suscetíveis aos danos causados por esta (Poulikakos e Partl, 2009). A água pode influenciar as misturas betuminosas de muitas formas e causar vários problemas. Particularmente, e devido à capacidade de drenagem destas misturas, como ilustrado na

Figura 3.2, a resistência à ação da água é uma característica de elevada importância que influencia o seu desempenho e durabilidade (Carvalho, 2012).



Figura 3.2 - Mistura betuminosa drenante

3.2 Consequências da presença de água na degradação das misturas

Um dos principais fatores que afeta a durabilidade das misturas betuminosas é a ação da água. Como resultado da sua presença e movimentação surgem mecanismos de degradação importantes, como a falha na adesividade entre o betume e o agregado, a perda de coesão e de resistência do betume, assim como a degradação ou fratura de partículas de agregado quando sujeitos a congelamento (Poulikakos e Partl, 2009). Estas degradações originam patologias nos pavimentos que serão discutidas na secção seguinte, neste capítulo.

Os danos provocados pela presença da água são uma combinação de processos (Hamzaha *et al.*, 2015). A adesão é uma propriedade que ocorre entre dois materiais diferentes, entre agregado e betume e a coesão é uma característica da mistura betuminosa. Uma das primeiras consequências nocivas devido à presença de água numa mistura betuminosa é a perda de ligação agregado-betume, como ilustrado na Figura 3.3 (Silva, 2005).

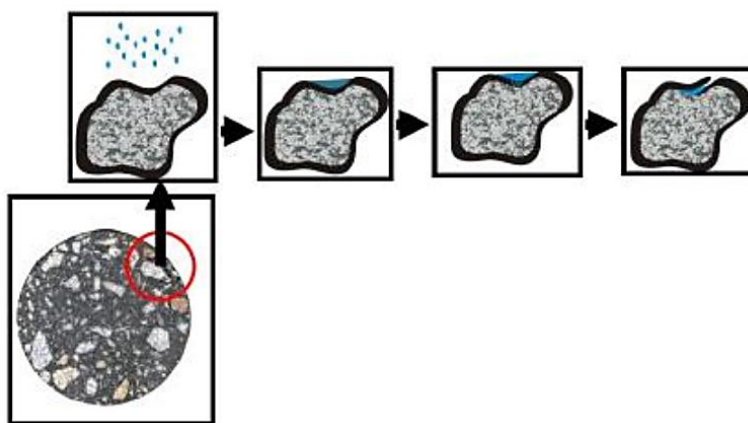


Figura 3.3 - Ilustração dos danos causados pela presença de água na mistura (Fonte: Kim e Lutfi, 2006)

3.2.1 Perda de adesividade

O betume é utilizado como ligante nas misturas betuminosas devido às suas características adesivas que possibilitam o envolvimento dos agregados formando uma estrutura mais resistente (Pereira, 2009).

A adesão do betume ao agregado é o principal fator na resistência à ação da água. Esta propriedade pode ser melhorada através da aplicação de aditivos próprios para esse fim, diferentes dos aditivos utilizados na modificação dos betumes. É possível aumentar a espessura da película de ligante usando um betume modificado, o que associado a uma maior viscosidade do material aumenta a resistência à ação da água. Em laboratório, o ensaio cântabro após imersão permite avaliar esta propriedade (Oliveira, 1995).

O grau de adesividade é um dos fatores que determina a durabilidade de uma mistura betuminosa. Para além das características do ligante betuminoso, também as propriedades dos agregados que constituem as misturas betuminosas possuem um papel importante e são responsáveis pela resistência adesiva entre o betume e o agregado, influenciando a sensibilidade à água.

As características do agregado que influenciam o fenómeno da adesividade são muitas, entre as quais se destacam a porosidade e absorção, a composição química, a composição mineralógica, a forma e angularidade, a textura superficial e a viscosidade do betume.

- Porosidade e Absorção

A porosidade é o volume de ar retido entre as partículas de agregado e betume sendo comumente chamados de poros da mistura. Estes são descritos como cavidades de formas irregulares, que podem estar interligados entre si e apresentar forma e diâmetro variados. A parte interligada de um sistema de poros é chamada de espaço efetivo do poro (Kandhal e Lee, 1972, citados por Gouveia *et al.*, 2004). A porosidade e a distribuição do tamanho dos poros estão fortemente relacionadas com a absorção do betume pelos agregados, uma vez que a taxa e a extensão da absorção de betume não dependem apenas do total de vazios, mas também do tamanho real do poro no agregado, sob os efeitos da pressão capilar e da viscosidade do betume (Lee *et al.*, 1990).

O tamanho e a distribuição dos poros podem determinar a quantidade e o mecanismo de absorção. Alguns poros de pequena dimensão, que podem ser penetrados pela água, podem não apresentar absorção de betume devido à maior viscosidade do betume comparada à da água, como ilustrado na Figura 3.4 (Gouveia *et al.*, 2004).

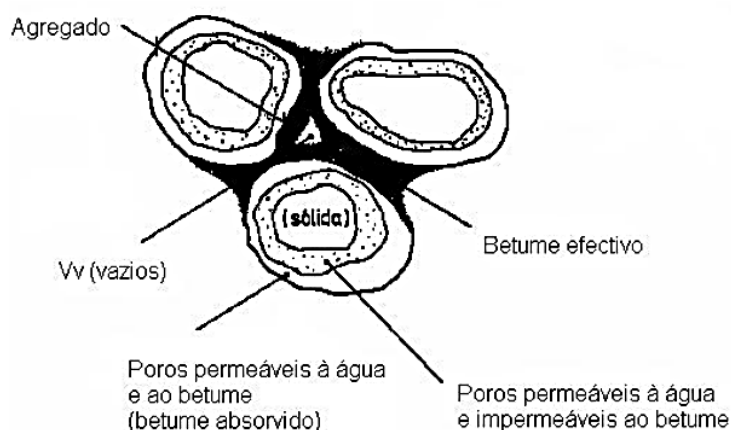


Figura 3.4 -Adesão betume-agregado
(Fonte: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571243352/CMIT_AulaT7.pdf,
consultado a 10 de fevereiro de 2016)

De salientar que o betume absorvido pelo agregado não atua mais como ligante. Esta absorção diminui a espessura de betume que envolve as partículas de agregado. Assim, caso este facto não seja tido em consideração na formulação da mistura, as misturas tornam-se mais frágeis e suscetíveis às ações prejudiciais da água (Lee *et al.*, 1990).

- Composição química

Lettier *et al.* (1949), citados por Gouveia *et al.* (2004), ao estudarem a estrutura cristalina dos agregados com a mesma origem, porém com características de absorção distintas, verificaram que os agregados que absorvem menos betume possuem estruturas cristalinas compactas e densas e que, agregados que absorvem mais betume são caracterizados por numerosos interstícios entre os cristais. Estes investigadores verificaram que a capacidade de absorção do agregado não está relacionada diretamente com a sua composição química, mas sim com a porosidade da partícula, pois existem agregados absorventes e não absorventes com a mesma composição química.

- Composição mineralógica

A identificação da composição mineralógica do agregado permite antever o seu comportamento na mistura betuminosa. Os agregados podem ser classificados em ácidos, básicos ou ultrabásicos, de acordo com a quantidade de sílica (SiO_2) presente na sua composição. O sentido dos termos ácido e básico não corresponde ao utilizado na química, mas está relacionado com a carga elétrica superficial das partículas do agregado. A maioria dos agregados silicosos tais como arenito, quartzo e cascalho tornam-se negativamente carregados na presença de água, enquanto materiais calcários conduzem a carga positiva (Bernucci *et al.*, 2010).

Os agregados de rochas classificadas como ácidas costumam apresentar problemas de adesividade, enquanto os de rochas classificadas como básicas costumam apresentar melhor adesividade ao ligante betuminoso (Bernucci *et al.*, 2010).

- Forma e angularidade

A forma e angularidade do agregado alteram algumas das propriedades de resistência e trabalhabilidade de uma mistura betuminosa.

Agregados angulares, ou seja, com cantos agudos, proporcionam maior intertravamento e atrito entre partículas formando uma estrutura granular mais resistente e proporcionando maior estabilidade às misturas. Contudo, os cantos agudos podem ser responsáveis pela perfuração da película de betume que cobre o agregado, possibilitando a entrada de água na interface betume-agregado. A utilização de partículas de forma plana e alongada em misturas betuminosas pode causar vários problemas, entre eles a quebra de partículas durante a compactação, fazendo com que a película de betume que cobre o agregado se rompa, possibilitando também a entrada de água na interface betume-agregado (Furlan *et al.*, 2004). Agregados esféricos podem movimentar-se uns sobre os outros quando solicitados, produzindo maus intertravamentos. Assim, a forma ideal dos agregados, para uso em misturas betuminosas, é a cúbica.

- Textura Superficial

Kim *et al.* (1992), citados por Furlan *et al.* (2004), verificaram que as misturas betuminosas com agregados com textura superficial rugosa na sua composição promovem uma melhor ligação entre o betume e o agregado. Os testes realizados nas superfícies de rotura, após os ensaios de fadiga, revelaram que a rutura ocorrida nas misturas contendo agregados de textura superficial lisa localizava-se na ligação betume-agregado, enquanto nas misturas contendo agregados de superfície rugosa ela progredia através das partículas, até a agregados mais grossos, indicando uma união mais forte entre o betume e o agregado.

- Viscosidade do betume

O tipo de ligante betuminoso presente nas misturas betuminosas é, para além dos agregados, outro dos responsáveis pela resistência e adesividade entre o betume e o agregado. Das propriedades relacionadas com o betume, a viscosidade é a característica mais frequentemente relacionada com o fenómeno de adesividade e de absorção (Copeland, 2007).

A viscosidade do betume designa o grau de mobilidade molecular e a magnitude das forças atrativas em líquidos, sendo diretamente influenciada pela temperatura. Com o aumento da temperatura, as forças intermoleculares diminuem, aumentando o poder de envolvimento dos agregados pelo betume e possibilitando o aumento da área de recobrimento na superfície destes. Essa diminuição da viscosidade pode contribuir para que ocorra uma pequena absorção de betume pelo agregado, melhorando assim o intertravamento (Gouveia *et al.*, 2004).

Em relação à adesividade, vários autores ao longo dos anos verificaram que betumes mais viscosos resistem mais ao deslocamento da película de betume pela ação da água que os menos

viscosos (Majidzadeh e Brovold, 1968; Taylor e Khosla, 1983; Hicks, 1991, citados por Gouveia *et al.*, 2004). Um comportamento semelhante é esperado com o envelhecimento dos ligantes que, de acordo com o referido anteriormente, se tornam mais viscosos à medida que envelhecem. De salientar que o envelhecimento altera as propriedades mecânicas das misturas betuminosas tornando-as mais quebradiças e frágeis, podendo este processo conduzir a danos prematuros nas camadas betuminosas, sobretudo nas de desgaste. O envelhecimento pode afetar o grau de absorção de betume pelo agregado, pois ele está diretamente relacionado com o tempo de exposição das misturas a temperaturas que propiciem a diminuição da viscosidade.

Huang *et al.* (2003) afirmaram que a perda de adesão das misturas betuminosas corresponde à perda de componentes resultantes da ligação na interface betume-agregado da mistura. A qualidade destas ligações determina o grau de adesividade e de sensibilidade à água. A partir da avaliação das misturas betuminosas em estudo, os autores concluíram que alguns compostos formados no processo de oxidação do betume aumentam a resistência da mistura à ação da água.

Na Figura 3.5 são apresentados esquematicamente os fenômenos de perda de adesividade e perda de coesão.

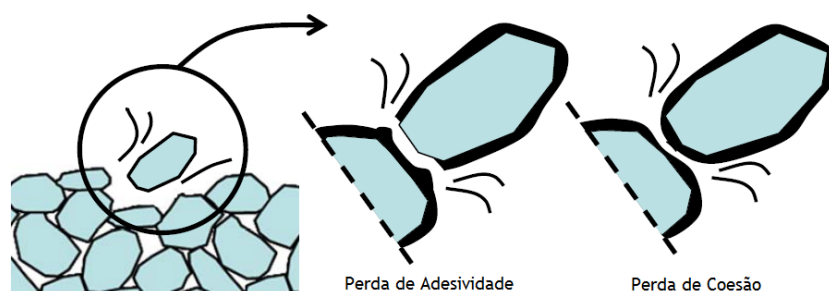


Figura 3.5 - Tipos de degradação das misturas betuminosas drenantes (adaptado de Kringos, 2007)

3.2.2 Perda de coesão

A coesão é uma característica da mistura betuminosa, especificamente do ligante betuminoso que a constitui, possibilitando a ligação entre as partículas de agregado. Quanto mais betume for aplicado na mistura, maior será a coesão entre elas, porém apenas até um determinado valor, a partir daí esse valor baixa. A quantidade excessiva de ligante causa uma diminuição importante no atrito interno entre as partículas, diminuindo a estabilidade da mistura betuminosa (Pereira, 2009).

A coesão pode ser definida como a força intermolecular que, não havendo forças exteriores, une as moléculas de um sólido ou de um líquido. Analisando a um nível macro, a coesão nas misturas betuminosas compactadas são forças coesivas que constituem a integridade do material (Terrel e Al-Swwailmi, 1990, citados por Copeland, 2007). A um nível micro, e considerando a película de betume que reveste o agregado, os danos manifestam-se principalmente em termos de desenvolvimento (micro) de fendas no material de ligação. Uma

vez iniciada, a taxa de desagregação aumenta a uma velocidade muito mais elevada por duas razões principais, falta de apoio lateral de agregados vizinhos e as tensões provocadas pelas cargas exercidas pelo tráfego são transferidas para os pontos de contacto restantes (Hagos, 2008).

O fenómeno de perda de coesão da película de ligante betuminoso da superfície do agregado ocorre devido à maior afinidade do agregado com a água do que com betume. Além disso, este fenómeno pode ser causado devido à lavagem hidráulica e como resultado da repetição da pressão da água nos poros, como ilustra a Figura 3.6. Assim, a perda de coesão na mistura betuminosa drenante, que é suscetível aos danos causados pela pressão nos poros, poderá ter uma quebra prematura na sua estrutura (Poulikakos e Partl, 2009).

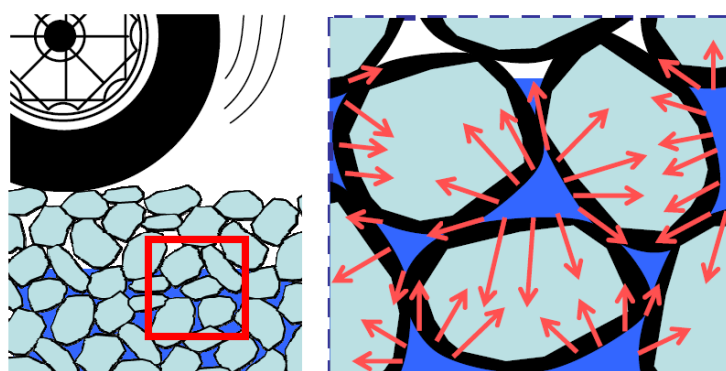


Figura 3.6 - Pressão da água nos poros (adaptado de Kringos, 2007)

Resistência ao desgaste

Através da realização do ensaio cântabro é avaliada a resistência ao desgaste das misturas betuminosas, além de refletir os efeitos da variação do teor de ligante (Pérez-Jiménez *et al.*, 2006). O ensaio pode ainda ser realizado com os provetes após imersão, comparando-se os resultados com os dos provetes secos, para se determinar a suscetibilidade da mistura à ação da água (Ruiz, 1997, citado por Dumke, 2005). O ensaio cântabro é especialmente sensível à temperatura, podendo também ser afetado pelo tamanho máximo do agregado que compõe a mistura. Quando se aumenta a temperatura do ensaio, a mistura torna-se mais frágil e aumentam as perdas no ensaio cântabro e, ocorrendo o oposto, quando a temperatura é mais baixa, diminuem as perdas (Pérez-Jiménez e Miro, 1997, citados por Dumke, 2005).

No estudo efetuado por Pérez-Jiménez e Gordillo (1990) estes afirmam que a resistência à desagregação é a propriedade mais importante das misturas betuminosas drenantes, verificando que é na resistência ao desgaste que os efeitos decorrentes da utilização de ligantes modificados ficam mais evidentes. Relativamente à capacidade destas misturas resistirem à água e à ação dos agentes atmosféricos, nas misturas betuminosas drenantes, apesar da maior percentagem de vazios facilitar o envelhecimento, pelo contrário, a película de ligante que recobre o agregado é mais espessa e ajuda a resistir melhor a este processo (Oliveira, 1995).

Mallick *et al.* (2000) afirmam que ocorre um aumento da resistência ao desgaste com o acréscimo do teor de betume. Entretanto, essa resistência é também dependente das propriedades reológicas do ligante. Misturas betuminosas drenantes executadas com ligantes betuminosos modificados apresentam um melhor comportamento ao desgaste quando comparadas com misturas produzidas com ligantes puros. Os autores constataram que a perda ao desgaste pode ser reduzida utilizando-se betumes modificados com polímeros combinados com a adição de fibras. Os ensaios realizados mostraram que ocorre o aumento da perda ao desgaste à medida que se diminui a quantidade de agregados finos (Mallick *et al.*, 2000). A desagregação surge como consequência de uma falta de coesão da mistura para poder resistir adequadamente à ação abrasiva do tráfego.

A entrada de água nas áreas danificadas, juntamente com a passagem e carregamento repetido do tráfego, acelera a degradação da integridade estrutural da camada de desgaste do pavimento e, provavelmente, das camadas subjacentes. Deste modo, se estas zonas do pavimento não forem reparadas, pode ocorrer uma significativa degradação localizada da estrutura do pavimento (Silva, 2005).

Envelhecimento do betume

O envelhecimento do betume é uma característica bastante importante cuja avaliação deve ser efetuada. A sua importância advém das propriedades que este envelhecimento produz na mistura, nomeadamente o aumento da sua viscosidade e rigidez, assim como a perda de ductilidade e de adesividade entre o betume e o agregado.

Os efeitos ambientais causam envelhecimento do ligante betuminoso. A reação com o ar atmosférico resulta no endurecimento do ligante e a ação da água enfraquece a ligação entre o ligante e agregado, resultando na desagregação dos agregados da mistura. A desagregação da superfície de mistura betuminosa drenante é ainda mais agravada pela ação do tráfego (Hagos, 2008).

Devido à elevada porosidade das misturas betuminosas drenantes, a resistência ao envelhecimento do ligante torna-se crucial (Hagos *et al.*, 2007). Sendo que, uma maior taxa de envelhecimento é esperada em misturas betuminosas drenantes em comparação com misturas betuminosas densas (Sharew, 2010).

O envelhecimento do ligante betuminoso é afetado pela presença de oxigénio, radiação ultravioleta (UV) e mudanças na temperatura (Sharew, 2010). Este envelhecimento altera as propriedades reológicas, mecânicas e químicas do ligante (Hagos, 2008).

O ligante betuminoso ao envelhecer sofre processos que originam o seu endurecimento progressivo, ocorrendo a perda de coesão ou ligações adesivas, ou ainda podendo ocorrer ambos, resultando em desagregação da camada de desgaste (Miró *et al.*, 2004). A resistência à

desagregação, e conseqüentemente a sua durabilidade, depende não só da resistência à oxidação do ligante betuminoso, como também da espessura da camada de ligante aplicada, da granulometria do agregado e da percentagem de porosidade da mistura betuminosa drenante (Herrington *et al.*, 2005).

Em geral, o envelhecimento da mistura betuminosa drenante é classificado em duas categorias, envelhecimento a curto e longo prazo. O envelhecimento a curto prazo considera a perda de componentes voláteis do ligante betuminoso e a oxidação durante a produção, o transporte, a aplicação e a compactação da mistura betuminosa, uma vez que nestas fases a mistura possui ainda uma temperatura relativamente alta. O envelhecimento de longo prazo é um processo progressivo de oxidação durante a vida útil da camada betuminosa (Hagos, 2008). Após a construção do pavimento, o endurecimento com a idade continua a uma taxa mais lenta, durante os primeiros 2 a 3 anos. Mais tarde, a taxa de endurecimento evolui lentamente, sendo que são necessários períodos mais longos para detetar as alterações nas propriedades reológicas do ligante betuminoso durante o seu período de serviço, tal como mostrado na Figura 3.7 (Sharew, 2010).

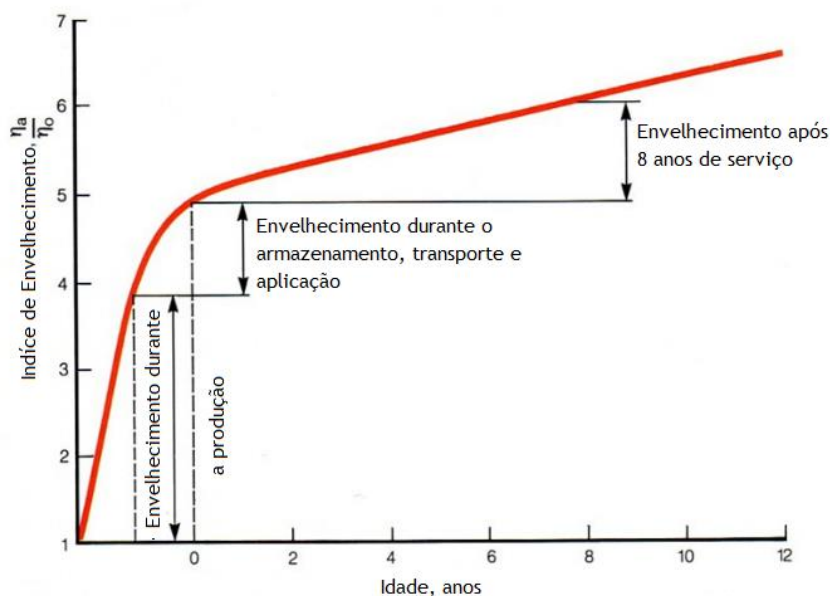


Figura 3.7 - Efeitos do envelhecimento a curto e longo prazo do ligante relacionando a viscosidade com o período de envelhecimento (adaptado de: Brown, 1990)

No Quadro 3.1 são apresentados os fatores que influenciam a coesão e a adesão nas misturas betuminosas drenantes.

Quadro 3.1 - Fatores que influenciam a coesão e a adesão nas misturas betuminosas drenantes (adaptado de Hagos, 2008)

Fatores	Efeitos predominantes	
Condições atmosféricas:	Envelhecimento	coesão
- Temperatura - Raios UV - Presença de água	Desagregação	coesão e adesão
Efeito de aditivos:	Aumento da espessura de película de ligante, melhoria do comportamento ao envelhecimento	coesão
- Ligante betuminoso modificado por polímeros - Fibras	Reduz o escorrimento de ligante	
Ligante betuminoso:	Espessura de película	coesão e adesão
- Teor de ligante betuminoso - Tipo e origem do ligante betuminoso	Taxa de envelhecimento	coesão
Efeito de filer:	Envelhecimento/drenagem/resistência	coesão
- Tipo e concentração de filer	A adição de cal hidratada melhora a ligação e retarda o envelhecimento	adesão e coesão
Efeito do tipo de agregação:	Compatibilidade com o ligante	adesão
- Tipo de agregado	Composição mineral, superfície específica	ligação agregado-betume
Fatores adicionais:	Frequência e técnicas de manutenção	
- Manutenção no inverno - Adição de sal - Tráfego: derrame de óleo, combustível, etc.	Colmatação de vazios	coesão e adesão

Aksoy *et al.* (2005), no seu estudo acerca dos efeitos de diversas adições nas misturas betuminosas quando na presença da água, concluíram que os aditivos utilizados reduziram o nível de danos provocados pela presença da água, contudo o desempenho relativo dos diferentes aditivos é diferente. Portanto, a escolha para qualquer aplicação deve ser feita com base em ensaios laboratoriais ou de campo.

3.2.3 Degradação ou fratura de partículas de agregado quando sujeitos a congelamento

Os ciclos de gelo/degelo da água causam pressões nos poros através da expansão e contração térmica cíclica. A pressão hidráulica ocorre devido ao aumento no volume específico da água ao congelar nos vazios da mistura. Esta ação cíclica tende a iniciar fissurações e resultam em danos nas misturas betuminosas drenantes (Thodesen e Hoff, 2010).

Devido à baixa condutividade térmica das misturas betuminosas drenantes no inverno, esta superfície pode ser mais fria do que as misturas betuminosas densas. Por isso, na superfície

drenante, o gelo tende a formar mais cedo e permanecer por mais tempo. A manutenção destas misturas na camada superficial durante o inverno é diferente da manutenção das misturas betuminosas densas. É necessário adaptar as práticas de manutenção de inverno e reagir rapidamente às condições meteorológicas reais (Poulikakos *et al.*, 2006).

A elevada porosidade em novas e bem conservadas camadas com misturas betuminosas drenantes minimiza o potencial dos danos induzidos pelo ciclo gelo/degelo. Estes danos são provocados pela temperatura e pelo tráfego. As misturas betuminosas drenantes tendem a alterar as suas características quando sujeitas a ciclos de gelo/degelo cumulativos, nomeadamente a sua coesão e adesividade levando à fratura das partículas de agregado que as constituem (Yi *et al.*, 2014).

As misturas betuminosas quando corretamente aplicadas e conservadas possuem um tempo de vida significativo, sendo que as aplicações existentes com mais de vinte anos de idade continuam operacionais (NY Materials, 2011). Tem sido comprovada a sua vida útil, mesmo em climas extremos, durante décadas e até mesmo em áreas com muitos ciclos de gelo/degelo (MacDonald, 2006).

3.2.4 Patologia associada à presença de água

A presença da água e as consequências na degradação das misturas betuminosas compromete a funcionalidade das rodovias, sendo os principais problemas de conservação da superfície resultantes da perda de partículas em áreas localizadas. Devido à ação do tráfego, este processo uma vez iniciado, evolui com rapidez. Estes problemas geralmente são consequência de temperaturas de aplicação inadequadas, deficiência na compactação e excesso de ligante. Nesses casos, a solução aplicada tem sido substituir a superfície deteriorada por outra (Ruiz *et al.*, 1990).

No caso em estudo, a principal consequência da presença da água numa mistura betuminosa drenante é a desagregação, com início na camada de desgaste.

Desagregação

O fenómeno da desagregação resulta de uma perda de adesividade na mistura betuminosa drenante e caracteriza-se pelo deslocamento da película de ligante do agregado. Devido a este fenómeno, a vida útil média deste tipo de misturas é de cerca de 10 anos (Nielsen, 2006).

A desagregação é o resultado da deficiente ligação entre os diferentes componentes de uma mistura betuminosa, ou da falta de estabilidade dessa ligação (Thodesen e Hoff, 2010).

A perda de adesividade poderá ocorrer devido à baixa qualidade dos materiais, deficiências na execução da camada de desgaste, segregação dos inertes em central, transporte ou colocação da mistura, qualidade e quantidade insuficiente do betume, condições de temperatura

desfavoráveis na fase de execução, nomeadamente temperaturas muito reduzidas, ou pela presença de água (Pereira, 2009).

A desagregação nas misturas betuminosas drenantes, como resultado da ausência de mástique, faz com que a superfície do pavimento fique sujeita a uma ação muito mais severa por parte dos pneus dos veículos, podendo originar a formação de “peladas ou ninhos”. Estas são caracterizadas pelo desprendimento de blocos da camada de desgaste. Este tipo de degradações envolve uma desagregação elevada, contudo podendo ter outras origens, como uma deficiência localizada da mistura betuminosa da camada de desgaste, ou por deficiência na ligação entre esta camada e a camada subjacente, ou ainda pela espessura reduzida da camada de desgaste. Iniciando-se a desagregação entra-se num ciclo vicioso onde a passagem sucessiva de veículos vai degradando cada vez mais o pavimento, acelerando o seu processo de degradação (Pereira, 2009). Sendo um problema associado à mistura é de grande importância investigar o comportamento mecânico dos componentes que a constituem, referidos anteriormente. Além disso, os estados de tensão/deformação nos componentes do material, sujeitos às cargas provenientes da circulação de tráfego também são de extrema importância. Ao estudar a combinação destes dois fatores, pode ser obtida uma melhor visão sobre a resistência à desagregação (Mo, 2010).

3.3 Caracterização da sensibilidade à água e da permeabilidade

3.3.1 Sensibilidade à água

A resistência das misturas betuminosas à ação da água é uma característica importante, diretamente relacionada com o desempenho e a durabilidade da mistura. Sendo estas misturas aplicadas em camadas de desgaste estão mais diretamente sujeitas à ação da água.

A avaliação da sensibilidade à água das misturas betuminosas é realizada através da determinação da resistência conservada entre dois grupos de provetes previamente submetidos a diferentes condicionamentos.

A primeira publicação da norma europeia EN 12697-12 - *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Determination of the water sensitivity of bituminous specimens* data de 2003. Nessa edição é apenas preconizado um método de ensaio, semelhante ao método A da norma europeia em vigor, a EN 12697-12: 2008. O método A baseia-se na tração indireta de provetes cilíndricos. Para além do método A, esta norma preconiza mais dois métodos de ensaio: o método B, que se baseia na resistência à compressão simples de provetes cilíndricos, e o método C, que é aplicável apenas em misturas betuminosas produzidas com betumes moles, fornecendo um valor de adesividade da mistura (Carvalho, 2012). Segundo Batista e Antunes (2009), o método C não é, em geral, aplicado em misturas betuminosas fabricadas em Portugal, sendo o método A aquele que tem vindo a ser mais utilizado nos países europeus, como é o caso da vizinha Espanha.

Na presente dissertação o método A foi o utilizado na realização do trabalho experimental, segundo a norma europeia EN 12697-12:2008. Esta norma, preconizada por este método, define o ensaio para a determinação do efeito da saturação e do condicionamento acelerado em água na resistência à tração indireta de dois grupos de provetes cilíndricos de misturas betuminosas com características idênticas e acondicionados em condições distintas. A sua descrição é apresentada seguidamente.

São produzidos um total de, no mínimo, seis provetes cilíndricos, segundo a norma europeia EN 12697-30:2004 - *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Specimen preparation by impact compactor*. As dimensões dos provetes são condicionadas pela dimensão máxima do agregado. São utilizados provetes de 100 ± 3 mm para agregados com dimensão máxima inferior ou igual a 22 mm.

Após o fabrico, os provetes são separados em dois grupos (três para cada grupo) com baridades e alturas médias idênticas, sendo estabelecidas diferenças máximas de 5 mm para as alturas médias e de 30 kg/m^3 para as baridades. Todos os provetes devem ter as mesmas condições, nomeadamente a mesma idade e ter um período de cura de 16 a 24 horas.

O primeiro grupo de provetes é acondicionado ao ar a uma temperatura de 20 ± 5 °C. O segundo grupo é, primeiro, submetido a vácuo em água a 20 ± 5 °C e mantido durante 30 ± 5 minutos a uma pressão absoluta de $6,7 \pm 0,3$ kPa, de forma a garantir que a água penetre, de forma adequada, nos poros dos provetes. De seguida, os provetes do segundo grupo são imersos em água a 40 ± 1 °C, por um período de 68 a 72 horas.

Após o período de acondicionamento de ambos os grupos, os provetes são colocados à temperatura de ensaio de tração indireta selecionada, na gama de 5 a 25 °C. O primeiro grupo de provetes seco é colocado ao ar e o segundo grupo de provetes imerso é colocado em novo banho de água à mesma temperatura definida para o grupo de provetes seco. Os provetes devem permanecer nestas últimas condições durante, pelo menos, 2 horas antes de serem submetidos ao ensaio de tração indireta. A norma europeia EN 12697-12 inclui uma nota onde recomenda que seja adotada uma temperatura de ensaio de 25 °C, de modo a ser obtida a influência máxima da adesividade do ligante e para minimizar a influência dos agregados partidos na linha de rotura do provete. Observa-se, no entanto, que a norma europeia EN 13108-20 - *Bituminous mixtures. Material specifications. Type testing* preconiza uma temperatura de 15 °C para efeitos de ensaios de tipo iniciais de misturas betuminosas abrangidas pela marcação CE (Batista e Antunes, 2009).

A partir dos valores médios das resistências à tração indireta dos provetes imersos (ITS_w) e dos provetes secos (ITS_d) a determinada temperatura, é calculada a resistência conservada em tração indireta ($ITSR$) através da fórmula 3.1.

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde,

ITSR - resistência conservada em tração indireta (%);

ITS_w - valor médio da resistência à tração indireta dos provetes imersos (KPa);

ITS_d - valor médio da resistência à tração indireta dos provetes secos (KPa).

Com base nos valores obtidos, a norma europeia EN 13108-7:2006 - *Bituminous mixtures - Material specifications - Part 7: Porous Asphalt* preconiza que seja selecionado uma das categorias, apresentadas no Quadro 3.2 para a resistência conservada à tração indireta.

Quadro 3.2 - Categorias para a resistência conservada em tração indireta - ITSR (EN 13108-7: 2006)

Valor mínimo de resistência conservada em tração indireta (%)	Categoria ITSR
100	ITSR ₁₀₀
90	ITSR ₉₀
80	ITSR ₈₀
70	ITSR ₇₀
60	ITSR ₆₀
50	ITSR ₅₀
Não requerido	ITSR _{NR}

Após o ensaio, a norma europeia EN 12697-12:2008 requer a visualização do tipo de rotura verificada nos provetes, podendo esta ser: tração indireta evidente, por deformação, ou combinada. Deverá ser ainda verificado o revestimento de ligante na superfície do agregado exposto e a existência, ou não, de agregado fraturado ou esmagado. Na Figura 3.8 encontra-se exemplificado o género de classificação atribuída a cada tipo de rotura de provete, segundo a norma EN 12697-23:2003 - *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*, para a caracterização à sensibilidade à água. A sua definição é apresentada de seguida:

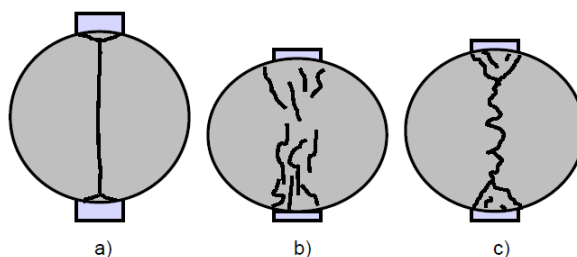


Figura 3.8 - Tipos de rotura (Fonte: EN 12697-23)

a) Rotura clara à tração - O provete quebra suavemente durante o curso do ensaio numa direção diametral, possivelmente com exceção de pequenas secções triangulares na proximidade da zona de contacto de pressão;

b) Deformação - Proвете sem uma linha de rotura claramente reconhecível;

c) Combinação - Proвете com uma linha de rotura limitada e uma área de maior deformação na proximidade da zona de contacto de pressão.

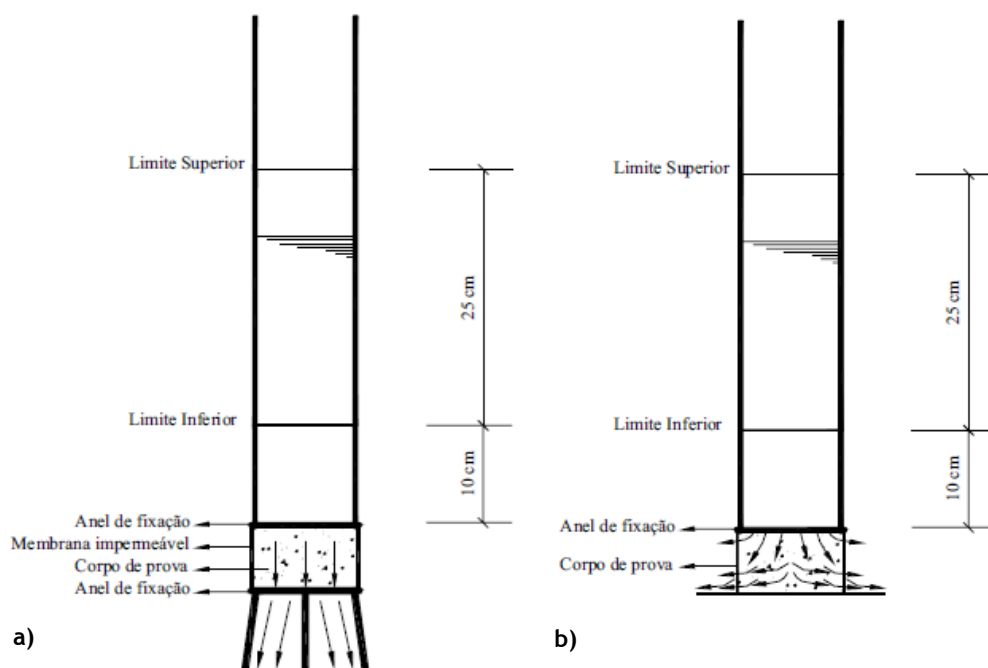


Figura 3.10 - Ensaios de permeabilidade a) vertical e b) horizontal (Fonte: Dinis-Almeida, 2003)

O ensaio de permeabilidade consiste em determinar o tempo, em segundos, que leva a escoar uma dada quantidade de água através do provete. O tempo registado é uma medida da permeabilidade da mistura, que é tanto maior quanto menor é o tempo de escoamento (Oliveira, 1995).

A quantidade de água escoada pelo provete é delimitada pelas marcas superior e inferior, visíveis nas figuras acima apresentadas, que como de seguida calculado pela fórmula 3.2, perfazem um volume total de 1735 cm³.

$$V = \pi \times r^2 \times h = \pi \times (9,42)^2 \times 25 = 1735 \text{ cm}^3 \quad (3.2)$$

Onde,

V - volume de escoamento (cm³);

r - raio interno do tubo (cm);

h - altura do tubo (cm).

Ensaio de permeabilidade vertical

O ensaio de permeabilidade vertical avalia a capacidade de percolação de água na direção vertical, impedindo-se a passagem de água pela lateral do provete, sendo esta totalmente vedada para que o fluxo horizontal seja impedido permitindo apenas o fluxo pela face inferior do provete (Oliveira, 2003). A descrição do acondicionamento e preparação do ensaio é apresentado no Capítulo 4.

Ensaio de permeabilidade horizontal

O ensaio de permeabilidade horizontal consiste em medir a capacidade de percolação de água pela lateral do provete, impedindo-se a passagem de água pela base do mesmo. A descrição do acondicionamento e preparação do ensaio é apresentado no Capítulo 4.

O cálculo da permeabilidade horizontal é efetuado com a mesma equação utilizada para o cálculo da permeabilidade vertical.

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade recorre-se à Lei de *Darcy* através da expressão 3.3 apresentada de seguida.

$$k = 2,303 \times \frac{a \times h}{A_p \times t_v} \times \log\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (3.3)$$

Onde,

k - coeficiente de permeabilidade (cm/s);

a - área da secção do permeâmetro (cm²);

A_p - área da secção do provete (cm²);

h - altura do provete (cm);

t_v - tempo de escoamento de 1735 cm³ (s);

h₁ - altura de água da face inferior do provete no início do ensaio (cm);

h₂ - altura de água da face inferior do provete no fim do ensaio (cm).

Com base nos valores obtidos, a norma europeia EN 13108-7:2006 - *Bituminous mixtures - Material specifications - Part 7: Porous Asphalt* estabelece categorias para a permeabilidade vertical e horizontal, apresentadas no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Categorias para a Permeabilidade vertical (K_v) e horizontal (K_h) . (EN 13108-7:2006)

Mínimo para permeabilidade (10 ⁻³ m/s)	Categoria - K _v	Categoria - K _h
4,0	K _v 4,0	K _h 4,0
3,5	K _v 3,5	K _h 3,5
3,0	K _v 3,0	K _h 3,0
2,5	K _v 2,5	K _h 2,5
2,0	K _v 2,0	K _h 2,0
1,5	K _v 1,5	K _h 1,5
1,0	K _v 1,0	K _h 1,0
0,5	K _v 0,5	K _h 0,5
0,1	K _v 0,1	K _h 0,1
Não requerido	K _v NR	K _h NR

Capítulo 4 - Trabalho Experimental

4.1 Introdução

A camada de desgaste sugerida para o caso em estudo é constituída por duas camadas betuminosas drenantes. Uma mistura betuminosa drenante grossa e uma mistura betuminosa drenante fina. Segundo o Manual de Pavimentação da CEPISA (2014), de modo a reduzir o problema da colmatção das misturas drenantes, o uso de dupla camada drenante é vantajoso. Aplicando primeiro uma camada com agregado mais grosso, de dimensão 12 a 20 mm, formam-se vazios de maior tamanho e mais difíceis de colmatar pelas poeiras. Numa segunda camada superficial, com a utilização de agregado mais fino, de dimensões máximas entre 8 e 10 mm, resulta uma melhoria das características funcionais do pavimento, em termos de conforto e segurança para o utente, nomeadamente, na redução do ruído e na capacidade de escoamento das águas.

Tendo em conta o discutido no Capítulo 2, neste capítulo é apresentado o trabalho experimental desenvolvido com o objetivo de comparar o desempenho de dois tipos de misturas betuminosas drenantes, uma mistura sem a adição de fibras celulósicas e uma outra com adição destas fibras.

A apresentação do trabalho experimental realizado em laboratório, é dividida em três fases: caracterização dos materiais utilizados, estudo da composição das misturas betuminosas e os seus critérios de escolha e caracterização das misturas betuminosas drenantes. No final deste capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios realizados de modo a caracterizar e comparar as misturas betuminosas drenantes escolhidas para o caso de estudo. Para tal, produziram-se quatro misturas betuminosas drenantes, mistura fina sem fibras (MFSF), mistura grossa sem fibras (MGSF), mistura fina com fibras (MFF) e mistura grossa com fibras (MGF), ambas com aplicação de fibras celulósicas.

A realização de todos os ensaios laboratoriais foi efetuada nos Laboratórios do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA) da Universidade da Beira Interior (UBI).

4.2 Caracterização dos materiais utilizados

As misturas betuminosas drenantes produzidas e descritas neste estudo incluem agregados naturais, ligantes betuminosos e utilização, ou não, de fibras celulósicas.

4.2.1 Agregados naturais

Os agregados naturais utilizados para o presente trabalho experimental, são de origem granítica, sendo a brita 5/15 e o pó de pedra 0/4 provenientes da pedreira do Grupo Cimpor, Agrepor Agregados - Extração de Inertes SA situada na localidade da Capinha, no concelho do Fundão, distrito de Castelo Branco. Para cumprimento do fuso granulométrico da mistura betuminosa, como se apresenta no ponto 4.2.2, houve necessidade de utilizar uma brita 5/10, que dado não estar disponível nesta pedreira recorreu-se a outro dos centros de exploração do Grupo Cimpor, a pedreira em Fornos de Algodres, no concelho de Fornos de Algodres, no distrito da Guarda.

Assim, para a produção das misturas betuminosas utilizaram-se três tipos de agregados: brita 5/10, brita 5/15 e pó de pedra 0/4, apresentados nas seguintes Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 respetivamente. Para além destes agregados foi ainda incluída em todas as misturas cal hidráulica.



Figura 4.1 - Brita 5/10



Figura 4.2 - Brita 5/15



Figura 4.3 - Pó de Pedra 0/4

Recorrendo às normas em vigor realizaram-se diversos ensaios de caracterização dos agregados apresentados nesta secção.

4.2.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica dos agregados foi realizada de acordo com a norma portuguesa NP EN 933-1:2000 - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica - Método de peneiração.

Antes da realização da peneiração, os agregados, ilustrados na Figura 4.4, foram colocados em estufa, por um período de 24h, a uma temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$. A sua análise foi efetuada, numa primeira fase na pesagem dos peneiros numa balança eletrónica, tendo estes sido colocados em coluna, encaixados e dispostos de cima para baixo por ordem decrescente de abertura da malha, com fundo e tampa, como ilustra a Figura 4.5. De seguida, os agregados foram vibrados, num agitador mecânico, durante 5 minutos. Posteriormente, começando pelo peneiro de maior abertura, foi feita a pesagem de cada um dos peneiros, numa balança eletrónica, de modo a obter a massa do material retido em cada um destes, incluindo o material peneirado retido no fundo.



Figura 4.4 - Agregados a ser peneirados



Figura 4.5 - Análise granulométrica

Na Figura 4.6, apresentada de seguida, observam-se as curvas granulométricas dos agregados.

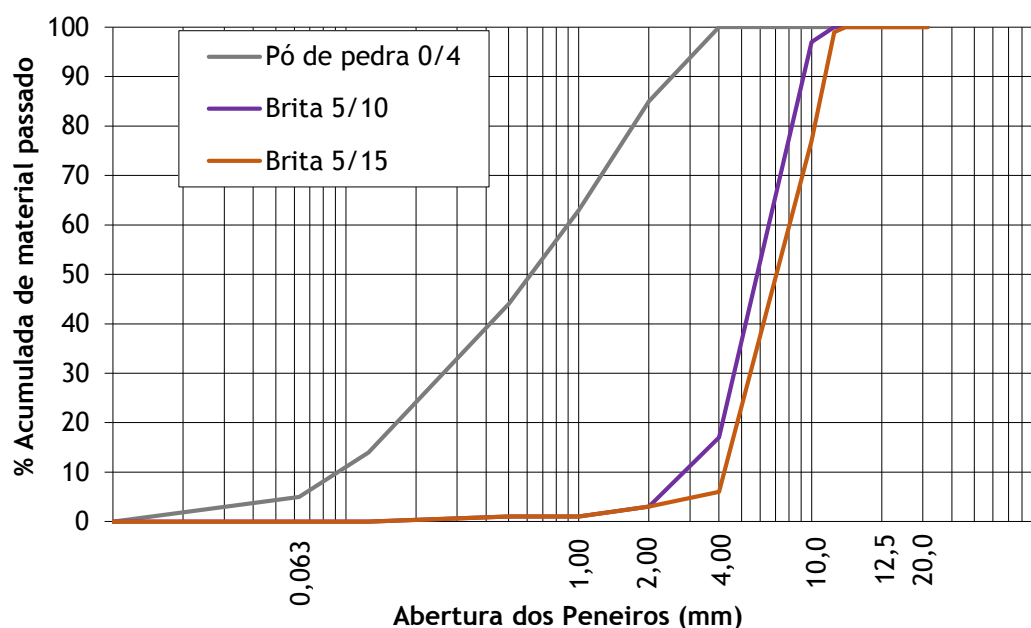


Figura 4.6 - Curvas granulométricas dos agregados

4.2.3 Massa volúmica

A determinação da massa volúmica dos agregados foi realizada de acordo com a norma portuguesa NP EN 1097-6:2003 - Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água.

Segundo a norma referida, a massa volúmica das partículas é obtida através do resultado da razão massa/volume. Esta contempla métodos de determinação diferentes, consoante a fração granulométrica do agregado. Para a determinação da massa volúmica de agregados grossos, no presente caso de estudo a brita 5/10 e brita 5/15, foi utilizado o método do cesto de rede metálica. Para o agregado fino, pó de pedra 0/4 e cal hidráulica, a determinação da massa volúmica foi realizada pelo método do picnómetro de hélio.

Segundo o método de rede metálica, foram recolhidas amostras de cada tipo de agregado grosso e, através da expressão 4.1, calculada a massa volúmica das britas 5/10 e 5/15.

$$\rho_{\text{ssd(cesto metálico)}} = \frac{M_1}{M_1 - (M_{2a} - M_{3a})} \times \rho_w \quad (4.1)$$

Onde,

ρ - massa volúmica do agregado (kg/m^3);

ρ_w - massa volúmica da água à temperatura de ensaio (kg/m^3);

M_1 - massa do agregado saturado com superfície seca (kg);

M_{2a} - massa do cesto metálico com o agregado saturado, imerso em água (kg);

M_{3a} - massa do cesto metálico vazio, imerso em água (kg).

A massa dos agregados grossos (britas) foi pesada numa balança hidrostática permitindo a pesagem dentro de água do cesto de rede metálica contendo o agregado, como ilustra a Figura 4.7.



Figura 4.7 - a) Pesagem hidrostática e b) secagem de agregados grossos

A massa volúmica do pó de pedra 0/4 e da cal hidráulica foi obtida através de um picnómetro a gás hélio, modelo *AccuPyc™* 1330, equipamento ilustrado na Figura 4.8.



Figura 4.8 - Picnómetro a gás hélio - Modelo *AccuPyc™* 1330

Os resultados obtidos para a massa volúmica de todos os agregados utilizados nas misturas são apresentados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Massa volúmica dos agregados

Agregado	Massa Volúmica (Kg/m ³)
Cal hidráulica	2760
Pó de pedra 0/4	2690
Brita 5/10	2560
Brita 5/15	2620

4.2.4 Cal hidráulica

A cal hidráulica foi empregue em todas as misturas produzidas, uma vez que possui propriedades como ligante hidráulico, proporcionando coesão às misturas. A designação comercial da cal hidráulica utilizada é HL5 Martingança® da SECIL, ilustrada na Figura 4.9. Os ensaios necessários para a avaliação das propriedades da sua composição foram efetuados segundo a norma portuguesa NP EN 459-1:2010 - Cal de Construção - Parte 1: Definições, no laboratório da SECIL.



Figura 4.9 - Cal Hidráulica

4.2.5 Ligante betuminoso

O ligante betuminoso é um elemento essencial das misturas betuminosas, uma vez que este envolve os agregados. Este fornece coesão, flexibilidade e estabilidade à mistura, podendo apresentar-se sob a forma de betume não modificado, modificado ou emulsionado (EP, 2014).

As misturas betuminosas drenantes a quente foram produzidas neste trabalho utilizando betume modificado com polímeros, com designação comercial Elaster® 13/60, tendo sido fornecido pela CEPSA Portuguesa Petróleos, S.A.

O betume utilizado designado por PMB 45/80-60 é um betume modificado com polímeros, obtido por reação química entre o betume e polímeros do tipo elastomérico. A sua utilização permite um aumento da coesão e tenacidade que proporciona à mistura betuminosa características melhoradas, assim como maior resistência nas suas propriedades mecânicas, nomeadamente à fadiga e deformações permanentes. As suas possíveis aplicações são as misturas drenantes, misturas descontínuas e misturas betuminosas convencionais (CEPSA, 2014).

Este ligante betuminoso está em conformidade com a norma europeia EN 14023: *Bitumen and bituminous binders - Specification framework for polymer modified bitumens* tendo os métodos de ensaio para determinar as suas propriedades sido realizados pelo Laboratório Controlo Qualidade, em Matosinhos, sendo apresentados os resultados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Características do betume modificado Elaster® 13/60

Ensaio	Referência Normativa	Resultado	Limites		Unidade
			Mínimo	Máximo	
Penetração 25 °C, 100 gr, 5 seg	EN1426	53	45	80	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	EN 1427	63,2	60	-	°C
Recuperação Elástica 25 °C; Torção	EN 13398	> 70	70	-	%

A massa volúmica deste ligante betuminoso é de 1040 kg/m³.

De acordo com o Laboratório Controlo Qualidade, é recomendado que a gama de fabrico das misturas seja efetuada a temperaturas entre 155 a 165 °C e a gama de compactação entre 150 e 160 °C.

4.2.6 Fibras celulósicas - *Viatop® Premium*

As fibras *Viatop® Premium* são grânulos constituídos por fibras naturais de celulose, revestidas com betume 50/70, que podem ser utilizadas como aditivo nas misturas betuminosas, de modo a melhorar as suas características, nomeadamente aumentando a sua durabilidade e o seu desempenho. Estas foram fornecidas pela empresa JRS - *J. Rettenmaier & Söhne*.

Segundo o fabricante é recomendado que a proporção de fibras na mistura betuminosa esteja compreendida entre 0,3 e 0,5 % da massa total da mistura. Para o presente trabalho, na produção das misturas betuminosas drenantes com fibras optou-se pela aplicação de 0,5% de fibras, uma vez que neste tipo de misturas, a reduzida percentagem de finos presente condiciona a superfície de contacto entre os agregados grossos. Assim, a sua aplicação nas misturas possibilita o aumento desta superfície. A adição de fibras melhora as propriedades, e consequentemente, o desempenho estrutural e funcional das misturas betuminosas.

A massa volúmica das fibras celulósicas é de 480 kg/m³.

Na Figura 4.10 estão apresentadas as Fibras *Viatop® Premium* utilizadas na produção das misturas betuminosas drenantes finas e grossas com incorporação de fibras celulósicas.



Figura 4.10 - Fibras *Viatop® Premium*

Nos Quadros 4.3, 4.4 e 4.5 estão especificadas as características das Fibras *Viatop® Premium*.

Quadro 4.3 - Características do granulado

Características do granulado	
Aspeto	Grânulos cilíndricos
Conteúdo de fibras	87 a 93 %
Comprimento médio dos grânulos	2 a 8 mm
Diâmetro médio dos grânulos	5 ± 1 mm
Densidade aparente	440 a 520 g/l
Análise granulométrica, # <4,5 mm	Máximo 10

Quadro 4.4 - Características do betume incluído no granulado

Ensaio	Referência Normativa	Resultado	Limites		Unidade
			Mínimo	Máximo	
Penetração a 25 °C	EN1426	50	-	70	0,1 mm
Ponto de Amolecimento (teste de anel e bola)	EN 1427	46	-	54	°C

Quadro 4.5 - Características da fibra

Características da fibra	
Composição básica	Fibra de celulose técnica
Conteúdo em celulose	80 ± 5 %
Valor do pH (5 g/100 ml)	7,5 ± 1
Comprimento médio da fibra	1100 µm
Diâmetro médio da fibra	45 µm

4.3 Estudo da composição das misturas betuminosas

No presente estudo foram produzidos quatro tipos de misturas betuminosas a quente, sendo estas diferentes na sua composição, como referido anteriormente.

4.3.1 Fuso granulométrico

As misturas betuminosas drenantes a quente foram produzidas com o intuito de serem aplicadas em camadas de desgaste do tipo PA 12,5 (BBd), sendo que na sua composição existem três tipos de agregados: brita 5/10, brita 5/15 e pó de pedra 0/4.

A camada de desgaste utilizada no caso em estudo é constituída por duas camadas betuminosas drenantes, como sugerido no Manual de Pavimentação da CEPISA (2014). Uma mistura betuminosa drenante grossa e uma mistura betuminosa drenante fina, resultando numa melhoria das características funcionais do pavimento, em termos de conforto e segurança para o utente, nomeadamente na capacidade de escoar a água e na redução do ruído.

Para a mistura betuminosa drenante fina foram utilizados os agregados: brita 5/10 e pó de pedra, sendo a nomenclatura para a mistura fina - MF.

Para a mistura betuminosa drenante grossa foram utilizados os agregados: brita 5/15 e pó de pedra, sendo a nomenclatura para a mistura grossa - MG.

No Quadro 4.6 são apresentadas as percentagens adotadas para as composições das misturas referidas anteriormente, de modo a cumprirem o fuso granulométrico correspondente a uma mistura betuminosa drenante PA 12,5 (BBd) para camadas de desgaste apresentado no Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal (EP, 2014).

Quadro 4.6 - Percentagem dos materiais constituintes das misturas betuminosas produzidas

Identificação	Brita 5/15 (%)	Brita 5/10 (%)	Pó de Pedra 0/4 (%)	Cal Hidráulica (%)	Total
Mistura Fina - MF	-	90	8	2	100
Mistura Grossa - MG	94	-	4	2	100

Nas Figuras 4.11 e 4.12 são apresentados os fusos granulométricos e a curva das misturas produzidas relativas às duas misturas betuminosas drenantes, mistura fina e grossa.

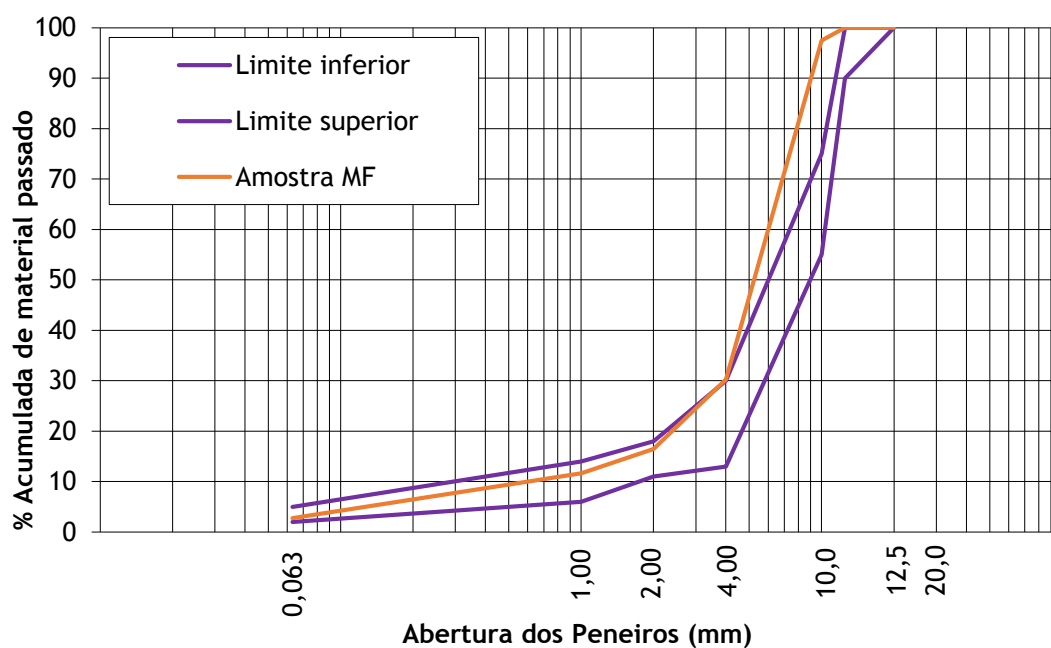


Figura 4.11 - Fuso Granulométrico e curva das misturas betuminosas drenantes finas

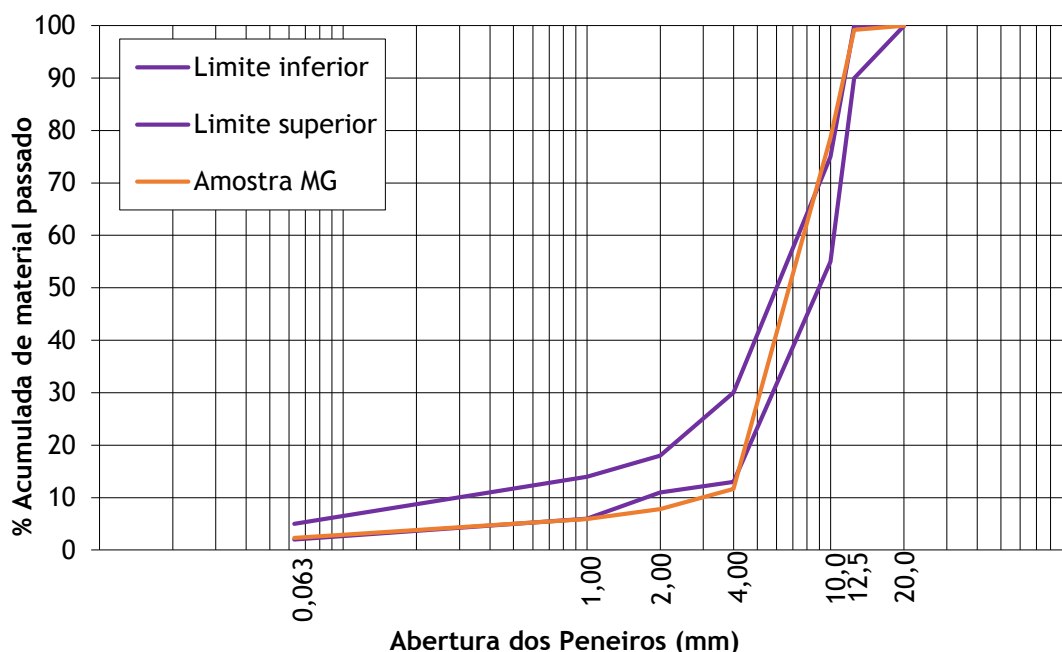


Figura 4.12 - Fuso Granulométrico e curva das misturas betuminosas drenantes grossas

4.3.2 Estimativa do teor de betume

Para o cálculo da quantidade inicial de betume necessário para as misturas betuminosas a quente, recorreu-se à expressão empírica de cálculo da superfície específica dos agregados (4.2).

$$P_b = 0,035 \times A + 0,045 \times B + K \times C + F \quad (4.2)$$

Onde,

P_b - estimativa da percentagem de betume em relação ao peso total da mistura;

A - percentagem de agregados retidos no peneiro 2,36 mm;

B - percentagem de agregados que passa no peneiro 2,36 mm e fica retida no peneiro 0,075 mm;

C - percentagem de agregados que passa no peneiro 0,075 mm;

K - constante em função da quantidade de material que passa no peneiro 0,075 mm;

K = 0,15, para 11 - 15 % de passados no peneiro 0,075 mm

K = 0,18, para 6 - 10 % de passados no peneiro 0,075 mm

K = 0,20, para ≤ 5 % de passados no peneiro 0,075 mm

F - fator de absorção dos agregados (entre 0 e 2 %), na falta de informação utiliza-se $F = 0,7$ %.

Para as misturas betuminosas drenantes a quente PA 12,5, o valor do teor de betume obteve percentagens diferentes. Para a mistura betuminosa drenante PA 12,5 MF o teor inicial de betume foi de 4,7 % e para a mistura betuminosa drenante PA 12,5 MG o teor inicial de betume foi de 4,6 %. Posteriormente, produziram-se provetes com margens de $\pm 0,5$ % do valor inicial P_b para cada mistura betuminosa drenante a quente. Desta forma, foi possível selecionar a

quantidade de betume mais adequada a adicionar às misturas. No Quadro 4.7, apresentado de seguida, encontram-se os resultados obtidos de percentagens de betume utilizadas nas misturas.

Quadro 4.7 - Percentagens de betume

Misturas Betuminosas Drenantes	-0,5%	P _b (%)	+0,5%
MFSF	4,2	4,7	5,2
MFF	4,2	4,7	5,2
MGSF	4,1	4,6	5,1
MGF	4,1	4,6	5,1

4.3.3 Determinação do teor ótimo de betume

Para a determinação do teor ótimo de betume das misturas betuminosas drenantes foi necessário ensaiar as misturas com as percentagens de ligante betuminoso referidas anteriormente. São assim tidos em conta todos os teores de betume selecionados e quantidades de agregados, com e sem a adição de fibras, para a produção dos provetes a serem ensaiados, apresentados no Quadro 4.8. Foram produzidos oito provetes para cada teor de betume tendo sido, no total, produzidos 24 provetes para cada mistura.

Quadro 4.8 - Formulações das misturas betuminosas drenantes

Misturas Betuminosas a quente drenantes	Betume Elaster® (%)	Brita 5/10 (%)	Brita 5/15 (%)	Pó de Pedra (%)	Cal Hidráulica (%)	Fibras Viatop® Premium (%)	Total (%)
MFSF	4,2	86,2	-	7,7	1,9	-	100
	4,7	85,8	-	7,6	1,9	-	100
	5,2	85,3	-	7,6	1,9	-	100
MFF	4,2	85,8	-	7,6	1,9	0,5	100
	4,7	85,3	-	7,6	1,9	0,5	100
	5,2	84,9	-	7,5	1,9	0,5	100
MGSF	4,1	-	90,1	3,9	1,9	-	100
	4,6	-	89,7	3,8	1,9	-	100
	5,1	-	89,2	3,8	1,9	-	100
MGF	4,1	-	89,7	3,8	1,9	0,5	100
	4,6	-	89,2	3,8	1,9	0,5	100
	5,1	-	88,7	3,8	1,9	0,5	100

Moldagem dos provetes

Após a definição das três percentagens de betume para cada tipo de mistura betuminosa drenante a quente foram produzidos provetes cilíndricos com aproximadamente 1050 g cada, ilustrados na Figura 4.13. Estes são correntemente utilizados em Portugal, designados por provetes *Marshall*, com cerca de 100 mm de diâmetro e altura variável, de acordo com a norma europeia EN 12697-35:2004 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 35: Laboratory mixing*.



Figura 4.13 - Moldes *Marshall* (base, molde e colar)

Previamente, todos os agregados, betume e moldes foram colocados em estufa, ilustrada na Figura 4.14, durante 1 hora, a uma temperatura superior a 160 °C.



Figura 4.14 - Estufa

Após este período pesaram-se os agregados e o betume na balança eletrónica, de acordo com as quantidades definidas na formulação. Procedeu-se à mistura manual, primeiro dos agregados e fibras, quando o caso, e posteriormente com o ligante betuminoso, até a mistura apresentar os agregados totalmente envolvidos no ligante. A temperatura da mistura foi regulada de acordo com a indicação dada pelo Laboratório Controlo Qualidade da CEPISA Matosinhos, procedimento ilustrado na Figura 4.15.



Figura 4.15 - Produção de mistura betuminosa drenante a quente

Após a preparação da mistura betuminosa drenante, retira-se o molde da estufa, coloca-se um filtro de papel na base do molde e unta-se com óleo, de seguida coloca-se a mistura betuminosa e com recurso a uma espátula distribui-se a mistura pelo molde alisando a superfície, sendo por fim colocado um outro filtro circular no topo da mistura, como exemplificado na Figura 4.16.



Figura 4.16 - Moldagem da mistura betuminosa drenante

De seguida, procedeu-se à compactação dos provetes com um compactador de impacto de acordo com a norma europeia EN 12697-30:2004 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation by impact compactor*. Foram aplicadas 50 pancadas em cada face dos provetes. Após a compactação do provete, foi retirado o filtro de

papel com auxílio de uma espátula e após 4 horas de arrefecimento procedeu-se ao desmolde dos provetes com recurso a um macaco hidráulico, sendo apresentado na Figura 4.17 todo o procedimento.

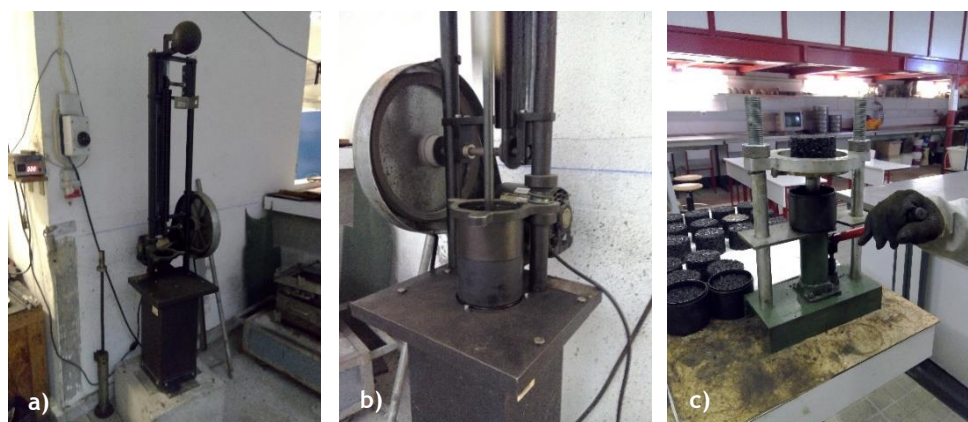


Figura 4.17 - a) Compactador de impacto (DECA-UBI) b) Compactação de provetes c) Desmolde de provetes

Após desmoldados os provetes foram colocados sobre uma superfície plana e identificados individualmente, tendo sido mantidos à temperatura ambiente até serem ensaiados, como ilustra a Figura 4.18 os provetes das misturas betuminosas finas e a Figura 4.19 os provetes das misturas betuminosas grossas.

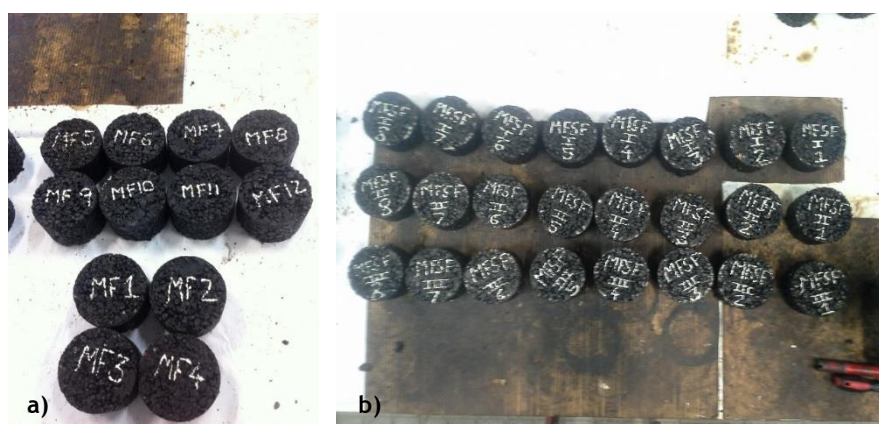


Figura 4.18 - Provetes da mistura betuminosa drenante fina a) com fibras b) sem fibras

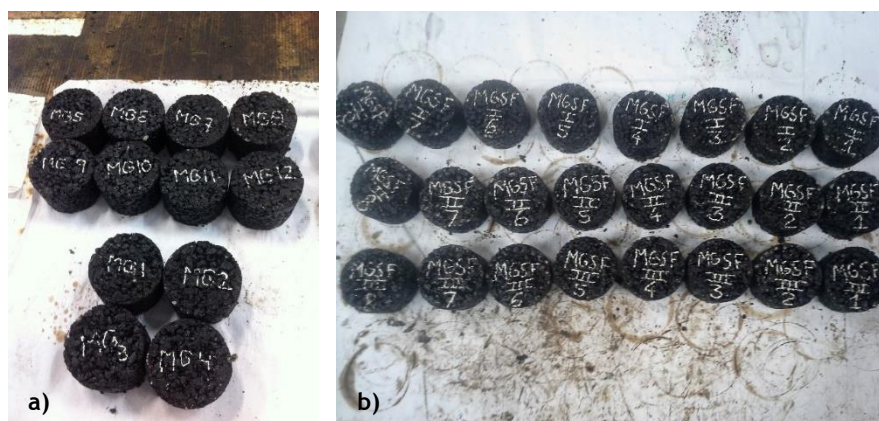


Figura 4.19 - Provetes da mistura betuminosa drenante grossa a) com fibras b) sem fibras

- Baridade

Para a determinação da baridade recorreu-se à expressão 4.3, de acordo com a norma europeia EN 12697-6:2003 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens*. A norma refere diversos procedimentos, sendo que, para o presente caso e tendo em conta a mistura betuminosa ser drenante o ensaio realizou-se segundo o procedimento D, sendo este efetuado por medida geométrica do volume aparente do provete cilíndrico.

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \quad (4.3)$$

Onde,

$\rho_{b,dim}$ - baridade do provete saturado com superfície seca (kg/m^3);

m_1 - massa do provete seco (g);

h - altura do provete (mm);

d - diâmetro do provete (mm).

De seguida, apresentam-se nas figuras os resultados das baridades médias das misturas betuminosas drenantes (média de oito provetes), na Figura 4.20.a) correspondente às misturas MFF e MFSF, e na Figura 4.20.b) correspondente às misturas MGF e MGFF.

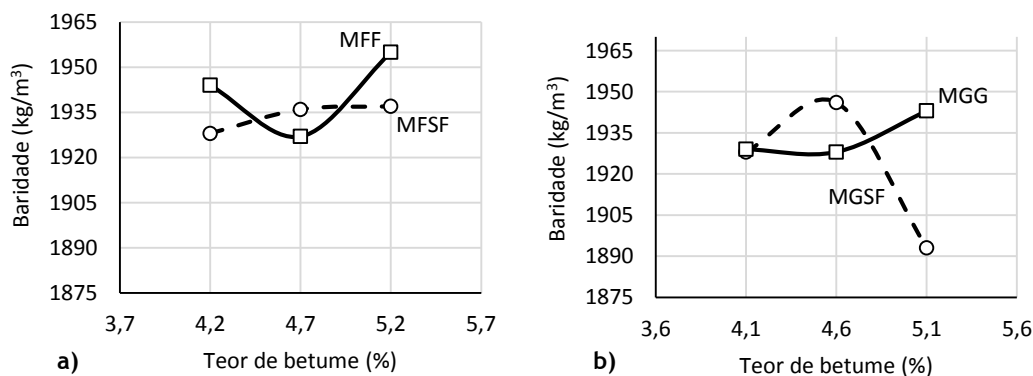


Figura 4.20 - Representação gráfica das baridades médias das misturas betuminosas drenantes PA 12,5
a) finas MFF e MFSF e b) grossas MGF e MGFF

- Porosidade

Para o cálculo da porosidade é necessário primeiro calcular a baridade máxima teórica.

Baridade máxima teórica

Para o cálculo da baridade máxima teórica recorreu-se à expressão 4.4, de acordo com a norma europeia EN 12697-5:2002 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density*, segundo o procedimento C, procedimento matemático.

$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{100}{\left(\frac{pa_1}{\rho_{a1}}\right) + \left(\frac{pa_2}{\rho_{a2}}\right) + \dots + \left(\frac{pb}{\rho_{ab}}\right)} \quad (4.4)$$

Nota: $pa_1 + pa_2 + \dots + pb = 100 \%$

Onde,

$\rho_{m\acute{a}x}$ - baridade máxima teórica da mistura betuminosa (kg/m^3);

pa_1 - percentagem do agregado 1 na mistura (%);

ρ_{a1} - massa volúmica do agregado 1 (kg/m^3);

pa_2 - percentagem do agregado 2 na mistura (%);

ρ_{a2} - massa volúmica do agregado 2 (kg/m^3);

pb - percentagem do ligante na mistura (%);

ρ_b - massa volúmica do ligante (kg/m^3).

No Quadro 4.9 apresentam-se os resultados da baridade máxima teórica para cada mistura betuminosa e o seu respetivo teor de betume.

Quadro 4.9 - Baridade máxima teórica das misturas betuminosas

Misturas Betuminosas a quente Drenantes	Teor de betume (%)	Baridade máxima teórica (kg/m^3)
MFSF	4,2	2420
	4,7	2410
	5,2	2390
MFF	4,2	2380
	4,7	2360
	5,2	2340
MGSF	4,1	2470
	4,6	2450
	5,1	2440
MGF	4,1	2420
	4,6	2400
	5,1	2390

Porosidade

Em função dos valores obtidos da baridade máxima teórica e da baridade geométrica dos provetes é possível determinar a porosidade das misturas betuminosas produzidas através da expressão 4.5 e de acordo com a norma europeia EN 12697-8:2003 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*.

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \quad (4.5)$$

Onde,

V_m - porosidade da mistura (%);

ρ_m - baridade máxima teórica da mistura betuminosa (Kg/m^3);

ρ_b - baridade geométrica do provete (Kg/m^3).

Nas figuras apresentam-se os resultados das porosidades dos provetes das misturas betuminosas drenantes PA 12,5 finas MFF e MFSF, na Figura 4.21.a) e na Figura 4.21.b) grossas MGF e MGSF e as suas respetivas percentagens de teor de betume.

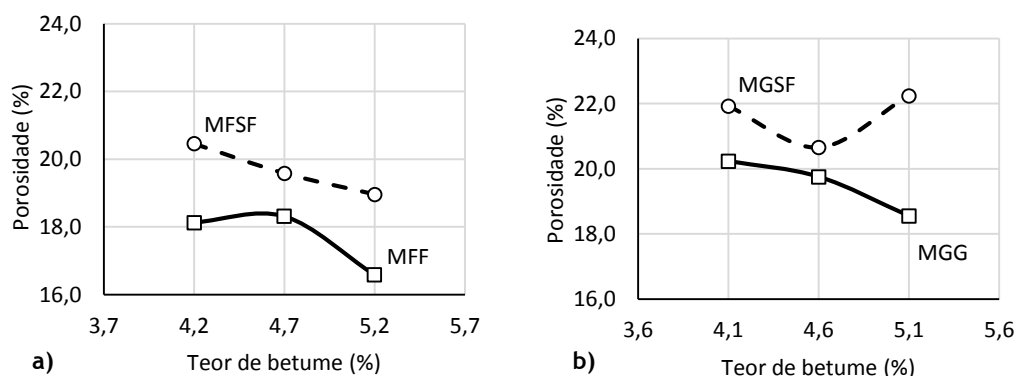


Figura 4.21 - Representação gráfica das porosidades das misturas betuminosas drenantes PA 12,5
a) finas MFF e MFSF e b) grossas MGF e MGSF

Através da observação dos gráficos apresentados na Figura 4.21 verifica-se que as misturas sem incorporação de fibras apresentam valores superiores de porosidade em relação às misturas betuminosas com incorporação de fibras.

Analisando a Figura 4.21 e tendo em consideração o intervalo de valores de porosidade estabelecido pelo Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2014) para misturas betuminosas drenantes entre 22 e 30 % verifica-se que apenas a mistura betuminosa grossa sem adição de fibras e com teor de betume de 5,1 % cumpre o requisito. Assim, consultou-se bibliografia relativa à porosidade, para camadas de desgaste com misturas betuminosas drenantes de modo a verificar os requisitos preconizados para esta propriedade noutros países.

De acordo com as especificações espanholas *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para*

Obras de Carreteras y Puentes (PG-3, 2013) é requerido para a porosidade o mínimo de 20 %, verificando-se que um maior número de misturas e respetivos teores de betume cumprem.

Roseen *et al.* (2012) incidem o seu estudo em New Hampshire, Estados Unidos, onde determinam que a porosidade se situe no intervalo de 18 e 20 %. Por análise da figura anterior, verifica-se que apenas a mistura betuminosa drenante MFF com 5,2 % de betume não alcança o valor mínimo requerido. Para as misturas MFSF com 4,2 % de betume e MGSF com 4,1 e 5,1 % de betume o valor máximo do intervalo proposto é excedido.

No Canadá, de acordo com o guia LID SWM (Dhalla e Zimmer, 2010) e nos Estados Unidos segundo NAPA (Hansen, 2008) e FHWA (2015) a porosidade deverá ser de valor igual ou superior a 16 %. Todos os teores de betume utilizados na produção das misturas betuminosas drenantes neste estudo cumprem os valores preconizados nestas duas referências.

Segundo o projeto desenvolvido pela UNHSC (Briggs *et al.*, 2009), nos Estados Unidos, a porosidade deverá encontrar-se entre 16 a 22 %, o que por observação da Figura 4-21 se confirma que todos os resultados se encontram neste intervalo.

- Ensaio cântabro

Para a determinação do teor ótimo de betume, para cada mistura betuminosa drenante, foram tidos em consideração os parâmetros definidos pelo Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2014), assim como no *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes* (PG-3, 2013). Para cada tipo de mistura betuminosa drenante foi realizado o ensaio cântabro.

O ensaio cântabro foi realizado de acordo com a norma europeia EN 12697-17:2004 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 17: Particle loss of porous asphalt specimens* e as especificações espanholas *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes* (PG-3, 2013).

Este ensaio tem como objetivo determinar a perda de massa por desgaste, permitindo a avaliação da coesão da mistura betuminosa e a sua resistência à desagregação, sendo um método de determinação da percentagem ótima de betume a utilizar nos quatro tipos de misturas betuminosas drenantes produzidas.

Para este ensaio foram produzidos e ensaiados 48 provetes *Marshall* de mistura betuminosa PA 12,5 grossa e 48 provetes *Marshall* de mistura betuminosa PA 12,5 fina, sendo que existem oito provetes para cada percentagem de teor de betume. Numa primeira fase deste procedimento e como ilustrado na Figura 4.22 os provetes de cada mistura foram divididos em dois grupos. Um grupo de provetes secos, conservados à temperatura ambiente (PA) e um grupo de provetes imersos, conservados em água (PS), em banho de imersão a uma temperatura de 60 °C, durante um período de 24 horas. Posteriormente colocaram-se os provetes do grupo

imerso em estufa, a uma temperatura de 25 °C durante 24 horas. Por outro lado, o grupo seco foi colocado em estufa a 25 °C, durante um período de 48 horas, como ilustra a Figura 4.23.

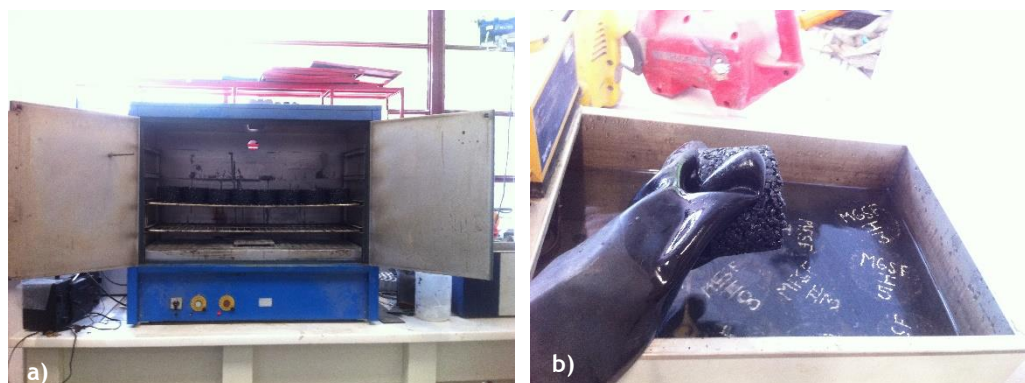


Figura 4.22 - Grupo de provetes a) seco e b) imerso



Figura 4.23 - Provetes do grupo seco e imerso em estufa (DECA - UBI)

Na segunda fase do procedimento os provetes dos grupos seco e imerso foram pesados na balança eletrónica. De seguida, cada um dos provetes foi submetido a 300 voltas na máquina de desgaste de *Los Angeles*, sem bolas de aço, como ilustra a Figura 4.24. No final do ensaio os provetes foram novamente pesados, podendo ser observado o exemplo de provete antes e após o ensaio cântabro na Figura 4.25.



Figura 4.24 - Ensaio da perda por desgaste com o tambor de *Los Angeles* (DECA - UBI)

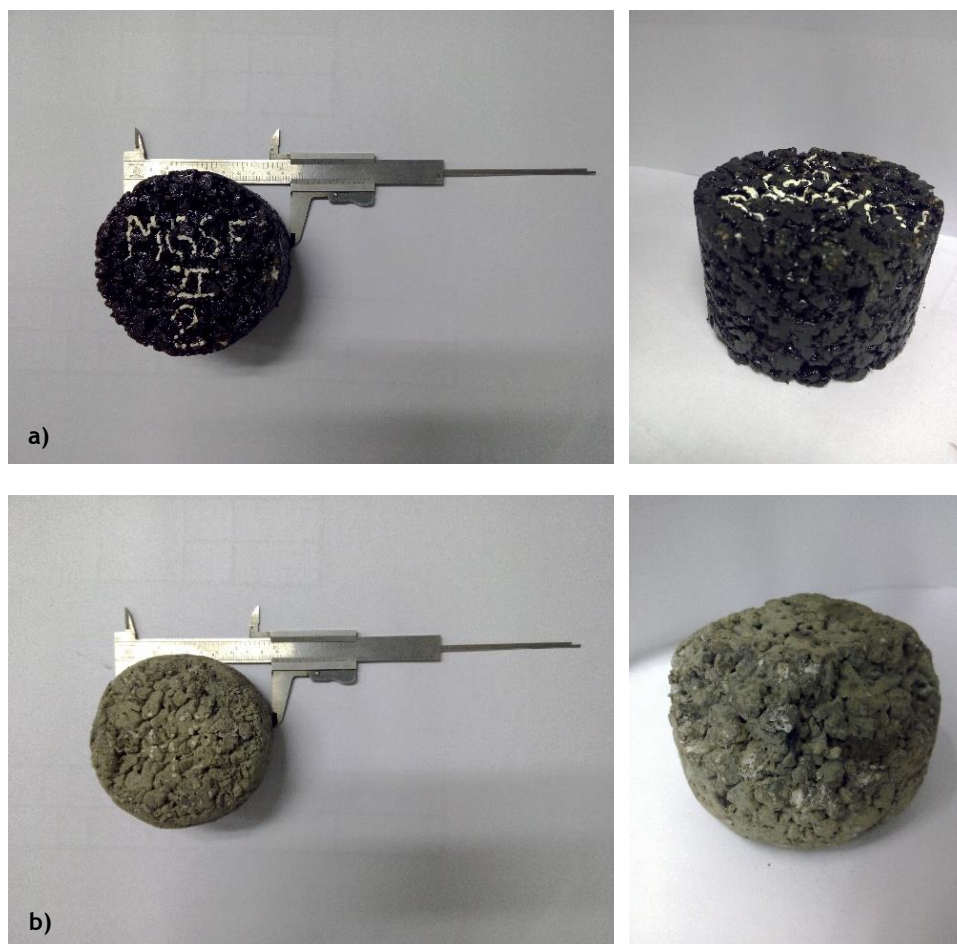


Figura 4.25 - Exemplo de provete a) antes e b) após ensaio cântabro

A perda por desgaste, de cada provete, é calculada pela expressão 4.6, apresentada de seguida.

$$PL = \frac{(W_1 - W_2)}{W_1} \times 100 \quad (4.6)$$

Onde,

PL - valor da perda de partículas (%);

W_1 - massa da amostra inicial (g);

W_2 - massa da amostra final (g).

Nas Figuras 4.26 e 4.27 apresentam-se os resultados (média de quatro provetes) obtidos pelo ensaio cântabro das misturas betuminosas drenantes finas e grossas e respetivos grupos de provetes secos e imersos.

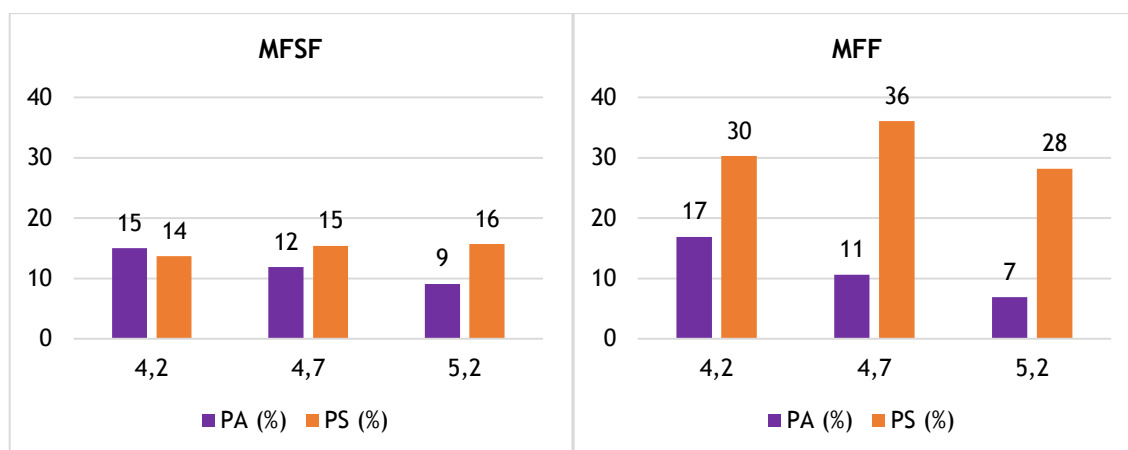


Figura 4.26 - Resultados do ensaio cântabro para misturas betuminosas finas

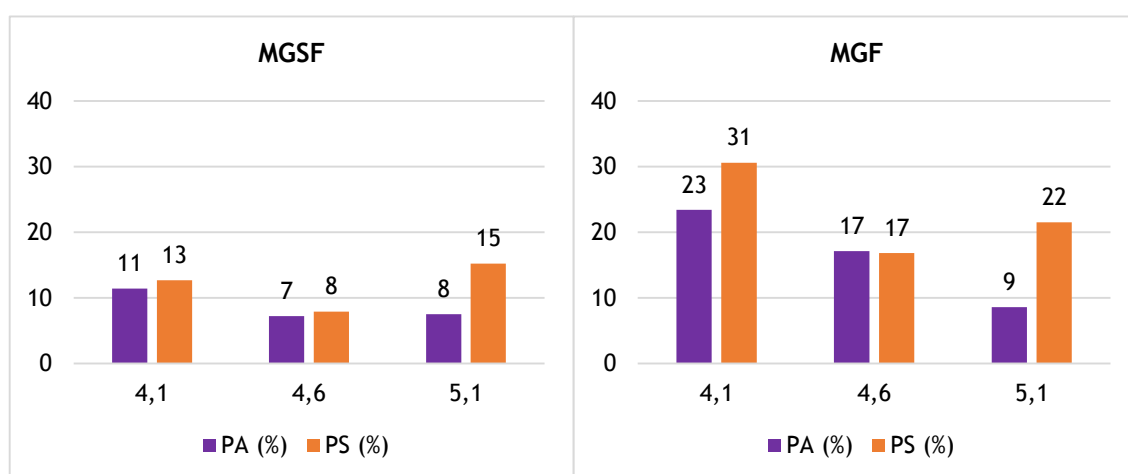


Figura 4.27 - Resultados do ensaio cântabro para misturas betuminosas grossas

Através da análise das Figuras 4.26 e 4.27, verifica-se que as misturas betuminosas drenantes com adição de fibras celulósicas apresentam maiores valores de perda de massa do que as misturas betuminosas sem adição de fibras para os provetes imersos a 60 °C, demonstrando a influência das fibras na obtenção de menor resistência à desagregação quando na presença de água.

A norma europeia em vigor EN 12697-17:2004 refere a realização do ensaio cântabro apenas a seco. No entanto, uma vez que o Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2014) estabelece que a perda por desgaste, para ensaio cântabro imerso, seja realizada pela norma espanhola NLT-362/92: *Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas betuminosas de granulometria abierta, mediante el ensayo cántabro de perdida por desgaste* (CEDEX, 1992), no presente trabalho laboratorial realizou-se este ensaio segundo esta.

Observando as Figuras 4.26 e 4.27 e segundo o *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3, 2013)* a percentagem para a perda de desgaste dos provetes imersos (24h a 60 °C) deverá ser de valor menor ou igual a 35 % (T0 a T1) ou menor ou igual a 40 % (T2 a T3), dependendo do tipo de tráfego, sendo que todas as misturas betuminosas em estudo cumprem ambos os requisitos.

Consultando o Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2014) este estabelece que a perda por desgaste, para ensaio de cântabro imerso, seja menor ou igual a 25 %. Analisando as Figuras 4.26 e 4.27 verifica-se que ambas as misturas betuminosas drenantes PA 12,5 finas e grossas, sem fibras na sua composição, cumprem este requisito. Contudo, nas misturas betuminosas drenantes com adição de fibras, as misturas MFF excedem este requisito para os três teores de betume. Para a mistura MGF apenas a percentagem de betume 4,1 % não cumpre.

De acordo com as Figuras 4.26 e 4.27 e tendo em conta as análises e fatores de exclusão descritos anteriormente, tem-se que:

A percentagem de betume adotado para a mistura MFSF foi de 4,7 %, uma vez que cumpre os critérios da porosidade e do ensaio cântabro. Para além disso, durante a produção dos provetes com os três teores de betume verificou-se, após observação visual, que para as misturas MFSF o teor de betume de 4,2 % resultava em misturas bastante secas revelando falta de betume. Para os provetes com 5,2 % de betume as misturas apresentavam alguma escorrência. A escolha de 4,7 % de betume deveu-se ao total recobrimento dos agregados com o ligante.

Para a produção da mistura MFF a percentagem de 4,7 % de betume mostrou-se insuficiente, tendo-se optado pelo valor de 5,2 %, confirmando uma das características das fibras de permitirem obter misturas mais ricas em betume sem que se observe escorrência deste. Esta percentagem de betume cumpre os parâmetros da porosidade e do ensaio cântabro.

Através da análise realizada às misturas MGSF a percentagem de betume adotada foi de 4,6 %, uma vez que cumpre os parâmetros da porosidade, do ensaio cântabro, apresentando percentagens de perda por desgaste de menor valor para ambos os grupos de provetes ensaiados, secos e imersos, e por observação visual verificou-se um bom recobrimento dos agregados durante a sua produção. Os provetes produzidos com 4,1 % de betume apresentavam-se bastante secos e os provetes com 5,1 % de betume apresentavam escorrência.

Para a produção da mistura MGF as percentagens de 4,1 e 4,6 % de betume mostraram-se insuficiente, pois, tal como explicado anteriormente, existe absorção do ligante betuminoso por parte das fibras, apresentando um aspeto seco. Optou-se pelo valor de 5,1% de betume que cumpre os parâmetros da porosidade e do ensaio cântabro.

Para a camada de desgaste o Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2014) estabelece que a percentagem de ligante mínima seja de 4 % e as especificações espanholas, *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3, 2013)*, estabelecem que esta percentagem seja no mínimo de 4,3 %, requisito que todas as misturas betuminosas em estudo cumprem.

Teor ótimo de betume

Em suma, apresentam-se no Quadro 4.10 as formulações finais e no Quadro 4.11 as características de cada uma das misturas betuminosas drenantes a quente com o teor ótimo de betume respectivo.

Quadro 4.10 - Formulação final das misturas betuminosas drenantes

Identificação	Betume Elaster® (%)	Brita 5/10 (%)	Brita 5/15 (%)	Pó de Pedra (%)	Cal Hidráulica (%)	Fibras Viatop® Premium (%)	Total
MFSF	4,7	85,8	-	7,6	1,9	-	100
MFF	5,2	84,9	-	7,5	1,9	0,5	100
MGSF	4,6	-	89,7	3,8	1,9	-	100
MGF	5,1	-	88,7	3,8	1,9	0,5	100

Quadro 4.11 - Características de cada uma das misturas betuminosas drenantes a quente

Misturas Betuminosas Drenantes	Teor de betume (%)	Baridade máxima teórica da mistura (kg/m ³)	Porosidade da Mistura (%)
MFSF	4,7	2410	19
MFF	5,2	2340	20
MGSF	4,6	2450	22
MGF	5,1	2400	20

4.4 Influência da temperatura nas misturas com adição de fibras - Ensaio cântabro

De modo a aferir a influência da temperatura no desempenho das misturas betuminosas, realizou-se um novo ensaio cântabro imerso para os teores ótimos de betume. As misturas cujas características se pretendem analisar são as que possuem a adição de fibras, MFF e MGF, uma vez que apresentaram um fraco desempenho quando imersas. Para tal, produziram-se quatro provetes de cada uma das misturas. Realizando este ensaio, é possível analisar o efeito que a temperatura da água tem no desempenho destas misturas betuminosas drenantes com fibras. O ensaio efetuou-se em provetes imersos a uma temperatura de 20 °C, condição proposta por Khalid e Pérez-Jiménez (1996), citados por Homem (2002), na realização do ensaio cântabro imerso.

Na Figura 4.28 apresentam-se os resultados obtidos pelo ensaio cântabro das misturas MFF e MGF, com os respetivos teores ótimos de betume, imersas a 20 e 60 °C.

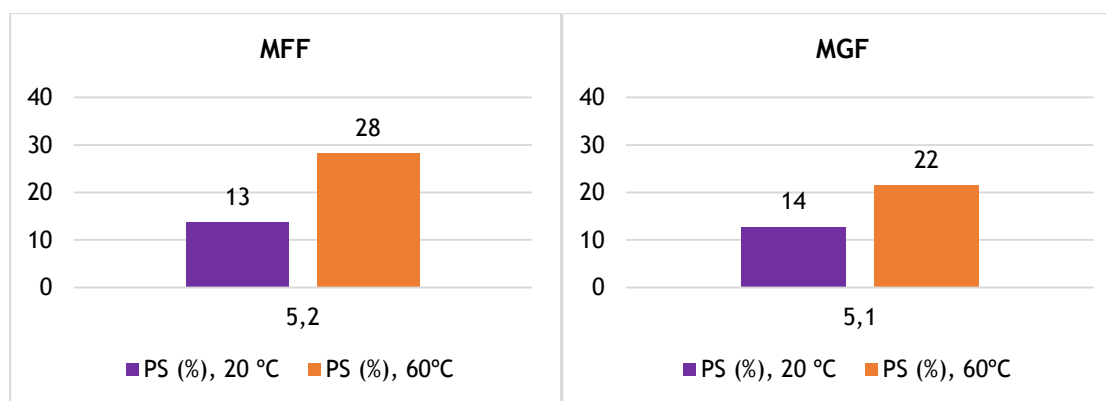


Figura 4.28 - Resultados do ensaio cântabro imerso a 20 e 60 °C das misturas MFF e MGF

Verifica-se a influência da temperatura da água no desempenho das misturas com fibras quando comparados os resultados obtidos, onde a diferença é bastante significativa, aproximadamente metade. Conclui-se que menores temperaturas de imersão apresentam melhores resultados de desempenho relativamente à resistência à desagregação quando na presença de água.

4.5 Caracterização das misturas betuminosas

Nesta subsecção é efetuada a caracterização das misturas betuminosas produzidas neste estudo relativamente à formulação final das misturas e ao teor ótimo de betume escolhido para cada tipo de misturas betuminosas drenantes na subsecção anterior. Para esta caracterização realizaram-se ensaios que serão descritos de seguida, sendo estes o ensaio para determinação do módulo de rigidez, o ensaio de sensibilidade à água e o ensaio de permeabilidade da mistura.

4.5.1 Módulo de rigidez por tração indireta

A determinação do módulo de rigidez realizou-se através do ensaio por tração indireta com compressão diametral em provetes cilíndricos das misturas betuminosas drenantes em estudo. Esta determinação realizou-se de acordo com a norma europeia EN 12697-26:2004 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness*, segundo o anexo C.

Este ensaio por tração indireta é realizado através da aplicação de carregamentos repetidos de compressão diametral em provetes cilíndricos, provocando tensões de tração horizontal uniformes ao longo do plano diametral de aplicação, sendo realizado em condições de tensão controlada. A deformação resultante dos sucessivos impulsos de carga é controlada pelo *software* do equipamento *Nottingham Asphalt Tester* (NAT), tendo sido adotados os seguintes parâmetros, coeficiente de *Poisson* de 0,35, tempo de crescimento de carga (RT - *Rise Time*) de 124 milissegundos, deformação horizontal máxima de 5 μm e pré-carregamento de 10 aplicações de carga.

O ensaio realizou-se nos Laboratórios do DECA da UBI, recorrendo ao uso do equipamento NAT, como apresentado na Figura 4.29.

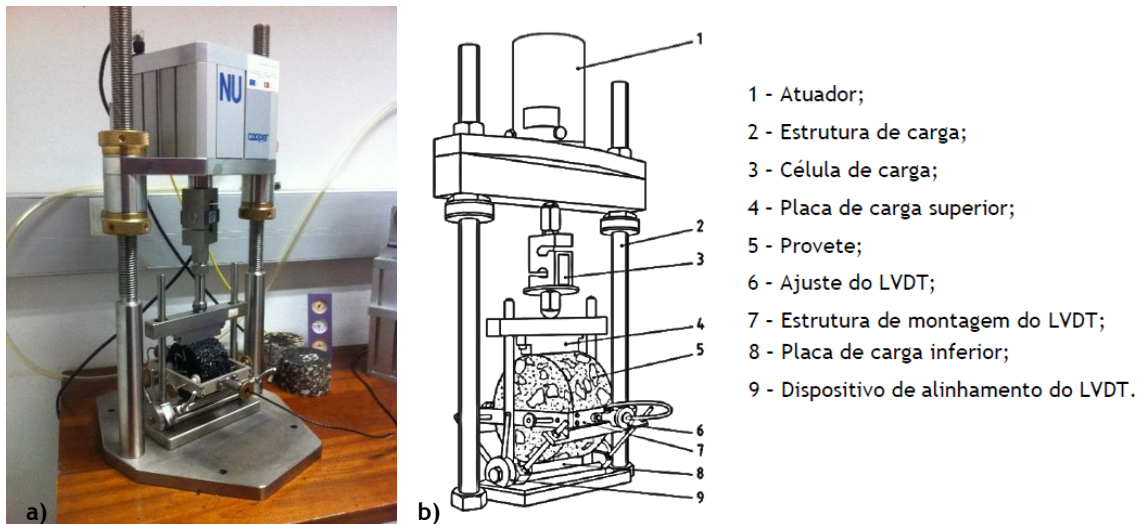


Figura 4.29 - a) Equipamento NAT e b) Esquema do equipamento utilizado para o ensaio de tração indireta (adaptado da EN 12697-26)

Para a realização deste ensaio produziram-se seis provetes cilíndricos para cada teor ótimo de betume das quatro misturas betuminosas drenantes em estudo, sendo que num total ensaiaram-se vinte e quatro provetes cilíndricos com cerca de 100 mm de diâmetro e altura variável.

Segundo a norma, o ensaio realizou-se a uma temperatura de 20 °C. Para a sua realização o provete é colocado no equipamento NAT, entre duas barras de aço, as quais têm uma das faces côncavas ajustando-se perfeitamente ao provete que fica apoiado na parte côncava da barra inferior. O carregamento é transmitido por meio da barra superior. Posteriormente, coloca-se um sistema de apoio aos transdutores de deslocamento do tipo LVDT, conforme a Figura 4.30, de forma a ficarem diametralmente opostos.



Figura 4.30 - Ensaio de tração indireta em compressão diametral no NAT (DECA-UBI)

Para a determinação do módulo de rigidez aplicam-se cinco cargas repetidas, precedidas de um pré-carregamento de dez repetições de carga. Este pré-carregamento tem a função de ajustar o sistema de aplicação de carga ao provete no ensaio. Cada um dos provetes cilíndricos em

estudo ensaiou-se segundo duas direções diametrais e ortogonais, obtendo-se uma média de quatro medições.

No Quadro 4.12 apresentam-se os resultados respeitantes à média dos seis provetes produzidos para cada teor de betume.

Quadro 4.12 - Resultados obtidos do ensaio de tração indireta em compressão diametral

Misturas Betuminosas a quente Drenantes	Teor de betume (%)	Módulo de Rigidez (MPa)
MFSF	4,7	1946
MFF	5,2	1947
MGSF	4,6	2282
MGF	5,1	2151

Analisando os resultados obtidos presentes no Quadro 4.12, observa-se que a adição de fibras, na generalidade e tal como esperado, resulta em misturas com valor de rigidez inferiores às misturas sem adição de fibras, dado que o teor de betume também é superior.

4.5.2 Ensaio de sensibilidade à água

O ensaio de sensibilidade à água trata da avaliação da resistência mecânica de misturas betuminosas comparando dois grupos de provetes com as mesmas características, porém com acondicionamentos distintos: um grupo mantido a seco e o outro imerso, de modo a poder avaliar os diferentes comportamentos e a influência do contacto com a água nas misturas betuminosas drenantes em estudo. Este ensaio realizou-se de acordo com a norma europeia EN 12697-12:2008 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*. O método de ensaio aplicado neste estudo e efetuado em laboratório é preconizado pelo método A desta norma.

Para a realização deste ensaio, e segundo a norma, produziram-se oito provetes *Marshall*, tendo sido estes separados em dois grupos, provetes secos e provetes imersos, consoante o valor das baridades e das alturas médias, tendo em conta os limites definidos de 30 kg/m³ entre baridades médias, apresentadas no Quadro 4.13, e, para as alturas médias não diferirem em mais de 5 mm.

Quadro 4.13 - Baridade média dos grupos de provetes

Mistura Betuminosas Drenantes	Baridade média (kg/m ³)	
	Provetes secos	Provetes imersos
MFSF	1925	1894
MFF	1900	1878
MGSF	1907	1844
MGF	1916	1887

O primeiro grupo, constituído por quatro provetes secos (ITS_d), colocou-se ao ar à temperatura de 20 ± 5 °C, durante um período de 72 horas. Após este tempo, colocaram-se os provetes em ambiente seco a 15 °C durante duas horas. O segundo grupo, constituído por quatro provetes

imersos (ITS_w), numa primeira fase colocaram-se em vácuo em água a 20 ± 5 °C, por um período de 30 ± 5 minutos e a uma pressão de $6,7 \pm 0,3$ kPa, como ilustrado na Figura 4.31. De seguida, os provetes colocaram-se em banho de água a 40 ± 1 °C durante um período de 72 horas. Após este tempo, e antes de efetuar o ensaio, colocaram-se em água a 15 °C, durante duas horas.



Figura 4.31 - Provetes do segundo grupo submetidos a vácuo (DECA - UBI)

Após o referido acondicionamento dos dois grupos de provetes, efetuou-se o ensaio a uma temperatura de 15 °C, de modo a ser obtida a influência máxima de adesividade do ligante betuminoso. Realizaram-se os ensaios de tração indireta aos dois grupos de provetes, submetendo-os à compressão diametral, como se ilustra na Figura 4.32. A carga aplicada nos provetes efetuou-se a uma velocidade constante de 50 ± 2 mm/min, segundo a norma europeia EN 12697-23:2003 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*.



Figura 4.32 - Ensaio à tração indireta (DECA - UBI)

Para o cálculo da resistência à tração indireta (ITS - *Indirect Tensile Strength*), do grupo de provetes imerso e do grupo de provetes seco, recorre-se à expressão 4.7, apresentada de seguida.

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times d \times h} \quad (4.7)$$

Onde,

ITS - resistência à tração indireta (kPa);

P - resistência máxima média (kN);

d - diâmetro do provete (mm);

h - altura do provete (mm).

O cálculo da resistência conservada em tração indireta (ITSR - *Indirect Tensile Strength Ratio*) é efetuado segundo a expressão 3.1, apresentada no capítulo 3.

Os resultados obtidos neste ensaio encontram-se apresentados no Quadro 4.14, sendo estes, respetivamente, a média de quatro provetes.

Quadro 4.14 - Resultados obtidos do ensaio de sensibilidade à água (EN 12697-12 - Método A), a 15 °C

Mistura Betuminosas Drenantes	Teor de betume (%)	Resistência máxima média (kN)		ITS (kPa)		ITSR (%)
		Provetes secos	Provetes imersos	Provetes secos	Provetes imersos	
MFSF	4,7	10,7	5,7	990	540	55
MFF	5,2	9,3	5,3	880	490	56
MGSF	4,6	8,4	5,1	780	470	60
MGF	5,1	8,4	5,7	800	530	66

Uma vez que, o Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2014) não referencia qualquer requisito para o ensaio de sensibilidade à água recorreu-se, mais uma vez, às especificações espanholas *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3, 2013)* que referem um valor superior a 85 % para as misturas a quente em camadas de desgaste. Analisando o Quadro 4.14 observa-se que os resultados obtidos não cumprem este requisito.

Segundo a norma europeia EN 13108-7:2006 - *Bituminous mixtures - Material specifications - Part 7: Porous Asphalt*, a percentagem mínima para a resistência conservada em tração indireta (ITSR) é de 50 %, valor cumprido por todas as misturas estudadas.

Os resultados apresentados no Quadro 4.14 demonstram que a resistência máxima média, assim como a resistência à tração em compressão diametral (ITS) para o grupo imerso, obteve resultados inferiores aos dos provetes secos. Os provetes imersos, para além da condição desfavorável a que são sujeitos, foram colocados em água a 40 °C.

Ao analisar os resultados obtidos verifica-se uma ligeira melhoria do ITSR nas misturas betuminosas drenantes com a adição de fibras quando comparadas com as misturas sem esta adição. Observa-se que as misturas betuminosas drenantes grossas apresentam resultados superiores relativamente às misturas finas. Em relação à incorporação de fibras, observa-se que a sua adição confere alterações nas misturas. Nas misturas finas com adição de fibras verifica-se um ligeiro aumento na percentagem de ITSR relativamente às misturas sem esta adição. Nas misturas grossas com adição de fibras observa-se uma melhoria no desempenho da mistura.

Com os valores de ITSR obtidos, podem categorizar-se as misturas betuminosas drenantes em estudo, de acordo com a norma europeia EN 13108-7:2006 - *Bituminous mixtures - Material specifications - Part 7: Porous Asphalt*, apresentadas no Quadro 4.15.

Quadro 4.15 - Categorias para a resistência conservada em tração indireta (ITSR) obtidas

Mistura Betuminosas Drenantes	ITSR (%)	Categoria ITSR
MFSF	55	ITSR ₅₀
MFF	56	ITSR ₅₀
MGSF	60	ITSR ₆₀
MGF	66	ITSR ₆₀

Após este ensaio observou-se cada um dos provetes ensaiados e, consoante indicações fornecidas pela norma europeia EN 12697-23:2003, classificaram-se estes, relativamente ao tipo de rotura, estado do revestimento e presença ou não de agregado fraturado ou esmagado. Na Figura 4.33 apresenta-se um dos provetes ensaiados antes e após a aplicação de carga diametral.

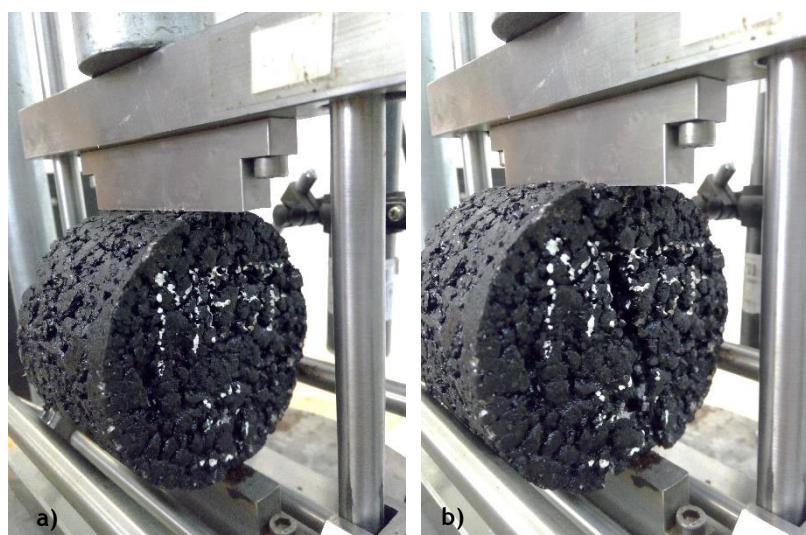


Figura 4.33 - Provetes ensaiados a) antes e b) após a aplicação da carga diametral

No Quadro 4.16 encontram-se os resultados obtidos, através da observação visual, de cada um dos provetes, de cada tipo de mistura betuminosa drenante, testados após o ensaio à tração diametral.

Quadro 4.16 - Caracterização do tipo de rotura dos provetes ensaiados

Misturas Betuminosas Drenantes	Grupo de provetes	Identificação do provete	Tipo de Rotura	Revestimento de ligante na superfície do agregado exposto	Presença de agregado fraturado ou esmagado
MFSF	Secos	MFSF-1	Comb.	NA	NA
		MFSF-2	Def.	NA	NA
		MFSF-3	Comb.	NA	NA
		MFSF-7	Comb.	NA	NA
	Imersos	MFSF-4	Trac. Ind.	NA	NA
		MFSF-5	Trac. Ind.	NA	NA
		MFSF-6	Trac. Ind.	NA	NA
		MFSF-8	Trac. Ind.	NA	NA
MFF	Secos	MFF-1	Comb.	NA	NA
		MFF-4	Comb.	NA	NA
		MFF-5	Trac. Ind.	NA	NA
		MFF-7	Comb.	NA	NA
	Imersos	MFF-2	Comb.	NA	NA
		MFF-3	Def.	NA	NA
		MFF-6	Comb.	NA	NA
		MFF-8	Comb.	NA	NA
MGSF	Secos	MGSF-2	Comb.	NA	NA
		MGSF-6	Comb.	NA	NA
		MGSF-7	Def.	NA	NA
		MGSF-8	Def.	NA	NA
	Imersos	MGSF-1	Trac. Ind.	NA	NA
		MGSF-3	Comb.	NA	NA
		MGSF-4	Def.	NA	NA
		MGSF-5	Def.	NA	NA
MGF	Secos	MGF-2	Def.	NA	NA
		MGF-3	Def.	NA	NA
		MGF-5	Comb.	NA	NA
		MGF-6	Trac. Ind.	NA	NA
	Imersos	MGF-1	Comb.	NA	NA
		MGF-4	Comb.	NA	NA
		MGF-7	Comb.	NA	NA
		MGF-8	Comb.	NA	NA

Legenda: Trac. Ind. - Tração indireta evidente; Def. - Deformação; Comb. - Combinada; NA - Nada a assinalar.

Verifica-se que os provetes ensaiados, na sua maioria, apresentaram um tipo de rotura combinada, não sendo verificado qualquer tipo de rotura no revestimento de ligante na superfície do agregado exposto, nem a presença de agregado fraturado ou esmagado.

4.5.3 Ensaio de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade determina a permeabilidade das misturas betuminosas drenantes, recorrendo a um permeâmetro LCS, para a realização do estudo da permeabilidade vertical e horizontal destas. Para a determinação da permeabilidade em laboratório foi necessário a adaptação do LCS convencional. Para tal, e recorrendo à dissertação de Oliveira (1995), já referida no Capítulo 3, o permeâmetro de carga constante, semelhante ao preconizado pela norma europeia EN 12697-19:2004 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 19: Permeability of specimen* e a norma espanhola NLT-327/00: *Permeabilidad in situ de pavimentos drenantes con el permeâmetro LCS* (CEDEX, 2000), é adaptado ao caso em estudo, ilustrado na Figura 4.34.

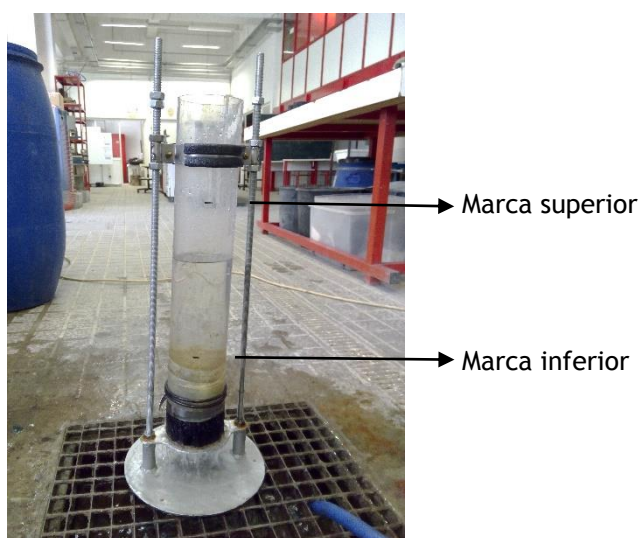


Figura 4.34 - Ensaio com recurso ao permeâmetro LCS adaptado - Permeabilidade horizontal

Permeabilidade Vertical

O ensaio para determinar a permeabilidade vertical consiste na colocação do provete no interior de uma manga de borracha de modo a impedir a passagem de água pela parede do provete, impondo a circulação de água apenas no sentido vertical. A mesma manga envolvendo o provete tem de ser ajustada ao tubo de acrílico que compõe o permeâmetro. De modo a garantir o não vazamento de água pelo interior da manga, colocaram-se dois *o-ring* em volta desta para exercer pressão assim como uma braçadeira na junta, entre o provete e o permeâmetro, como se apresenta na Figura 4.35.



Figura 4.35- Ensaio de permeabilidade vertical

Após a preparação e colocação do provete e permeâmetro devidamente vedados, iniciou-se o ensaio enchendo-se com água o permeâmetro acima da marca superior tendo-se, de seguida, cronometrado o tempo que a água demorou a descer desde a marca superior até à marca inferior, marcas visíveis na Figura 4.35.

Este procedimento foi repetido em todos os provetes das misturas betuminosas drenantes em estudo.

Permeabilidade Horizontal

Para o ensaio da permeabilidade horizontal o objetivo é o de impedir a passagem da água pela base do provete, apenas permitindo a sua passagem pela sua superfície lateral. Assim, foi necessário previamente impermeabilizar a face inferior do provete, recorrendo-se para tal a parafina, como ilustrado na Figura 4.36.



Figura 4.36 - Provete com face inferior parafinada

Após a secagem da parafina, colocou-se a face parafinada voltada para baixo no permeâmetro e repetiu-se o procedimento enunciado anteriormente para a permeabilidade vertical, contudo, desta vez, a manga não deverá obstruir a lateral do provete, como ilustrado na Figura 4.37. Após a preparação e colocação do provete e permeâmetro devidamente vedados, iniciou-se o ensaio enchendo-se com água o permeâmetro acima da marca superior tendo-se, de seguida, cronometrado o tempo que a água demorou a descer desde a marca superior até à marca inferior.



Figura 4.37 - Ensaio de permeabilidade horizontal

Este procedimento foi repetido em todos os provetes das misturas betuminosas drenantes em estudo.

Assim, para a determinação do coeficiente de permeabilidade e recorrendo à Lei de *Darcy*, expressão 3.3, referida no Capítulo 3, e tendo em conta as dimensões dos provetes utilizados as fórmulas adotadas foram:

$$a = \frac{\pi}{4} \times 9,4^2 = 69,40 \text{ cm}^2$$

$$A = \frac{\pi}{4} \times d^2 = 82,65 \text{ cm}^2$$

$$h_1 = 35 + h \text{ cm}$$

$$h_2 = 10 + h \text{ cm}$$

O cálculo do coeficiente de permeabilidade foi realizado através da seguinte expressão:

$$k = 1,918 \times \frac{h}{t} \times \log \frac{35 + h}{10 + h}$$

No Quadro 4.17 apresentam-se os tempos de escoamento e os resultados obtidos para o coeficiente de permeabilidade para as misturas betuminosas drenantes em estudo.

Quadro 4.17 - Resultados obtidos do ensaio de permeabilidade

Mistura Betuminosas Drenantes	Teor de betume (%)	Porosidade (%)	Tempo de escoamento		Coeficiente de Permeabilidade (10^{-3} m/s)	
			T_v (s)	T_h (s)	K_v (m/s)	K_h (m/s)
MFSF	4,7	19	39,69	26,72	1,28	1,84
MFF	5,2	20	11,05	8,05	4,58	6,32
MGSF	4,6	22	20,88	13,10	2,35	3,74
MGF	5,1	20	12,90	11,19	3,94	4,57

Observando os resultados obtidos verifica-se que as misturas finas e grossas com adição de fibras (MFF e MGF) apresentam coeficientes de permeabilidade vertical e horizontal superiores. A utilização de fibras na composição das misturas melhora o seu desempenho relativamente à drenagem de água num pavimento, quando comparado com as misturas sem esta adição.

A mistura MFF apresenta os melhores resultados para o escoamento de água, sendo a mistura MFSF a que demonstra os valores mais baixos, resultado do elevado tempo de escoamento. Comprova-se assim que a incorporação de fibras, ao absorver mais ligante betuminoso, permite a passagem de água entre os vazios da mistura. No caso da mistura MFSF, o seu elevado tempo de escoamento deve-se ao facto do maior número de finos na mistura contribuir para a aglutinação destes, interferindo com a permeabilidade da mistura.

Através da consulta do Quadro 3.3, presente no Capítulo 3, foi possível atribuir as categorias tendo em conta os resultados obtidos para a permeabilidade vertical e horizontal, respetivamente. No Quadro 4.18 apresentam-se as categorias estabelecidas para cada resultado obtido de permeabilidade vertical e horizontal.

Quadro 4.18- Categorias de permeabilidade vertical e horizontal

Mistura Betuminosas Drenantes	Permeabilidade Vertical	Categoria K_v	Permeabilidade Horizontal	Categoria K_h
	($K_v \times 10^{-3}$)		($K_h \times 10^{-3}$)	
MFSF	1,3	1,0	1,8	1,5
MFF	4,6	4,0	6,3	4,0
MGSF	2,4	2,0	3,7	3,5
MGF	3,9	3,5	4,6	4,5

Capítulo 5 - Considerações Finais

5.1 Conclusões

A presente dissertação incide o seu estudo nas misturas betuminosas drenantes, para a camada de desgaste, de modo a contribuir para desenvolvimento e melhoria das condições de circulação nas estradas. Estas misturas permitem a drenagem rápida de água de modo eficiente contribuindo assim para o aumento da segurança rodoviária.

O principal objetivo desta dissertação é o de avaliar a influência da ação da água nas misturas betuminosas drenantes em camadas de desgaste. Para tal, foram produzidos em laboratório quatro tipos de misturas, duas com a adição de fibras celulósicas na sua composição e outras duas sem esta adição, tendo sido efetuadas duas formulações consoante a sua granulometria fina ou grossa, permitindo assim poder comparar o desempenho de cada uma destas.

Foi efetuada uma caracterização prévia dos materiais a serem utilizados na produção das misturas e escolhida a melhor curva granulométrica. Posteriormente, realizou-se um estudo da composição das misturas betuminosas drenantes, com agregados naturais, betume modificado com polímeros e com e sem a adição de fibras celulósicas. Foram produzidos e formulados quatro tipos de misturas, consoante a granulometria dos seus agregados, sendo designadas por misturas finas ou grossas, e tendo em conta a adição, ou não, de fibras na sua composição. O bom desempenho das camadas betuminosas drenantes depende da sua formulação, mas também da produção e aplicação adequadas, principalmente no que diz respeito à temperatura. Uma temperatura baixa implica dificuldades na compactação das misturas e, conseqüentemente, uma menor baridade e uma maior porosidade.

Para a determinação do teor ótimo de betume foram tidas em conta as propriedades fundamentais, tais como a baridade e porosidade das misturas e os resultados obtidos através do ensaio cântabro a seco e imerso. Analisando estes resultados verificou-se uma melhoria significativa nas misturas a seco com fibras, comparativamente com as misturas a seco sem fibras.

No ensaio cântabro imerso a 60 °C, ensaio em condição mais desfavorável, verificou-se que as misturas betuminosas drenantes com adição de fibras celulósicas apresentaram maiores valores de perda de massa do que as misturas betuminosas sem esta adição, demonstrando a influência das fibras na obtenção de menor resistência à desagregação quando na presença de água. Os resultados obtidos foram comparados com os requisitos preconizados no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2014) e no *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes* (PG-3, 2013) para misturas betuminosas drenantes. Segundo o *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes* (PG-3, 2013) todas

as misturas betuminosas em estudo cumprem ambos os requisitos estabelecidos. Consultando o Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2014) verificou-se que ambas as misturas betuminosas drenantes finas e grossas sem fibras na sua composição cumprem o requisito estabelecido. Contudo, nas misturas betuminosas drenantes com adição de fibras, alguns dos teores de ligante betuminoso estudados não cumpriram os requisitos, tendo por isso sido excluídos da escolha do teor ótimo de betume.

Tendo-se verificado que outros autores tinham constatado que a temperatura de 60 °C para a realização do ensaio cântabro imerso seria desfavorável optou-se por repetir a sua realização a 20 °C, condição proposta em estudos anteriores. No ensaio cântabro imerso a 20 °C, confirmou-se a influência da temperatura da água no desempenho das misturas com fibras quando comparados os resultados obtidos no ensaio cântabro imerso a 60 °C, onde a melhoria é bastante significativa. Conclui-se que menores temperaturas de imersão apresentam melhores resultados de desempenho relativamente à resistência à desagregação.

Para a avaliação do desempenho destas misturas foram realizados três tipos de ensaios: o ensaio de determinação do módulo de rigidez por tração indireta em compressão diametral, o ensaio de sensibilidade à água e o ensaio de permeabilidade.

Os resultados obtidos pelo ensaio de tração indireta em compressão diametral revelam que a adição de fibras, na generalidade e tal como esperado, resulta em misturas com valor de rigidez inferiores às misturas sem adição de fibras, dado que o teor de betume também é superior.

No ensaio de sensibilidade à água, a resistência máxima média, assim como a resistência à tração em compressão diametral (ITS) para o grupo imerso, obteve resultados inferiores aos dos provetes secos. Os provetes imersos, para além da condição desfavorável a que são sujeitos, foram colocados em água a 40 °C. Segundo os resultados obtidos verificou-se uma ligeira melhoria do ITSR nas misturas betuminosas drenantes com a adição de fibras quando comparadas com as misturas sem esta adição. Após a realização do ensaio de sensibilidade à água os provetes ensaiados foram observados e classificados, segundo a norma vigente, pelo tipo de rotura. Na sua maioria os provetes cilíndricos apresentaram um tipo de “rotura combinada” não sendo verificado qualquer tipo de rotura no revestimento de ligante, na superfície do agregado exposto, nem a presença de agregado fraturado ou esmagado.

No ensaio de permeabilidade verificou-se que as misturas finas e grossas com adição de fibras apresentam coeficientes de permeabilidade vertical e horizontal superiores comprovando-se que a utilização de fibras na composição das misturas melhora o seu desempenho relativamente à drenagem de água num pavimento, quando comparado com as misturas sem esta adição. Comprova-se assim que a incorporação de fibras ao absorver mais ligante betuminoso permite a passagem de água entre os vazios da mistura.

Conclui-se que as fibras celulósicas reforçam a mistura betuminosa e contribuem para a melhoria das suas propriedades de coesão. As fibras também permitem um maior teor de ligante numa mistura betuminosa em relação às misturas sem a sua adição. Este fator revela-se bastante importante para as camadas de desgaste drenantes, uma vez que um teor de ligante betuminoso mais elevado forma uma película mais espessa no recobrimento dos agregados que aumenta a durabilidade destas misturas.

5.2 Trabalhos Futuros

A presente dissertação pretende contribuir para o conhecimento e desenvolvimento das misturas betuminosas drenantes, sendo que o estudo, evolução e implementação de novas técnicas só é conseguido pela avaliação de sucessivas e sistemáticas experiências.

Para trabalhos futuros seria relevante a realização de estudos relativos à colmatação das camadas constituídas por misturas betuminosas drenantes, sendo esta uma das suas limitações de desempenho.

Apesar do estudo realizado, a contribuição das fibras para o desempenho das misturas betuminosas drenantes requer mais pesquisas. Como demonstrado existem diferentes tipos e natureza de fibras, sendo que o desempenho do ligante betuminoso varia com os tipos e concentrações de fibra na sua composição.

Para o desenvolvimento das misturas betuminosas drenantes são necessários mais estudos relativamente aos danos físicos e mecânicos. Para tal, é sugerida a realização de modelos experimentais à escala real de modo a obterem-se resultados de acordo com a realidade de exposição e vida útil destas misturas.

O estudo do envelhecimento do ligante betuminoso deverá ser mais aprofundado, pois apesar de já existirem algumas pesquisas internacionais relativas a este fenómeno, as camadas betuminosas drenantes, devido à sua elevada porosidade estão sujeitas a uma maior exposição à oxidação.

Importante e pertinente seria o estudo e verificação da possibilidade de incorporação de materiais reciclados neste tipo de misturas de modo a incentivar a sustentabilidade na construção.

Referências Bibliográficas

Aksoy, A.; Şamlioglu, K.; Tayfur, S. and Özen, H. (2005). *Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures*. Construction and Building Materials, Volume 19, p. 11-18, 2005.

APA (2003). *Open-Graded Friction Courses: Smooth, Quiet, and more Durable than ever*. Asphalt Pavement Alliance - APA Newsletter #1109, February, 2003. Acedido a 22 de março de 2016. Disponível em: http://www.asphaltroads.org/assets/_control/content/files/Open%20Graded%20Friction%20Courses%201_757265452_162006144224%281%29.pdf

Batista, F. A. e Antunes, M. L. (2009). *Ensaio de comparação interlaboratorial para avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas compactadas*. Relatório LNEC nº 181/2009, Processo 0702/01/17243, Lisboa, junho, 2009.

Bendtsen, H.; Andersen, B.; Raaberg, J.; Larsen, L. E. and Kragh, J. (2005). *Two-layer porous asphalt - for urban roads*. Danish Road Institute, Report 144, 18pp. ISBN electronic: 87-91177-69-5, Denmark, November, 2005. Acedido a 12 de abril de 2016. Disponível em: http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/publikationer/Lists/Publikationer/Attachments/252/144vi.pdf

Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P. e Soares, J. B. (2010). *Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros*. Petrobrás e ABEDA - Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos, 3ª Reimpressão, p. 504, Rio de Janeiro, março, 2010. Acedido a 4 de fevereiro de 2016. Disponível em: http://www.proasfalto.com.br/pdf/Asfalto_Capitulo_03_Mar2010.pdf

Bolzan, P. E.; Nicholls, J. C. and Huber, G. A. (2001). *Searching for Superior Performing Porous Asphalt Wearing Courses*. TRB 2001 Annual Meeting, Transportation Research Board. National Research Council, Washington, D.C., USA, 2001.

Branco, F.; Pereira, P. e Santos, L. P. (2006). *Pavimentos Rodoviários*. 3ª Reimpressão, p. 388, Edições Almedina, SA, Coimbra, 2006.

Briggs, J. F.; Roseen, R. M. and Ballestero, T. P. (2009). *UNHSC Design Specifications for Porous Asphalt Pavement and Infiltration Beds*. University of New Hampshire Stormwater Center. Durham, New Hampshire, October, 2009.

Brown, S. (1990). *The Shell bitumen handbook*. Shell Bitumen, first edition, Surrey, U. K., ISBN: 0-9516625-0-3, July, 1990.

Campbell, C. (1999). *The Use of Stone Mastic Asphalt on Aircraft Pavements*. Final report, School of Engineering and Technology, Deakin University, Dubai, December, 1999. Acedido a 6 de maio de 2016. Disponível em: <http://www.aapt.us/04-04SMAAirfields.pdf>

Carvalho, A. (2012). *Estudo da utilização de fibras em misturas betuminosas*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa - ISEL, Lisboa, fevereiro, 2012.

Castro, L. R.; Arce, M.; Elizondo, F. y Jiménez, M. (2005). *Mezclas drenantes*. 13º CILA - Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, San José, Costa Rica, Noviembre, 2005.

CEDEX (1992). Spanish Standard NLT-362/92: *Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas betuminosas de granulometria abierta, mediante el ensayo cántabro de perdida por desgaste*. Madrid, España, 1992.

CEDEX (2000). Spanish Standard NLT-327/00: *Permeabilidad in situ de Pavimentos Drenantes con el Permeámetro LCS*. Madrid, España, 2000.

CEPSA (2014). *Manual de Pavimentação*. CEPSA Betumes, 3ª Edição, Lisboa, Portugal, março, 2014.

Copeland, A. R. (2007). *Influence of moisture on bond strength of asphalt-aggregate systems*. Thesis for the degree of Doctor in Civil Engineering, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee, USA, August, 2007.

Dhalla, S. and Zimmer C. (2010). *Low Impact Development Stormwater Management Planning and Design Guide*. Toronto and Region Conservation Authority, Credit Valley Conservation Authority, Version 1.0, 2010.

Dias, T.; Pereira, P. e Pais, J. (2004). *Estudo da Reabilitação Estrutural de uma Camada Drenante*. 3º Congresso Rodoviário Português - Gestão do Sistema Rodoviário, Lisboa, 24 a 26 de novembro, 2004.

Dinis-Almeida, M. S. F. (2003). *Pavimentos Rodoviários de Baixo Custo com Emulsões Betuminosas e Resíduos das Minas da Panasqueira*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2003.

Dumke, M. P. (2005). *Concreto asfáltico drenante com fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto-borracha*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, p. 111, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, abril, 2015.

Dylla, H. L. and Hansen, K. R. (2015). *Porous Asphalt Pavements with Stone Reservoirs*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Asset Management, Pavements, and Construction, FHWA-HIF-15-009, April, 2015.

EAPA (2014). "Asphalt in Figures 2014". Version 16-02-2016, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium, 2014. Acedido a 2 de abril de 2016. Disponível em http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/AIF_2014_16022016.pdf

Estradas de Portugal, S.A. (2014). *Caderno de Encargos Tipo Obra, Capítulo 14.03 - Pavimentação, Características dos materiais*. Volume 3, setembro, 2014. Acedido a 16 de janeiro de 2016. Disponível em: http://www.infraestruturasdeportugal.pt/sites/default/files/cet/14_03_set_2014.pdf

FHWA (2015). *Porous Asphalt Pavements with Stone Reservoirs*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of asset management pavements and construction, FHWA-HIF-15-009, 2015.

Filho, E. M. (2001). *Estudos de Granulometria para Concretos Asfálticos Drenantes*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, especialização na área de Infra-Estrutura e Gerência Viária, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, p. 163, março, 2001.

Fitts, G. (2002). *The New and Improved Open-Graded Friction Course Mixes*. Asphalt Magazine, Volume 17, No. 2, p. 16-18, 2002.

Fletcher, E. and Theron, A. J. (2011). *Performance of open-graded porous asphalt in New Zealand*. NZ Transport Agency - research report 455, p. 66, Hamilton, New Zealand, October, 2011.

Fonseca, P. (1998). *Misturas Betuminosas Drenantes - A Experiência Portuguesa*. 3º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 27 a 30 de abril de 1998.

Furlan, A. P.; Gouveia, L.T.; Fabbri, G. T. P. e Fernandes Jr., J. L. (2004). *Influência de características dos agregados na susceptibilidade a dano por umidade de misturas asfálticas*. Anais do 17º Encontro de Asfalto, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP, p. 8, Rio de Janeiro, dezembro, 2004.

Gibbs, D. C.; Iwasaki, R.H.; Bernhard, R. J.; Bledsoe, J. F.; Carlson, D. D.; Corbisier, C.; Fults, K. W.; Hearne Jr., T. M.; McMullen, K. W.; Newcomb, D. E.; Roberts, J. H.; Rochat, J. L.; Scofield, L. A. and Swanlund, M. E. (2005). *Quiet Pavement Systems in Europe*. U.S. department of Transportation- FHWA - Federal Highway Administration, FHWA International Technology Exchange Program, (Program Project 20-36), p. 48. May, 2005. Acedido a 20 de janeiro de 2016. Disponível em: http://international.fhwa.dot.gov/pubs/quiet_pav/contents.cfm

Gouveia, L. T.; Furlan, A. P.; Parreira, A. B.; Júnior, J. L. F. e Fabbri, G. T. P. (2004). *Considerações acerca da absorção de asfalto pelos agregados e a sua influência na susceptibilidade à umidade*. XVIII ANPET - Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte, volume 1, p. 138-149, Florianópolis, 2004.

Hagos, E. T. (2008). *The Effect of Aging on Binder Properties of Porous Asphalt Concrete*. Ph.D Thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2008.

Hagos, E. T.; Molenaar, A.; Ven, M. and Voskuilen, J. (2007). *Durability Related Investigation into Porous Asphalt*. Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials, p. 713-727, Loizos, Scarpas & Al-Qadi (eds), Taylor & Francis Group, London, 2007.

Hamzaha, M.; Kakara, M. and Haininb, M. (2015). *An Overview of Moisture Damage in Asphalt Mixtures*. Article, pp. 1-6, Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering), Volume 73, No. 4 - Special Issue on Highway and Transportation Engineering, Part 2, eISSN: 2180-3722, Malaysia, 2015.

Hansen, K. (2008). *Porous Asphalt Pavements for stormwater management - design, construction and maintenance guide*. National Asphalt Pavement Association - NAPA, Information Series 131, Maryland, USA, 2008. Acedido a 15 de março de 2016. Disponível em: http://driveasphalt.org/assets/content/resources/IS-131_Porous_Asphalt_Pavements_for_Sormwater_Management-screen.pdf

Hernández, J. R. (2008). *Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráficos ligeros*. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, Santander, España, Mayo, 2008.

Herrington, P. R.; Reilly, S. and Cook, S. (2005). *Porous Asphalt Durability Test*. Transfund New Zealand Research, Report 265, p. 32, ISBN: 0-478-25376-1, 2005.

Hirsh, V. and Ripke, O. (2008). *Lessons Learned from Streets - Porous Asphalt*. News info - Viatop® fiber pellets, J. Rettenmaier & Söhne - JRS, September, 2008.

Homem, T. (2002). *Comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, janeiro, 2002.

Huang, S. C.; Robertson, R. E. e Branthaver, J. F. (2003). *Physico-Chemical Characterization of asphalt-aggregate interactions under the influence of freeze-thaw cycle*. Annual Meeting, Transportation Research Record, Western Research Institute, p. 2-17, July, 2003.

Huber, G. (2000). *Performance Survey on Open-graded Friction Course Mixes*. NCHRP Synthesis of Highway Practice 284. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA, 2000.

Hwee, L. and Guwe, V. (2004). *Performance Related Evaluation of Porous Asphalt Mix Design*. 6th Malaysian Road Conference - MRC, p.12, Kuala Lumpur, Malaysia, 16th - 18th August, 2004.

InIR (2009a). *Directivas para a Concepção de Pavimentos - Critérios de Dimensionamento de Pavimentos*, Instituto de Infraestruturas Rodoviárias IP, 2009. Acedido a 18 de novembro de 2015. Disponível em: <http://www.imtt.pt/sites/IMTT/Portugues/InfraestruturasRodoviaras/InovacaoNormalizacao/Divulgao%20Tcnica/DiretivasConstrucaoPavimentosCritériosDimensionamento.pdf>

InIR (2009b). *Construção e Reabilitação de Pavimentos - Ligantes Betuminosos*, Instituto de Infraestruturas Rodoviárias IP, 2009. Acedido a 18 de novembro de 2015. Disponível em: <http://www.imtt.pt/sites/IMTT/Portugues/InfraestruturasRodoviaras/InovacaoNormalizacao/Divulgao%20Tcnica/ConstrucaoReabilitacaoPavimentosLigantesBetuminosos.pdf>

Jornal Público (2006). Acedido a 13 de janeiro de 2016. Disponível em: <http://www.publico.pt/destaque/jornal/mortos-na-a1-diminuiram-52-por-cento-em-13-anos-97433>

JRS (2016). *CATÁLOGO VIATOP®: Informações Técnicas VIATOP®*. J. Rettenmaier e Söhne company - JRS, Manufacturers of Fibers, 2016. Acedido a 30 de março de 2016. Disponível em: <http://www.jrs.de/wEnglisch/produkte/viatop.shtml>

- Kaloush, K. E.; Biligiri, K. P.; Zeiada, W. A.; Rodenzo, M. C. and Reed, J. X. (2010). *Evaluation of Fiber-Reinforced Asphalt Mixtures Using Advanced Materials Characterization Tests*. Journal of Testing and Evaluation, p. 1-12, Volume 38, No. 4, July, 2010.
- Kamar, F. and Sarif, J. (2009). *Design of porous asphalt mixture to performance related criteria*. 13th Conference of the Road Engineering Association of Asia and Australasia (REAAA), Incheon, South Korea, September, 2009.
- Kandhal, P. (2002). *Design, Construction, and Maintenance of Open-Graded Asphalt Friction Courses*. Information Series 115, National Asphalt Pavement Association (NAPA), Lanham, Maryland, USA, 2002.
- Kim, Y. and Lutif, J. S. E. (2006). *Material Selection and Design Consideration for Moisture Damage of Asphalt Pavement*. Final Research Report No. 564, p. 68, Nebraska Department of Roads, Lincoln, Nebraska, USA, December, 2006.
- Kline, L. (2010). *Comparision of Open-Graded Friction Course Mix Design Methods Currently used in the United States*. Degree Master of Science Civil Engineering, School of Clemson University, All Theses, paper 846, May, 2010.
- Kringos, N. (2007). *Modeling of Combined Physical-Mechanical Moisture Induced Damage in Asphaltic Mixes*. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, ISBN/EAN: 978-90-9021765-9, June, 2007.
- Lão, V. (2004). *Estudo Comparativo do Desempenho Acústico de Diferentes Tipos de Revestimento dos Pavimentos*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, março, 2004.
- Lebens, M. A. and Troyer, B. (2012). *Porous Asphalt Pavement Performance in Cold Regions*. Final Report, No. MN/RC 2012-12, p. 204, Minnesota Department of Transportation (MnDOT), St. Paul, Minnesota, USA, April, 2012.
- Lee, D.; Guinn, J. A.; Khandhal, P. S. and Dunning, R. L. (1990). *Absorption of Asphalt into porous aggregates*. Strategic Highway Research Program - SHRP, National Research Council Washington, D.C., September, 1990.
- MacDonald, C. (2006). *Porous Pavements Working in Northern Climates*. Hot Mix Asphalt Technology, National Asphalt Pavement Association, Lanham, MD, July/August 2006.
- Mallick, R. B.; Kandhal, P. S.; Cooley Jr., L. A. and Watson, D. E. (2000). *Design, Construction, and Performance of New Generation of Open-Graded Friction Courses*. National Center for Asphalt Technology, NCAT Report no. 2000-01, Auburn University, April, 2000. Disponível em <http://ntl.bts.gov/lib/8000/8800/8813/rep00-01.pdf>, acessado a 20 de março, 2016.
- Martinho, F.; Lanchas, S.; Nunez, R.; Batista, F. e Miranda, H. (2013). *A experiência portuguesa em misturas betuminosas do tipo SMA com fibras celulósicas*. VII Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 10-12 Abril, 2013.

Menezes, M. (2008). *Estudo das características de superfície de pavimentos rodoviários para análise de segurança do tráfego*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, setembro, 2008.

Miró, R.; Martínez, A.; Pérez, F. and Bianchetto, H. (2004). *Effect of Filler on the Aging Potential of Asphalt Mixtures*. Transportation Research Record, Volume 1901, No. 1, p. 10-17, October, 2004.

Mo, L. T. (2010). *Damage development in the adhesive zone and mortar of porous asphalt concrete*. PhD Thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Department of Road and Railway Engineering, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, ISBN: 978-90-8570444-7, January, 2010.

Moghaddam, A. M.; Ziaee, S. A.; Mollashahi, H. F. and Qazizadeh, M. J. (2014). *Effects of Waste Fibers Stabilizers on the Draindown and Moisture Damage Sensitivity Properties of SMA Mixtures*. International Journal of Transportation Engineering, Volume 2, No. 2, Autumn, 2014.

Mourão, F. (2003). *Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, p. 131, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, outubro, 2003.

Nascimento, C. (2012). *Avaliação da Permeabilidade de Misturas Betuminosas Drenantes em Laboratório e "in situ"*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, especialização em Vias de Comunicação. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, janeiro, 2012.

NCHRP (2015). NCHRP Synthesis 475, *Fiber Additives in Asphalt Mixtures - A Synthesis of Highway Practice*, ISBN: 978-0-309-27177-6, Washington, D.C., USA, 2015.

Nesichi, S. (2005). *Trial Sections with Advanced Mixtures*. Netivei Ayalon Co., Technical Report No. 2. Acedido em 2 de abril de 2016. Disponível em: <http://www.iroads.co.il/en/content/trial-sections-advanced-mixtures>

Nielsen, C. B. (2006). *Durability of porous asphalt- International experience*. Danish Road Institute, Technical note 41, Road Directorate Ministry of Transport and Energy, November, 2006. Acedido em 12 de fevereiro de 2016. Disponível em: http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/publikationer/Lists/Publikationer/Attachments/236/not041vi.pdf

NY Materials (2011). New York Construction Materials Association, *Porous Asphalt Pavements General Information Sheet*. Porous Asphalt Association Guidance Document, November, 2011. Acedido em 2 de abril de 2016. Disponível em: <http://www.nymaterials.com/Resources/Documents/Porous%20Asphalt%20Association%20Guidance%20Document.pdf>

Oliveira, C. (2003). *Estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto asfáltico drenante*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, Publicação G.DM-111ª/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, setembro, 2003.

Oliveira, I. M. (1995). *Misturas Betuminosas Drenantes - Estudo da influência de alguns Parâmetros da Composição*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, dezembro, 1995.

Ongel, A.; Harvey, J. and Kohler, E. (2007). *State of the Practice in 2006 for Open-Graded Asphalt Mix Design*. University of California, Pavement Research Center Strategic Plan Element No. 4.16: Investigation of Noise, Durability, Permeability, and Friction Performance Trends for Asphaltic Pavement Surface Types, UCPRC, December 2007.

PAVIDREN. *Betão Betuminoso Drenante, Pavimentos de Elevada Qualidade*. Grupo Pavia, Tecnobet, Ligantes e misturas betuminosas, SA. Acedido a 2 de fevereiro de 2016. Disponível em: <https://www.forma-te.com/finish/26-construcao-civil/16196-pavidren>

Pereira, F. (2009). *Estudo da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, especialização em Vias de Comunicação e Transportes, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, setembro, 2009.

Pérez-Jiménez, F. E. and Gordillo, J. (1990). *Optimization of Porous Mixes Through the Use of Special Binders*. Transportation Research Record, no. 1265, National Research Council, p. 59-68, Washington, D.C., USA, 1990.

Pérez-Jiménez, F.; Recasens, R. Miró; Martínez, A.; Láinez, C. M. y Dueñas, A. P. (2006). *Evaluación de la cohesión de betunes modificados con polvo de neumáticos*. Materiales de Construcción, Volume 56, No. 284, p. 43-54, ISSN: 0465-2746, octubre-diciembre 2006.

PG-3 (2013). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Artículo 542 - Mezclas betuminosas en caliente tipo hormigón betuminoso (OC 29/2011), 11ª Edición*. Ministerio de Fomento, Dirección General de Carreteras, España, diciembre, 2013.

Poulikakos, L. D. and Partl, M. N. (2009). *Evaluation of moisture susceptibility of porous asphalt concrete using water submersion fatigue tests*. Construction and Building Materials, Volume 23, p. 3475-3484, November, 2009.

Poulikakos, L. D. and Partl, M. N. (2010). *Investigation of porous asphalt microstructure using optical and electron microscopy*, Journal of Microscopy, Volume 240, Issue 2, Article first published online: 28th april 2010.

Poulikakos, L. D.; Pittet, M.; Arnaud, L.; Junod, A.; Gubler, R.; Simond, E.; Partl, M. and Dumont, A. (2006). *Mechanical Properties of Porous Asphalt, Recommendations for Standardization*. Research Report. Swiss Federal Laboratory for Materials Testing and Research, Empa, Dübendorf, Switzerland Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) - Laboratoire des voies de circulation (LAVOC), December, 2006.

Poulikakos, L. D; Takahashi, S.; Partl, M. N. (2004). *A Comparison of Swiss and Japanese Porous Asphalt Through Various Mechanical Tests*. 4th Swiss Transport Research Conference, STRC 2004, p. 1-12, Monte Verità, Ascona, Switzerland, March, 2004.

Poulikakos, L.; Takahashi, S. and Partl, M. N. (2007). *Coaxial Shear Test and Wheel Tracking Tests for Determining Porous Asphalt Mechanical Properties*. International Journal on Road Materials and Pavement Design, Volume 8, No. 3, p. 579-594, ISSN 1468-0629, July, 2007.

Putman, B. J. (2012). *Evaluation of Open-Graded Friction Courses: Construction, Maintenance, and Performance*. Federal Highway Administration, Report No. FHWA-SC-12-04, Final Report, October, 2012.

Ranieri, V. (2005). *The Development in the use of Porous Asphalts in Europe*. 3rd International SIV Congress, Bari, Italy, 22nd-24th September, 2005.

Recasens, R. M. (2006). *Nuevas Mezclas para Capas de Rodadura y su influencia en el Confort (ruido) y la Seguridad*. Universidad Politécnica de Cataluña. Zaragoza, Diciembre, 2006.

Ribeiro, R. (2012). *Aplicação de mistura betuminosa aberta com betume modificado com alta incorporação de borracha na reabilitação de pavimentos rodoviários*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia de Construção e Reabilitação, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu - Instituto Politécnico de Viseu, Viseu, Portugal, março, 2012.

Roseen, R.; Ballesteros, T.; Houle, J.; Briggs, J. and Houle, K. (2012). *Water Quality and Hydrologic Performance of a Porous Asphalt Pavement as a Storm-Water Treatment Strategy in a Cold Climate*. Journal Environmental Engineering, 10.1061/(ASCE), EE.1943-7870.0000459, p. 81-89, January, 2012.

Ruiz, A.; Alberola, R.; Pérez, F. and Sánchez, B. (1990). *Porous Asphalt Mixtures in Spain*. Transportation Research Record No. 1265, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., p. 87-94, 1990.

Sandberg, U. (2012). *The Art of Constructing a Low Noise Road Surface*. Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI). Seminário: Gestão da velocidade e do ruído rodoviário, Universidade do Minho, 29 e 30 de maio, Guimarães, 2012.

Sharew, Y. J. (2010). *Development of a Laboratory Ageing Method for Bitumen in Porous Asphalt*. M.Sc. Thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, August, 2010.

Silva, H. (2005). *Caracterização do Mástique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mástique - Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas*. Tese para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, especialização em Vias de Comunicação, p. 366, Escola de Engenharia, Braga, Universidade do Minho, outubro, 2005.

Souza, S. (2008). *Avaliação da Capacidade de Escoamento da Água em Mistura Asfáltica drenante: Proposta de Ensaio de laboratório*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, fevereiro, 2008.

Takahashi, S. and Partl, M. N. (2001). *Improvement of Mix Design for Porous Asphalt*. Road Materials and Pavement Design, Volume 2, No. 3/2001, p. 283-296, June, 2001.

Thodesen, C. and Hoff, I. (2010). *Pavement Performance of Remediation Requirements following Climate Change: Study of Water Effects on Asphalt and Porous Asphalt*. P2R2C2 - Study of Water Effects on Asphalt and Porous Asphalt, Report No. 5, June, 2010.

Vale, A.; Casagrande, M. and Soares, J. (2014). *A Study of Behavior of Natural Fiber in Stone Matrix Asphalt Mixtures Using Two Design Methods*. Journal of Materials in Civil Engineering, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000815, p. 457-465, February, 2014.

Virgiliis, A. (2009). *Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre, especialização em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2009.

Voskuilen, J. and Elzinga, F. (2010). *New life for Porous Asphalt RAP in new Porous Asphalt*. 11th International Conference on Asphalt Pavements, International Society for Asphalt Pavements - ISAP, Nagoya, Aichi, Japan, 1st-6th August, 2010.

Wu, S.; Liu, G.; Mo, L.; Chen, Z. and Ye, Q. (2006). *Effect of fiber types on relevant properties of porous asphalt*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, China, Volume 16, Supplement 2, p. 791-795, June, 2006.

Yaron, R. and Nesichi, S. (2005). *Alleviating the Skid Resistance Problem - The Israeli Experience*. Aram Engineers - Haifa Israel, Public Works Department, Israel, May, 2005. Acedido em 2 de abril de 2016. Disponível em: <https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/surface-friction-conference-2005/7/docs/alleviating-skid-resistance-problem-israeli-experience.pdf>

Yi, J.; Shen, S.; Muhunthan, B. and Feng, D. (2014). *Viscoelastic - Plastic Damage Model for Porous Asphalt Mixtures Application to uniaxial compression and freeze-thaw damage*. Article in Mechanics of Materials, Volume 70, p. 67-75, January, 2014.

Acervo Normativo

EN 12697-5:2002	<i>Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density.</i>
EN 12697-6:2003	<i>Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens.</i>
EN 12697-8:2003	<i>Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens.</i>
EN 12697-12:2008	<i>Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens.</i>
EN 12697-17:2004	<i>Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 17: Particle loss of porous asphalt specimens.</i>
EN 12697-19:2004	<i>Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 19: Permeability of specimens.</i>
EN 12697-23:2003	<i>Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens.</i>
EN 12697-26:2004	<i>Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness.</i>
EN 12697-30:2004	<i>Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation by impact compactor.</i>
EN 12697-35:2004	<i>Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 35: Laboratory mixing.</i>
EN 13108-7:2006	<i>Bituminous mixtures - Material specifications - Part 7: Porous Asphalt.</i>
EN 14023	<i>Bitumen and bituminous binders - Specification framework for polymer modified bitumens.</i>
NLT 327/00:2000	<i>Permeabilidade in situ de pavimentos drenantes com o permeômetro LCS.</i>
NLT 362/92	<i>Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas betuminosas de granulometria abierta, mediante el ensayo cántabro de perdida por desgaste.</i>
NP EN 933-1:2000	<i>Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica - Método de peneiração.</i>
NP EN 1097-6:2003	<i>Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água.</i>